

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Волгоградский государственный технический университет»

На правах рукописи



Саразов Александр Васильевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛОСКОГО ШЛИФОВАНИЯ  
ЗАГОТОВОК МАЛОЙ ЖЁСТКОСТИ НАПРАВЛЯЮЩИХ ЛИНЕЙНЫХ  
ПОДШИПНИКОВ**

05.02.07 - «Технология и оборудование механической  
и физико-технической обработки»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Носенко Владимир Андреевич

Волгоград – 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение.....                                                                                                                                                                          | 5  |
| 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА.....                                                                                                                                                       | 12 |
| 1.1. Конструктивные особенности направляющих линейных<br>подшипников. Требования к геометрическим параметрам.....                                                                      | 12 |
| 1.2. Особенности механической обработки заготовок малой жёсткости<br>и обеспечения точности геометрических параметров обработанных<br>поверхностей.....                                | 19 |
| 1.2.1. Особенности образования погрешностей при механической<br>обработке заготовок малой жёсткости и обеспечения точности<br>геометрических параметров обработанных поверхностей..... | 19 |
| 1.2.2. Анализ геометрических параметров, классификация деталей<br>малой жесткости.....                                                                                                 | 23 |
| 1.2.3. Особенности механической обработки деталей малой<br>жесткости.....                                                                                                              | 24 |
| 1.3. Особенности процесса плоского шлифования деталей из закаленных<br>легированных сталей. Подходы к моделированию и оптимизации<br>процесса шлифования .....                         | 30 |
| 1.3.1. Особенности процесса плоского шлифования деталей из<br>закаленных легированных сталей.....                                                                                      | 30 |
| 1.3.2. Показатели качества шлифованной поверхности .....                                                                                                                               | 32 |
| 1.3.3. Подходы к моделированию и оптимизации процесса<br>шлифования.....                                                                                                               | 32 |
| 1.4. Основные выводы.....                                                                                                                                                              | 37 |
| 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ.....                                                                                                                                               | 39 |
| 2.1. Экспериментальные образцы.....                                                                                                                                                    | 39 |
| 2.2. Абразивный инструмент .....                                                                                                                                                       | 39 |
| 2.3. Методика определения составляющих сил резания $P_y$ и $P_z$ .....                                                                                                                 | 40 |
| 2.4. Методики определения шероховатости, волнистости, отклонения от                                                                                                                    |    |

|                                                                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| плоскостности, прижогов.....                                                                                                                                                    | 41 |
| 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ. АЛГОРИТМ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ШЛИФОВАНИЯ.....                                                                                 | 43 |
| 3.1. Выбор расчетной схемы для определения величины упругих деформаций призматических заготовок.....                                                                            | 43 |
| 3.2. Определение максимальных прогибов призматических заготовок при закреплении магнитным полем стола станка .....                                                              | 51 |
| 3.3. Определение максимальных прогибов призматических заготовок при шлифовании с закреплением магнитным полем стола станка .....                                                | 56 |
| 3.4. Определение контактных деформаций .....                                                                                                                                    | 67 |
| 3.5. Алгоритм выбора оптимальных условий плоского шлифования боковых граней призматических заготовок малой жёсткости. Условия обеспечения требуемого допуска плоскостности..... | 69 |
| 3.6. Выводы.....                                                                                                                                                                | 73 |
| 4. МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЫХОДНЫХ ФАКТОРОВ, МАКСИМАЛЬНЫХ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ ДЛЯ УСЛОВИЙ ШЛИФОВАНИЯ НАПРАВЛЯЮЩЕЙ ЛИНЕЙНОГО ПОДШИПНИКА ЛРХ 6/350.....                                     | 74 |
| 4.1. План факторного эксперимента типа $2^3$ .....                                                                                                                              | 74 |
| 4.2. Регрессионные модели составляющих силы резания.....                                                                                                                        | 75 |
| 4.3. Регрессионные модели шероховатости обработанной поверхности (параметр $Ra$ ) .....                                                                                         | 82 |
| 4.4. Определение контактных деформаций для заготовки направляющей линейного подшипника.....                                                                                     | 86 |
| 4.5. Экспериментальные исследования упругих деформаций .....                                                                                                                    | 91 |
| 4.6. Проверка условий обеспечения требуемого допуска плоскостности обработанной поверхности при шлифовании боковых граней направляющей линейного подшипника .....               | 95 |

|                                                                                                                                                                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.7. Тарировка удельного усилия притяжения магнитного поля стола<br>станка.....                                                                                                                                                           | 99  |
| 4.8. Выводы.....                                                                                                                                                                                                                          | 103 |
| 5. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛОСКОГО ШЛИФОВАНИЯ<br>ЗАГОТОВОК МАЛОЙ ЖЁСТКОСТИ НАПРАВЛЯЮЩИХ<br>ЛИНЕЙНЫХ ПОДШИПНИКОВ.....                                                                                                                     | 104 |
| 5.1. Алгоритм и методика для определения оптимальных условий<br>шлифования боковых граней призматических заготовок<br>направляющих .....                                                                                                  | 104 |
| 5.2. Разработка рекомендаций по повышению эффективности процесса<br>плоского врезного шлифования боковых граней призматических<br>направляющих линейных подшипников малой жёсткости .....                                                 | 107 |
| 5.3. Выводы.....                                                                                                                                                                                                                          | 112 |
| Заключение. Общие выводы .....                                                                                                                                                                                                            | 114 |
| Список сокращений и условных обозначений.....                                                                                                                                                                                             | 115 |
| Список литературы.....                                                                                                                                                                                                                    | 117 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А. Акт внедрения в производство.....                                                                                                                                                                                           | 135 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Акт внедрения в учебный процесс.....                                                                                                                                                                                        | 136 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В. Методика выбора оптимальных режимов плоского<br>шлифования боковых граней призматических направляющих линейных<br>подшипников малой жёсткости с управлением их упругим<br>деформированием при закреплении и обработке ..... | 138 |

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы исследования.**

Шлифование является одним из основных методов механической обработки, определяющих качество изготовления деталей. Поэтому повышение эффективности шлифования относится к приоритетным задачам машиностроения.

Одной из разновидностей подшипников качения является шариковый или роликовый подшипник качения для линейного перемещения (далее – линейный подшипник). Значительные трудности возникают при обработке заготовок малой жёсткости направляющих линейных подшипников. При закреплении и обработке заготовок направляющих линейных подшипников возникают упругие деформации. Величина данных деформаций может превышать допуски на геометрические параметры обработанной поверхности. После шлифования и снятия магнитного поля стола станка, упругие деформации могут возвращать определённую величину отклонения геометрическим параметрам, которые могут превышать заданные требования. Технологические способы их устранения значительно увеличивают время обработки и стоимость операции.

Ограничение упругих деформаций заготовки при закреплении и обработке может позволить обеспечить снижение временных и стоимостных затраты при гарантированном достижении геометрической точности детали.

**Степень разработанности темы исследования.** В исследованиях отечественных и зарубежных ученых: Балашова А.В., С.Л. Васильевых, С. И. Дмитриева, О. И. Драчева, В.С. Корсакова, К.С. Колева, З.И. Кременя, В.А. Носенко, В.Г. Подпоркина, А.Л. Плотникова, В.Е. Сайтова, А.П. Соколовского, Я.И. Солера, В.Н. Тышкевича, А.Н. Унянина, А.Ш. Хусаинова, Ю.Л. Чигиринского, Е.С. Шелихова, *T. Aoyama, E. Brinksmeier, Y. Kakinuma, W. Taranenko, B. Zhang, A. Świć, Ratchev S., Liu S., Huang W., Becker A.A.* и др. по различным аспектам механической обработки деталей малой жёсткости определены и обоснованы способы повышения эффективности механической обработки, геометрической точности деталей малой жёсткости.

Упругие радиальные деформации заготовок подшипниковых колец, валов малой жёсткости при их токарной обработке обязательно учитываются при разработке техпроцессов для повышения точности. Необходимые рекомендации по выбору режимов токарной обработки заготовок с учётом их жёсткости базируются на разработках В. С. Корсакова, А.П. Соколовского.

В исследованиях Солера Я.И., Нгуен В. Л., Нгуен В.К. отмечается существенное влияние жёсткости заготовок на оптимальные режимы плоского шлифования при обеспечении требуемого качества обработанной поверхности.

При плоском шлифовании заготовок малой жёсткости для обеспечения требуемого допуска плоскостности обработанной поверхности используется большое число переходов, длительное выхаживание. Для ограничения величины максимальных упругих деформаций заготовок применяются подкладки или компенсаторы, увеличивающие их жесткость при изгибе. Результат от установки компенсаторов в большой степени зависит от квалификации и опыта работы станочника. Математическая модель максимальных упругих деформаций заготовки, учитывающая силы резания, силы притяжения магнитного поля стола, геометрические параметры заготовки позволит определять оптимальное количество компенсаторов, силовые условия для процесса шлифования, из условий обеспечения требуемого допуска плоскостности, ограничивающих величину максимальных упругих деформаций.

В работах Носенко В.А., Тышкевича В.Н., Орлова С.В. разработаны методики и алгоритмы обеспечения требуемого качества обработанной поверхности путём управления упругим деформированием заготовки при плоском шлифовании торцов подшипниковых колец малой осевой жёсткости.

Недостаточно исследованы упругие деформации при плоском шлифовании призматических заготовок направляющих линейных подшипников, учитывающие контактное взаимодействие поверхностей заготовки и стола станка, под действием магнитного поля стола и усилия резания из-за сложности моделирования контактного взаимодействия поверхностей заготовки и стола станка.

При шлифовании деталей малой жёсткости необходимо учитывать упругие деформации заготовки, возникающие от действия магнитного поля стола станка и усилий резания. Учет упругих деформаций позволит гарантированно достигнуть геометрическую точность детали, снизить временные и стоимостные затраты на обработку. Тем не менее, данный вопрос при шлифовании призматических направляющих линейных подшипников малой жёсткости с ограничением упругих деформаций заготовки при закреплении и обработке исследован недостаточно.

В этой связи представляет научную и практическую значимость исследование влияния упругой деформации, возникающей при закреплении и шлифовании призматических направляющих линейных подшипников малой жёсткости, на обеспечение требуемой геометрической точности обработанной поверхности.

**Целью работы** является повышение эффективности процесса плоского шлифования заготовок малой жёсткости направляющих линейных подшипников путем определения условий обработки, обеспечивающих требуемый допуск плоскостности, с учетом сил резания и закрепления, изменения жесткости заготовки, контактных деформаций.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать математическую модель максимальных упругих деформаций заготовки с учетом сил резания, притяжения магнитного поля стола, контактных деформаций, формы поперечного сечения и изменения жесткости заготовки за счет использования компенсаторов;
- разработать алгоритм выбора оптимальных условий процесса шлифования, обеспечивающих требуемое качество, в том числе, допуск плоскостности обработанной поверхности заготовок малой жесткости;
- разработать методику выбора оптимальных условий плоского шлифования боковых граней призматических направляющих линейных подшипников малой жёсткости, обеспечивающих требуемое качество, в том числе, допуск плоскостности обработанной поверхности;
- апробировать и внедрить результаты исследований.

## **Научная новизна**

Определено совокупное влияние формы и размеров поперечного сечения, длины заготовки направляющих линейных подшипников малой жесткости, силовых факторов (веса заготовки, магнитного притяжения стола станка, силы резания), количества опорных контактов поверхностей заготовки и стола станка, изменения изгибной жесткости заготовки при использовании компенсаторов и контактной деформации на величину максимальной упругой деформации заготовки. Разработана математическая модель, отражающая взаимосвязь максимальной упругой деформации заготовок направляющих линейных подшипников малой жесткости с геометрическими размерами заготовки, силовыми факторами, действующими на заготовку при закреплении и шлифовании, количеством опорных контактов поверхностей заготовки и стола станка, изменения изгибной жесткости заготовки при использовании компенсаторов и контактной деформации.

Определено влияние максимальной упругой деформации призматических заготовок малой жесткости на допуск плоскостности обработанной поверхности с учетом геометрических и технологических условий плоского шлифования.

Разработана математическая модель и алгоритм для определения оптимальных условий плоского шлифования боковых граней призматических направляющих линейных подшипников малой жёсткости из условия наибольшей производительности обработки, обеспечивающей требуемое качество и точность изделий.

**Теоретическая значимость работы** состоит в разработке алгоритма выбора оптимальных условий плоского шлифования, обеспечивающих достижение требуемого качества, в том числе, допуска плоскостности обработанной поверхности боковых граней призматических направляющих линейных подшипников малой жёсткости при наибольшей производительности процесса плоского шлифования.

**Практическая значимость работы** заключается в

- разработке и передаче филиалу ОАО «ЕПК Самара» в г. Волжский методики выбора оптимальных условий плоского шлифования боковых граней призматических направляющих линейных подшипников малой жёсткости.



матических направляющих линейных подшипников малой жёсткости с учетом влияния упругого деформирования заготовки при закреплении и обработке с ожидаемым экономическим эффектом при внедрении 300 тыс. рублей.

- внедрении результатов работы в учебный процесс по направлению 15.03.05 – Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительного производства при преподавании дисциплин «Технология шлифования» в Волжском политехническом институте (филиале) ВолГТУ.

**Методы исследований.** Методологической основой исследования служат основные положения теории резания металлов, сопротивления материалов, теории математической статистики, теории планирования эксперимента, оптимизации. При проверке адекватности моделей применены методы, базирующиеся на экспериментальной проверке результатов моделирования в лабораторных условиях.

Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях с использованием современного оборудования и измерительной техники.

**Объектом настоящего исследования** является плоское врезное шлифование боковых граней призматических заготовок малой жёсткости.

**Предметом исследования** является процесс упругого деформирования и обеспечение требуемого качества, в том числе, допуска плоскостности обработанных поверхностей боковых граней призматических заготовок малой жёсткости при плоском шлифовании.

**На защиту выносятся:**

- математическая модель максимальной упругой деформации призматической заготовки малой жесткости, основанная на теории изгиба балок, учитывающая: совокупность силовых факторов (силу резания, силу притяжения магнитного поля стола станка, собственный вес заготовки); количество опорных контактов соприкасающихся поверхностей заготовки и стола станка; форму поперечного сечения; увеличение изгибной жесткости заготовки при использовании компенсаторов; контактную деформацию поверхностей;

- алгоритм и методика выбора оптимальных условий плоского шлифования,

обеспечивающих достижение требуемого качества, в том числе, допуска плоскостности обработанной поверхности боковых граней призматических направляющих линейных подшипников малой жёсткости при наибольшей производительности процесса плоского шлифования.

**Достоверность результатов** обеспечена обоснованным использованием теоретических зависимостей, допущений и ограничений, корректностью выбранных методов исследования и согласованностью математической модели, алгоритма выбора условий шлифования и разработанной методики с результатами экспериментов.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Разработаны и переданы филиалу ОАО «ЕПК Самара» в г. Волжский

1) методика выбора оптимальных условий плоского шлифования, обеспечивающих требуемый допуск плоскостности обработанной поверхности боковых граней призматических направляющих линейных подшипников малой жёсткости при наибольшей производительности процесса с учетом упругого деформирования заготовки при закреплении и обработке;

2) рекомендации по определению условий, обеспечивающих возможность устранения отклонений от плоскостности боковых граней призматических направляющих линейных подшипников малой жёсткости шлифованием.

Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения результатов составляет 300 тыс. р. (Приложение А, В).

Результаты работы внедрены в учебный процесс по направлению «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» при преподавании дисциплины «Технология шлифования» в Волжском политехническом институте (филиале) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (Приложение Б).

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на Междунар. науч.-технич. конференциях: «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (Севастополь-2015, 2016, 2019, 2020 г.г.); 3-ей, 4-й

«Пром-Инжиниринг» (Санкт-Петербург, 2017, 2018 г.г.); IX-ой «Инновационные технологии в машиностроении: от проектирования к производству конкурентоспособной продукции (ТМ-2017)» (г. Волгоград, 2017 г.); Всерос. науч.-техн. конф. «Лучшие технологические школы России» (г. Рыбинск, 2017 г.); X-ой Всерос. конф. «Инновационные технологии в обучении и производстве» (г. Камышин, 2015 г.); XII-XIV Межрег. науч.-практ. конф. «Взаимодействие вузов и промышленных предприятий для эффективного развития инновационной деятельности» (г. Волжский, 2012-2019 г.); XIV - XVII науч.- практич. конф. ППС ВПИ (филиал) ВолгГТУ (г. Волжский, 2015 - 2019 г.); объединённом семинаре кафедр «Механики» и «Технологии и оборудования машиностроительных производств» ВПИ (филиал) ВолгГТУ (09.2020 г.).

**Публикации.** Результаты диссертационной работы опубликованы в 23 печатных работах и включают 5 статей из Перечня ВАК, в том числе, 1 патент РФ, 7 публикаций в сборниках научных трудов международных и всероссийских конференций и 8 статей в иных изданиях. Четыре статьи опубликованы в изданиях, индексируемых в базах *Scopus* и *Web of Science*.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, содержащего 169 наименований, приложений. Работа содержит 35 рисунков и 22 таблицы. Общий объем работы – 156 страниц, включая приложения объемом 22 страницы.

## 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

### 1.1. Конструктивные особенности направляющих линейных подшипников. Требования к геометрическим параметрам

Современные технологические процессы требуют комплексного перемещения по трем координатам с несколькими осями вращения, подразумевающего точное позиционирование с управлением пространственным перемещением, в том числе линейным. Узлы машин и механизмов, обеспечивающие поступательное движение, называют линейными направляющими, линейными перемещениями, системами линейного перемещения, линейными подшипниками [169], модулями линейного перемещения [38].

Направляющие, используемые для осуществления линейного перемещения подвижных узлов различных машин или устройств, являются одним из основных элементов конструкции, определяющим возможности и технический уровень оборудования [79].

Основные области применения линейных направляющих и подшипников – это станки для обработки металлов резанием и давлением, измерительная аппаратура, погрузочное оборудование, промышленные системы хранения, медицинская техника.

Наиболее широко в настоящее время используются направляющие качения модульного типа, которые состоят из профильных направляющих и кареток (рисунк 1.1). Каретки перемещаются по направляющим и тем самым реализуют необходимое перемещение. Данные направляющие имеют ряд существенных преимуществ, обеспечивающих их широкое распространение:

- высокий уровень эксплуатационных характеристик;
- не высокая стоимость;
- отработанная и широко распространенная технология производства [38, 79].

Зарубежные производители линейных подшипников: *SKF* (Швеция), *TIMKEN* (США); *NSK*, *NTN*, *KOYO*, *IKO*, *THK* (Япония); *SNR* (Франция), *BAHR*,

*FAG*, *INA*, *STIEBER*, *GMN*, *BOSCH-REXROTH*, *Schneeberger* (Швейцария/Германия), *FERSA* (Испания), *Rollon*, *Rosa Sistemi* (Италия). В России линейные направляющие качения, по своим характеристикам и размерам взаимозаменяемые с аналогами фирм «*INA*», «*Schneeberger*» - Германия, «*THK*» - Япония, изготавливает ЗАО "ЛИПЕЦКИЙ СТАНКОЗАВОД "Возрождение"", филиал ОАО «ЕПК Самара» в г. Волжском.

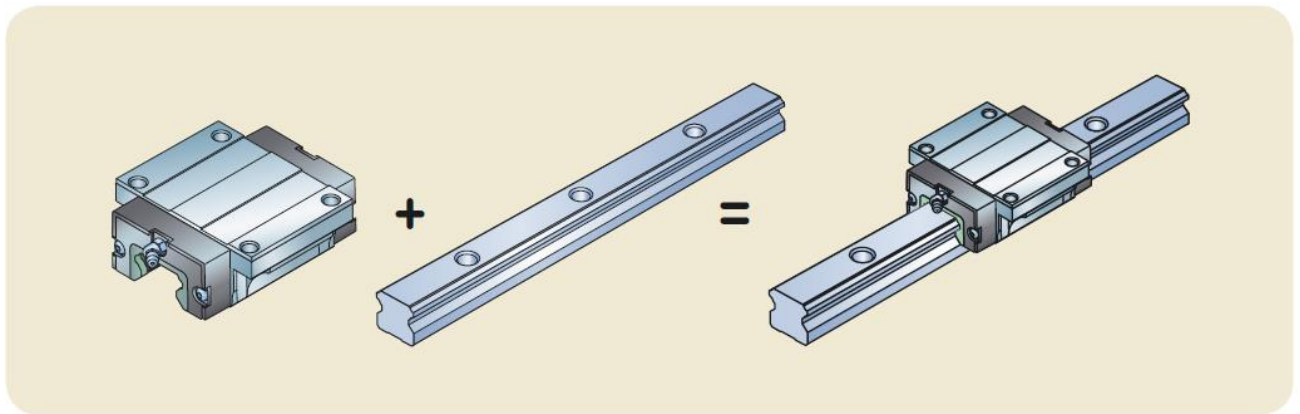


Рисунок 1.1 – Линейный подшипник модульного типа [71]

Использование направляющих в станках обеспечивает [79]:

- в сочетании с системой ЧПУ - точность позиционирования до 0,1 мкм при достаточно высокой жесткости привода;
- малые энергозатраты;
- высокую ремонтоспособность.

В конструкции линейных подшипников можно выделить два типа компонентов. То, что движется – шариковая каретка, роликовая каретка, роликовый, игольчатый или шариковый сепаратор. И то, по чему движется – направляющая, рельс (см. рисунок 1.1).

В настоящее время разработано множество различных видов и серий линейных подшипников для удовлетворения разнообразных потребностей различных отраслей промышленности. Линейные подшипники выпускаются во множестве типов и размеров. При их выборе следует принимать во внимание требования по нагрузке, скорости, ресурсу, жесткости и точности, особенности конструкции оборудования и ограничения при установке.

По типу используемых тел качения линейные подшипники можно разделить на две группы: шариковые (рисунок 1.2, *а*) и роликовые (рисунок 1.2, *б*).

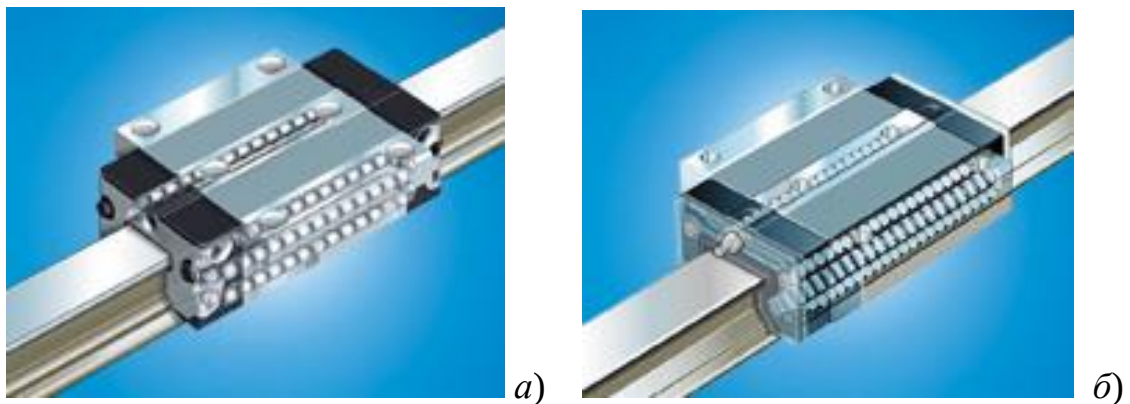


Рисунок 1.2 – Шариковая (*а*) и роликовая (*б*) профильные направляющие [168]

Роликовые направляющие имеют более высокие жёсткость и грузоподъемность. Кроме того, характеристики модульных направляющих значительно зависят от количества рядов тел качения и расположения тел качения. Используется четное количество рядов и варьируется в количестве от 2 до 6. Расположения тел качения может быть реализовано в виде схемы «X» или схемы «О» (рисунок 1.3) [79].

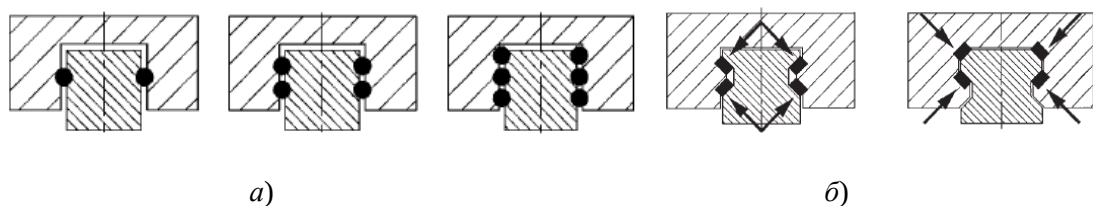


Рисунок 1.3 – Исполнение направляющих качения модульного типа  
*а*) различное количество рядов тел качения, *б*) различные схемы расположения тел качения

Прецизионные рельсовые направляющие нашли широкое применение в станкостроении. Они состоят из пары направляющих рельсов с сепаратором с элементами качения (рисунок 1.4) [169].

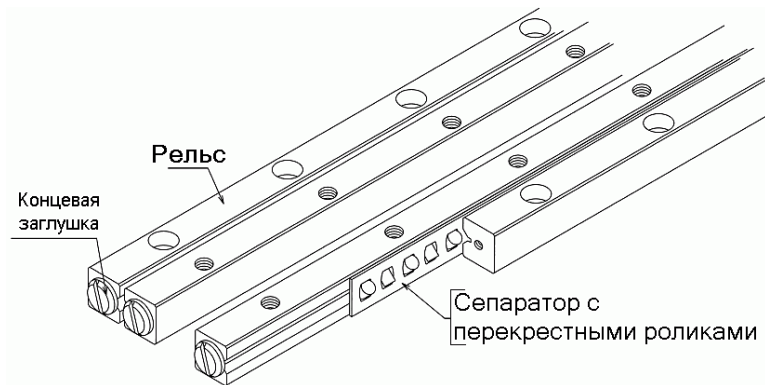


Рисунок 1.4 – Прецизионные рельсовые направляющие [168]

Поскольку данный тип направляющих не оснащен системой рециркуляции элементов качения, то сопротивление трением здесь ниже, однако ход таких направляющих ограничен длинами рельсов и сепаратора. Примеры готовой однокоординатной системы (рисунок 1.5, *а*) и схемы монтажа (рисунок 1.5, *б*) [168].

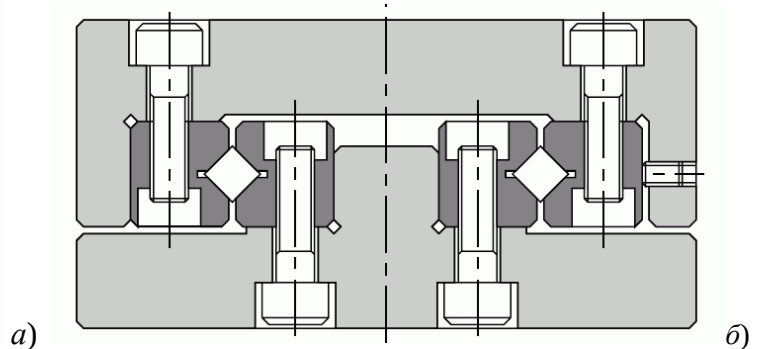


Рисунок 1.5 - Пример готовой однокоординатной системы (*а*) и схема монтажа (рисунок 5, *б*) [168]

Прецизионные рельсовые направляющие характеризуются [168]:

- высокой точностью;
- высокой скоростью работы;
- малым трением;
- малым уровнем тепловыделения;
- износостойкостью и высокой надежностью;
- высокой жесткостью;
- большой грузоподъемностью;

- ограниченным ходом.

Основные типы прецизионных рельсовых направляющих:

1. Прецизионные рельсовые направляющие с шариками или перекрестными роликами - хорошо зарекомендовавшие себя недорогие системы, использующиеся для решения широкого круга инженерных задач (рисунок 1.6, а).



а)



б)

Рисунок 1.6 - Прецизионные рельсовые направляющие с шариками или перекрестными роликами (а), прецизионные рельсовые направляющие с игольчатыми сепараторами (б) [168]

2. Прецизионные рельсовые направляющие с игольчатыми сепараторами характеризуются высокими грузоподъемностью и жесткостью (рисунок 1.6, б) [168].

Требования, предъявляемые к направляющим линейных подшипников [38]:

- точность изготовления;
- долговечность;
- достаточная жёсткость;
- высокие амортизирующие свойства;
- высокая чистота рабочих поверхностей;
- простота конструкции;
- возможность регулирования зазора-натяга.

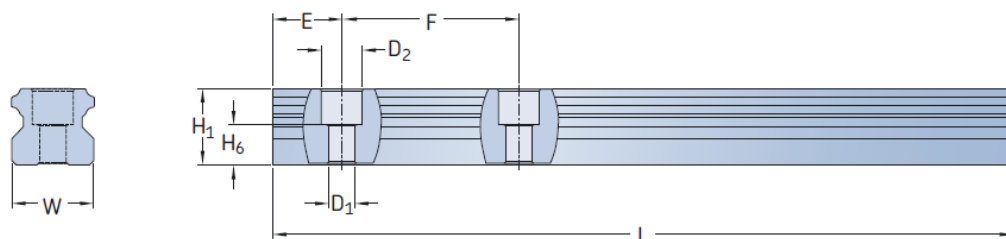
Материалы для изготовления направляющих: стали ШХ9, ШХ15, ШХ15СГ с объёмной закалкой до твёрдости HRCэ 60...62, стали 20Х, 18ХГТ с цементацией (0,8...1,0 мм) [38].



Шероховатость поверхностей направляющих должна быть не грубее  $Ra = 0,16 \dots 2,5$  мкм в зависимости от размеров и класса точности станка [38].

На примере продукции фирмы *SKF* на рисунке 1.7 показаны типоразмеры профильных рельсовых направляющих.

#### Рельсовые направляющие LLTHR

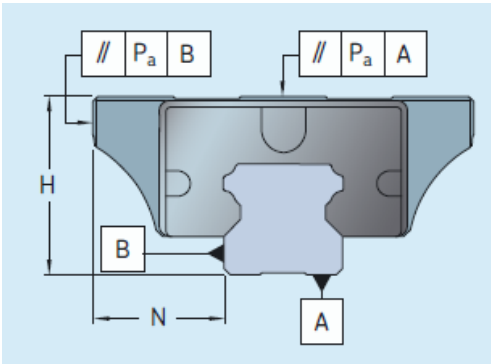


| Типоразмер | Размеры |                |                |                |                |                           |                           |     |                          | Вес  |
|------------|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------------|---------------------------|-----|--------------------------|------|
|            | W       | H <sub>1</sub> | H <sub>6</sub> | D <sub>1</sub> | D <sub>2</sub> | E <sub>min</sub><br>-0.75 | E <sub>max</sub><br>-0.75 | F   | L <sub>max</sub><br>-1.5 |      |
| —          | мм      |                |                |                |                |                           |                           |     |                          | кг/м |
| 15         | 15      | 14             | 8,5            | 4,5            | 7,5            | 10                        | 50                        | 60  | 3 920                    | 1,4  |
| 20         | 20      | 18             | 9,3            | 6              | 9,5            | 10                        | 50                        | 60  | 3 920                    | 2,3  |
| 25         | 23      | 22             | 12,3           | 7              | 11             | 10                        | 50                        | 60  | 3 920                    | 3,3  |
| 30         | 28      | 26             | 13,8           | 9              | 14             | 12                        | 70                        | 80  | 3 944                    | 4,8  |
| 35         | 34      | 29             | 17             | 9              | 14             | 12                        | 70                        | 80  | 3 944                    | 6,6  |
| 45         | 45      | 38             | 20,8           | 14             | 20             | 16                        | 90                        | 105 | 3 917                    | 11,3 |

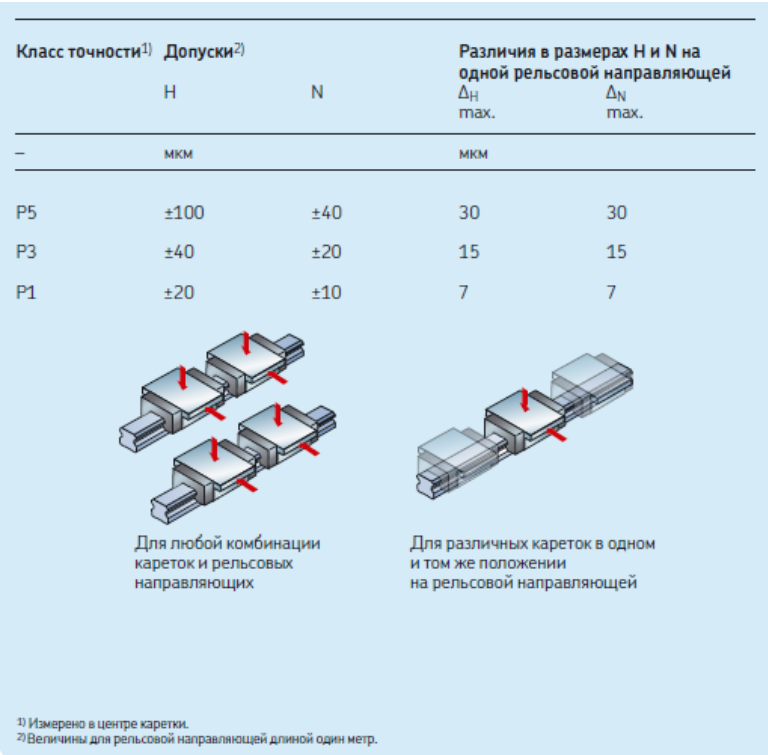
Рисунок 1.7 – Размеры и веса рельсовых направляющих LLTHR [71]

Компания *SKF* производит профильные рельсовые направляющие *LLT* трёх классов точности. Выбор класса точности определяет точность позиционирования системы рельсовых направляющих в механизме.

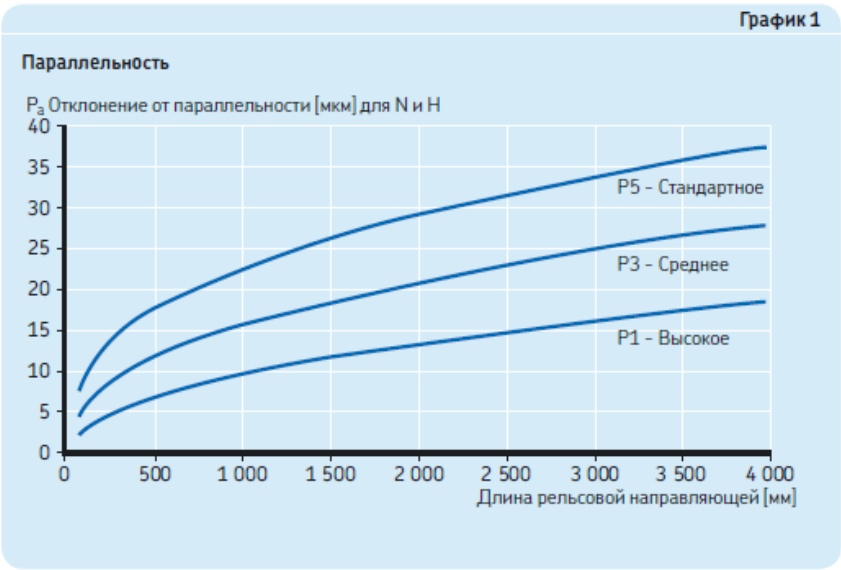
Точность по размеру  $N$  (рисунок 1.8, *a*) означает наибольшее отклонение боковой стороны направляющей каретки и в продольном направлении.  $H$  - точность по размеру по высоте, которая измеряется между нижней поверхностью основания направляющей и установочной поверхностью каретки.  $H$  и  $N$  – средние арифметические значения, измеряемые по центру каретки. Их измерение для  $\Delta H$  или  $\Delta N$  производится в одном и том же положении на рельсовой направляющей [71].



а)



б)



в)

Рисунок 1.8 – Требования к точности изготовления направляющих [71]

Допуск параллельности между двумя плоскостями рельсовой направляющей и каретки при перемещении каретки по всей длине направляющей [71]; при этом рельсовая направляющая фиксируется винтами на контрольной плоскости (рисунок 1.8, б). График зависимости отклонения от параллельности от длины направляющей для различных степеней точности представлен на рисунке 1.8, в.

Существует возможность использования кареток и направляющих в различных комбинациях внутри одного и того же типоразмера и класса точности ( $P5/P3$ ) без ухудшения исходного класса точности. Существует также возможность комбинации различных классов точности.

Высокие требования к геометрической точности боковых граней призматических направляющих определяют технологические сложности их изготовления.

При механической обработке заготовок малой жёсткости данных деталей возникают упругие деформации от сил резания и закрепления. После окончания процесса шлифования и снятия магнитного поля стола станка упругие деформации возвращают определённую величину отклонения геометрическим параметрам, которые могут превышать заданные требования.

## **1.2. Особенности механической обработки заготовок малой жёсткости и обеспечения точности геометрических параметров обработанных поверхностей**

### **1.2.1. Особенности образования погрешностей при механической обработке заготовок малой жёсткости и обеспечения точности геометрических параметров обработанных поверхностей**

Под точностью механической обработки понимают степень соответствия обработанной детали её геометрически правильному прототипу (чертежу) или образцу [27].

Обеспечение идеального соответствия практически невозможно. Таким образом, использование размерных допусков означает осознанный отказ от достижения абсолютных размеров. Простановкой допусков на размер регламентируются допустимые отклонения от номинальных размеров, которые подразумевают некоторые различия между деталями, изготовленными в одной и той же партии [27].

Допуск или допустимая погрешность определяет диапазон, в пределах которого обрабатываемая деталь может отклоняться от её идеального образца, это

разность между максимальным и минимальным значениями размера или другого геометрического параметра [27].

Погрешность обработки – это отклонение полученного при обработке значения геометрического параметра от его заданного значения или отклонение обрабатываемой поверхности детали от её геометрически правильного прототипа [27].

Исходя из допустимых отклонений эксплуатационных показателей детали, назначают функциональные допуски [27].

Назначение конструкторских допусков на деталь является обязанностью конструктора. Конструктор должен проанализировать условия работы детали в узле или сборочной единице, служебное назначение детали. [27].

Назначение допусков на заготовки является обязанностью технолога. Технологический процесс должен быть реализован таким образом, чтобы значения технологических допусков были меньше или равны конструкторским допускам [27].

Назначение технологических допусков тесно связано с технологией изготовления детали, погрешностями, возникающими при механической обработке.

В данном исследовании рассматриваются причины и условия возникновения погрешностей, обусловленных упругими деформациями заготовок деталей малой жёсткости при закреплении и обработке; исследуются методы уменьшения погрешностей до минимально достижимых значений. Это позволяет наметить пути повышения точности механической обработки и определить конкретные рекомендации по рациональному построению технологического процесса с учетом наибольшей производительности и наименьшей стоимости [27].

Повышение точности обработки обеспечивает экономию материала за счёт уменьшения межоперационных припусков, снижения трудоемкости технологического процесса изготовления данной детали, которые могут быть достигнуты в результате более точного выполнения заготовок. В этом случае технологический процесс изготовления сокращается за счет исключения определенных операций

черновой или чистовой обработки. При этом существенно уменьшается общий припуск на обработку поверхностей изготавливаемых деталей.

Точность геометрических параметров включает в себя точность размеров, точность формы и точность взаимного расположения поверхностей детали.

Точность размеров различных поверхностей детали определяется размерными допусками, установленными на рабочем чертеже детали.

Точность формы поверхностей – это степень соответствия поверхностей их геометрически правильным прототипам [27].

Допустимая величина искажения формы поверхности задается частью допуска на её размер.

Точность деталей оценивается также и отклонениями расположения поверхностей.

Общая погрешность механической обработки является следствием ряда технологических факторов.

Из всего комплекса факторов особую роль играют погрешности, обусловленные упругими деформациями технологической системы от действия усилий закрепления и резания. В источнике [27] выделяются следующие основные этапы их возникновения.

Первый этап – установка и закрепление заготовки в приспособлении или на столе станка. Под действием усилий зажима (или магнитного поля стола станка) происходит деформация заготовки, элементов приспособления и станка (если усилие передаются через узлы станка).

При закреплении жёстких, массивных заготовок деформируются главным образом поверхностные слои в местах контакта. Эти деформации, а также деформации элементов приспособления (станка) могут вызвать изменение положения установленной заготовки.

При закреплении заготовок, наряду с их вероятным смещением от желаемого положения, происходит деформация обрабатываемых поверхностей. В этом случае обрабатываемые поверхности получают искажение формы, вызванные силами закрепления.

Величина получаемой погрешности зависит от величины усилий закрепления, характера их приложения. Изменением этих условий искажение формы может быть доведено до желаемого минимума.

Второй этап – механическая обработка установленной и закрепленной в приспособлении или на магнитном столе станка заготовки. Действие усилия резания приводит к деформации элементов технологической системы.

Усилия резания имеют переменную величину и направление, а также точку приложения. Следствием вышесказанного является то, что происходит постоянное изменение величины деформации элементов технологической системы, искажение размера и формы обрабатываемой поверхности. Также причиной изменения деформации, является изменение жесткости элементов технологической системы на различных участках заготовки при ее обработке.

При обработке жёстких заготовок, имеющих значительную массу искажение размера и формы, является результатом постоянного изменения расположения режущего инструмента по отношению к заготовке, вследствие чего нарушается требуемый закон относительного движения инструмента и заготовки.

При обработке заготовок малой жёсткости искажение формы обработанной поверхности связано с упругим деформированием самой заготовки. Величина искажения зависит от величины усилия резания. Искажение формы может быть ограничено необходимым минимумом за счет снижением режимных параметров механической обработки.

Третий этап – раскрепление и снятие заготовки со стола станка. В результате чего упругие деформации возвращают элементы приспособления и станка в исходное состояние, заготовка же может вернуть определенную часть отклонения формы [27].

При обработке жёстких заготовок, имеющих значительную массу, упругая деформация под влиянием усилий закрепления и упругое восстановление после раскрепления заготовки незначительны. Таким образом, дополнительные погрешности, возникающие при раскреплении заготовки также незначительны, и заготовка не меняет полученные при обработке размеры и форму.

При обработке нежесткой заготовки возникают значительные деформации при ее закреплении, которые при раскреплении заготовки вызывают дополнительное искажение формы уже обработанной поверхности.

При разработке технологических процессов рекомендуется использовать пределы точности, которая может быть получена при различных методах обработки, приведённые в таблицах [3, 105].

Термины и определения, относящиеся к основным видам отклонений и допусков формы и расположения поверхностей деталей машин и приборов, определены в ГОСТ 24642-81. Данный стандарт (в части терминологии) соответствует международным стандартам ИСО 1101-83 и ИСО 5459-81. ГОСТ 26643-81 определяет числовые значения допусков формы и расположения поверхностей, рекомендуемые соотношения между допусками формы и расположения и допуском размера.

### **1.2.2. Анализ геометрических параметров, классификация деталей малой жесткости**

Жесткость - один из важнейших критериев работоспособности машин. Кроме того, данный параметр значительно влияет на формировании точности и качества поверхности деталей при их изготовлении [27, 43, 68, 91-93, 96, 121, 162]. Жёсткостью называют способность деталей сопротивляться изменению формы под действием сил [77].

Значительное место среди многообразия деталей, обрабатываемых на металлорежущих станках, занимают детали, которые при заданной форме и размерах имеют малую жёсткость [27, 68].

При закреплении и обработке таких деталей возникают значительные упругие деформации. По окончании процесса резания и раскрепления заготовки, данные деформации могут «вернуть» определенную часть допуска формы обработанной поверхности.

Большое разнообразие деталей малой жёсткости по геометрической форме, размерам, материалу, назначению, виду механической обработки исключает возможность исследования и описания особенностей обработки всех этих деталей.

В источнике [68] детали малой жесткости разделяются на детали, относящиеся к телам вращения и плоские детали. Причем первые занимают более трети всего объема деталей машин. К нежестким относятся валы, жесткость которых значительно меньше жесткости технологической системы. Валы, отношение длины  $L$  к диаметру  $D$  ( $L/D > 12$ ) которых относятся к нежестким [13].

По ГОСТ Р 55145-2012 нежёсткая деталь (*non-rigid part*) – деталь, деформации которой в свободном состоянии превышают указанные на чертеже размерные и/или геометрические допуски. Свободное состояние (*free state*) – состояние, при котором на деталь воздействует только сила тяжести.

В данном исследовании рассмотрены вопросы плоского шлифования призматических заготовок малой жёсткости направляющих линейных подшипников, геометрические параметры которых позволяют использовать теорию изгиба балок при математическом моделировании упругих деформаций.

### 1.2.3. Особенности механической обработки деталей малой жёсткости

Анализ научных публикаций, посвященных исследованию процесса механической обработки деталей малой жёсткости [2, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 18, 19, 24, 26, 40, 43, 47, 53, 59 - 59, 66, 68, 82, 90, 116, 119, 147, 155, 162, 164] выявил следующие их производства:

- Под воздействием сил резания, закрепления и инерции в обрабатываемой заготовке возникают значительные упругие и пластические деформации, которые в свою очередь приводят к возникновению чрезмерных статических прогибов [8, 162].

- При механической обработке и закреплении деталей малой жёсткости возникают упругие деформации. Величина данных деформаций может достигать одного порядка с допускаемыми значениями отклонений на геометрические параметры обработанной поверхности. После обработки и открепления заготовки



упругие деформации возвращают определённую величину отклонения геометрическим параметрам, которые могут превышать заданные требования к обработанной поверхности [2, 10, 11, 13, 24, 26, 40, 43, 53, 56 - 59, 66, 116, 119, 147, 164].

– Малая жесткость обрабатываемой заготовки приводит к повышению податливости всей системы СПИЗ (станок – приспособление – инструмент - заготовка), что приводит к значительным трудностям изготовления деталей малой жесткости. Происходит не только деформация детали в процессе обработки, но также и возникновение вибраций, что негативно сказывается на стойкости и долговечности инструмента [81, 139], может являться причиной увеличения брака [68, 85], снижения срока службы оборудования и режущего инструмента [8].

Таким образом, оптимизация технологических процессов обработки деталей малой жёсткости является важной задачей, позволяющей увеличить эффективность производства и качество продукции машиностроения, снижающей износ оборудования и режущего инструмента [68].

Анализ публикаций по проблемам изготовления деталей малой жёсткости выявил значительное внимание исследователей к достижению геометрической точности нежестких валов. Необходимые рекомендации базируются на разработках Подпоркина В.Г., Корсакова В.С., Соколовского А.П., Колева К.С., Васильевых С.Л., Драчева О.И., *Swic A., Taranenko W.* и других ученых.

В работе [25] предложены методы расчета погрешности изготовления валов малой жесткости с учетом динамических факторов, влияющих на процесс изготовления. Исследования качества, точности обработки нежестких валов, колец малой жёсткости в радиальном направлении подробно описаны в источниках [27, 68, 85]. В работе [5] исследованы возможности обеспечения точности при фрезеровании нежестких деталей. В источниках [6, 7] произведено исследование виброустойчивости при токарной обработке валов малой жесткости, разработаны математические и графические модели процесса формообразования. В работе [162] предложен метод адаптивного управления упругими деформациями при механической обработке валов малой жесткости. В источниках [19, 162] исследован процесс шлифования валов малой жесткости, выявлено, что увеличение числа

проходов приводит к росту погрешности формы. Также выявлено влияние подачи на величину остаточных напряжений.

В работе [7] представлено решение задачи повышения интенсивности процессов механической обработки за счет достижения при минимальном припуске и высокой скорости резания заданных требований к точности детали. Условия обработки согласуются с упругими деформациями заготовки, позволяют достичь требуемого качества обработанных поверхностей.

Традиционно для обеспечения точности изготовления деталей малой жесткости при токарной обработке [106] используются люнеты. При этом отсутствие математических моделей расчета радиальной составляющей силы резания может привести к серьезным ошибкам в определении деформации деталей малой жесткости. Вышеописанные ошибки могут негативно сказаться на выборе схемы закрепления и в конечном результате привести к снижению точности обработки. В случае применения станков с ЧПУ необходимо стремиться к упрощению схемы закрепления насколько это возможно, препятствием к чему может служить отсутствию вышеуказанных математических моделей [67].

В работах А.А. Жданова, А.Л. Плотникова, Ю.Л. Чигиринского, И.В. Фирсова [36, 67, 104] предлагается методика обеспечения точности токарной обработки деталей малой жесткости при помощи постоянного оперативного определения величины прогиба детали малой жесткости. Определение прогиба осуществляется в результате определения величины термо ЭДС контактной пары инструмент-заготовка. Данная методика позволяет снизить погрешность расчета величины радиальной составляющей силы резания до 10–15 %, а, следовательно, значительно увеличить точность расчетов величины прогиба заготовки малой жесткости. Также данная методика позволяет оперативно изменять подачу в процессе обработки через определенный шаг и за счет этого увеличивать производительность обработки.

В работе [127] исследованы факторы, влияющие на образование отклонения бочкообразности при токарной обработке заготовок малой жесткости. Выявлено,

что наибольшее влияние оказывают сила резания, отношение диаметра заготовки к длине обрабатываемой поверхности и глубина резания.

Обеспечение требуемой точности формы и размеров обработанных деталей типа нежесткий вал и сохранение достигнутой точности во времени путем автоматического управления процессом резания при токарной обработке на станках с ЧПУ рассматривается в работах [124, 125].

Особенности механической обработки заготовок малой жёсткости исследованы в работах [5, 118, 133, 138, 155]. Уменьшения влияния упругой деформации обрабатываемой заготовки достигалось с использованием оптимизации условий резания, механизма, компенсирующего деформации и вибрации заготовки, устройства закрепления детали [5, 155].

В статье [161] рассматривается влияние динамических характеристик упругой системы машины на качество обрабатываемой поверхности при точении. Приведены закономерности формирования поверхностной волнистости в зависимости от частоты колебаний и динамических характеристик упругой системы.

В работе [118] выполнено моделирование деформации пера лопатки под действием силы резания, возникающей в процессе фрезерования на станке с ЧПУ, в приложении *NX* «Расширенная симуляция». Установлено, что значение деформации существенно зависит от местоположения рассматриваемой площадки относительно входной и выходной кромок пера, хвостовика и бандажной полки. Результаты моделирования могут быть использованы для компенсации погрешности формы за счет изменения траектории инструмента посредством коррекции управляющей программы станка с ЧПУ.

В статье [22] отражены исследования нежесткой технологической системы при торцовом фрезеровании инструментом с переменным шагом зубьев. Повышение производительности при фрезеровании нежестких заготовок возможно при обоснованной интенсификации режимов обработки. Недостаточная жесткость технологических систем в этом случае может создать предпосылки к возникновению автоколебаний, которые в свою очередь могут привести к снижению стойкости инструмента, качественных показателей обработки, долговечности техноло-

гического оборудования. В данной работе [22] также изучен опыт использования режущего инструмента с переменным окружным шагом зубьев. В результате анализа исследований доказана возможность гашения автоколебаний при торцовом фрезеровании нежестких заготовок. Гашение осуществляется за счет использования фрез с подобранными определенным образом, чередующимися по величине шагов зубьями, разность которых соответствует половине длины волны колебаний.

Особенности плоского шлифования деталей малой жёсткости исследованы в работах Хусаинова А.Ш., Солера Я.И. и др.

В источнике [86] исследовался процесс шлифования деталей из стали 12Х18Н10Т. Робастное проектирование процесса шлифования плоских деталей с различной жесткостью из сталей ВНС-5, Р9М4К8 кругами из нитрида бора выполнено в источниках [98, 101]. В работе [88] выявлено, что модели, полученные при использовании смешанного плана эксперимента, более точно описывают процесс шлифования деталей малой жесткости из стали 13Х15Н4АМЗ высокопористыми абразивными кругами. Информационная база для управления качеством поверхности плоских деталей из стали ВНС-2, обработанных шлифованием представлена в источниках [87, 89, 90].

В работах [42, 99, 100, 158, 160], выполненных в лаборатории «Технология финишной обработки» ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» рассмотрена многопараметрическая оптимизация плоского шлифования инструментов из быстрорежущих сталей. Модели учитывают жесткость пластин из быстрореза. Модели включают в себя припуск на операции и жесткость инструментов. Для снижения влияния податливости заготовок на качество обработки предлагается располагать заготовку таким образом, чтобы наименьшие деформации возникали в продольном направлении.

В работах [30, 44, 94, 95, 159] исследуется процесс плоского шлифования деталей переменной жесткости только из высокопрочных коррозионно-стойких сталей. Определено влияние припусков на обработку и жесткости деталей на достижение требуемого качества и точности формы поверхностей при шлифовании. Проведена многопараметрическая оптимизация на основе моделей I МДА (мно-

гомерного дисперсионного анализа) для определения эффективных технологических параметров при шлифовании абсолютно жестких заготовок и заготовок переменной жесткости. В работе использованы модели нечеткой логики (НЛ) и нейронные сети (НС), позволяющие обрабатывать значительные объемы входных данных. Делается вывод о необходимости снижения поперечной и увеличения продольной жесткости [44].

В источниках [43, 91-93, 96, 97] производились исследования процесса плоского шлифования деталей из закалённых сталей различной жесткости с целью повышение качества и производительности процесса путем оптимизации технологических параметров. Получены с помощью дисперсионного анализа и нечеткой логики модели второго порядка, описывающие зависимости параметров качества обработанной поверхности от режимов резания и жесткости заготовки.

В результате исследований установлено, что для улучшения качества обработки заготовку необходимо располагать на столе так, чтобы меньшая жесткость детали соответствовала направлению поперечной подачи [43].

В статье [161] моделируется напряженно-деформированное состояние в структуре алмазно-абразивного инструмента в виде системы зерно-матрица при динамической силовой нагрузке. Для алмазного инструмента на твёрдосплавной матрице рассчитаны амплитудно-частотные характеристики и коэффициенты динамичности конструкции по перемещениям и напряжениям. Показано, что частоты вынужденных колебаний, связанных с эксплуатацией инструмента, значительно ниже частот собственных колебаний рассматриваемой системы.

В работах Тышкевича В.Н., Носенко В.А., Копецкого [26, 147] исследуется влияние упругих деформаций при токарной обработке на погрешность формы колец подшипников малой радиальной жёсткости. Уточнены математические модели упругих деформаций колец при закреплении их в трёх кулачковом патроне.

Для увеличения изгибной жесткости заготовок колец подшипников применяют заполнение зазоров между торцом кольца и поверхностью магнитного стола станка прокладками из битумированной или парафинированной бумаги опреде-

ленной толщины [73]. В работе Короткова Б. И. [65] с этой же целью предлагается использовать специальные стальные компенсаторы.

В работах Тышкевича В.Н., Носенко В.А., Орлова С.В. [2, 10, 11, 13, 23, 24, 40, 47, 53, 56 - 59, 116, 119, 164] исследуется плоское шлифование торцов подшипниковых колец малой осевой жёсткости. Разработаны алгоритм и методика обеспечения требуемого качества обработанной поверхности при максимальной производительности процесса путём управления упругим деформированием заготовки при закреплении и обработке.

### **1.3. Особенности процесса плоского шлифования деталей из закаленных легированных сталей. Подходы к моделированию и оптимизации процесса шлифования**

#### **1.3.1. Особенности процесса плоского шлифования деталей из закаленных легированных сталей**

Анализ исследований отечественные и зарубежные ученых, таких как Резницкий Л.М., Маслов Е.Н., Лобанов А.А., Старков В.К., Солер Я.И., *Klocke F.*, *Brinksmeier E.* и др. [30, 35, 75, 91, 93, 110, 138, 144, 146, 157] позволяет определить основные методы механической обработки закаленных легированных сталей. Ими являются лезвийные процессы (точение, фрезерование) и шлифование.

Все методы позволяют обеспечить необходимые требования к качеству обработанных поверхностей. Сравнение методов в полной и наглядной форме представлено в источнике [146]. Для наглядности предлагается диаграмма (рисунок 1.9).

Чем дальше какой-либо признак от центра многоугольника, тем данный признак лучше для рассматриваемого процесса. Как следует из представленного рисунка, шлифование выгодно отличается от лезвийных процессов по надежности процесса, качеству шероховатости поверхности и точности формы. Современные прогрессивные технологии в шлифовании позволили повысить скорость съема материала и гибкость процесса.

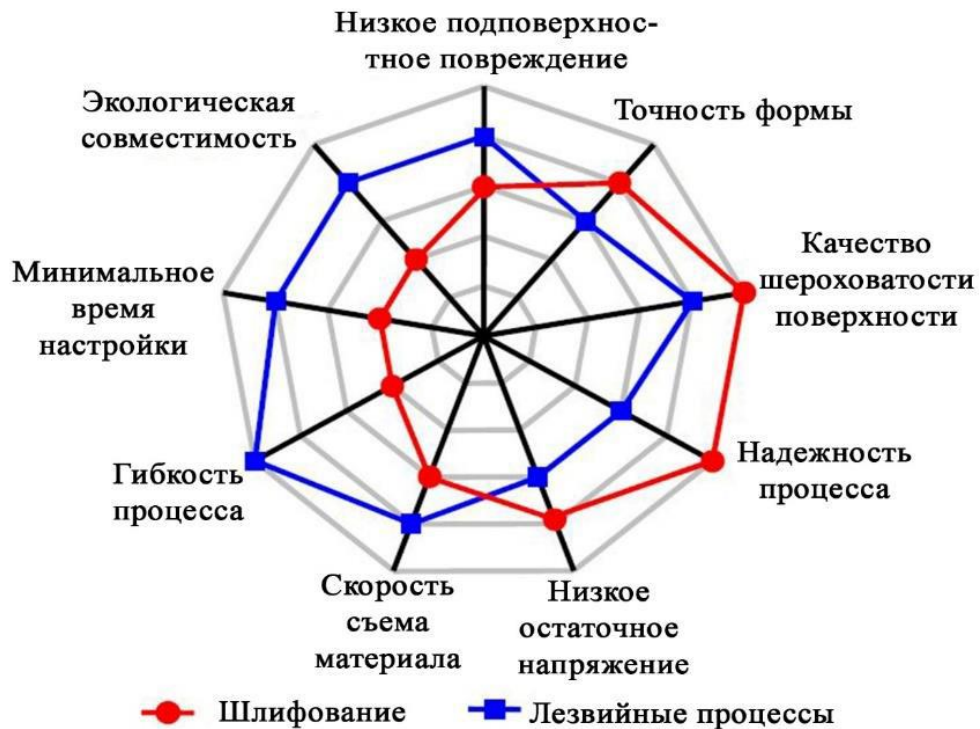


Рисунок 1.9– Сравнение возможностей лезвийных процессов обработки закаленных сталей и процесса шлифования [146]

В работе [121] производится сравнение процесса шлифования с другими видами механической обработки деталей.

Сопутствующие шлифованию пластическая деформация и работа трения приводят к разогреву материала заготовки в области контакта до высоких температур. В результате происходит размягчение металла, что облегчает процесс стружкообразования.

Процессы, происходящие при шлифовании, отличаются сложностью. Для повышения точности изготавливаемой детали в условиях серийного производства при изготовлении особо точных и ответственных деталей шлифование ведут периферией круга при возвратно-поступательном перемещении прямоугольного стола [121].

Исходя из вышеописанного, можно сделать вывод, что шлифование является значительно более сложным процессом для теоретического и экспериментального исследования, чем фрезерование и точение.

### 1.3.2. Показатели качества шлифованной поверхности

Совокупность геометрических характеристик обработанной поверхности и физико-механические состояния поверхностного слоя детали образуют такое понятие, как «качество поверхности» [75]. Геометрические характеристики поверхности разделяют на микрогеометрию и макрогеометрию. Микрогеометрия включает в себя волнистость, шероховатость и субшероховатость [111, 114]. Причиной изменения физико-механических свойств детали являются силовое и температурное воздействие шлифовального круга на поверхность детали в процессе обработки. Физико-механические свойства характеризуются микротвердостями, остаточными напряжениями, химическим составом, структурно-фазовым состоянием, прижогами и микротрещинами. Все перечисленные показатели определяют усталостную прочность, коррозионную стойкость, износостойкость и другие показатели [111].

### 1.3.3. Подходы к моделированию и оптимизации процесса шлифования

Основные подходы к моделированию механической обработки при шлифовании условно могут быть разделены на физические и эмпирические [43, 138].

Физические объединяют аналитические, конечно-элементные, кинематические, молекулярно-динамические модели.

Эмпирические объединяют регрессионные, нейронные и модели нечеткой логики [138].

Фундаментальным основанием для всех исследований в области машиностроения являются модели, полученные *Taylor F.W.* в 1880 г. для процесса металлообработки [163].

#### **Кинематические модели шлифования**

Для получения топографии шлифовального круга используют два метода. Первый метод заключается в непосредственном сканировании режущей поверхности шлифовального круга. Второй требует применения статистического анализа в результате, которого производится синтез топографии шлифовальных кругов.



Inasaki в своей работе [143] использовал первый метод. Отсканировав большое количество поверхностей шлифовальных кругов, автор выявил такие характеристики, как средние размеры зерен, степень их расположения на поверхности, высоты выступа зерен и т. д.

*Yoshikawa* и *Law* в своих исследованиях [149, 166] создали двумерную модель зерен, в результате чего, получили модель процесса шлифования и предсказать шероховатости или топологию поперечного сечения обработанной детали. Моделирование таких параметров, как шероховатость и профиль поверхности - основная цель базовых кинематических подходов [149].

Задачи контакта абразивного круга с обрабатываемой поверхностью заготовки позволяют решать кинематическо - геометрические трехмерные модели.

Решение аналогичных задач может быть реализовано с помощью кинематическо-эмпирического моделирования. Выходные параметры и в первом и во втором случае аналогичны. В первом случае рассматривается траектория движения между шлифовальным кругом и обрабатываемой заготовкой, а во втором используются как аналитические, так и эмпирические уравнения.

Кинематические модели описывают многие параметры процесса обработки шлифованием, при этом показывают достаточно низкую степень точности.

### **Моделирование процессов шлифования с использованием метода конечных элементов (МКЭ)**

МКЭ-модели делятся на два вида: макроскопические и микроскопические. Моделирование контакта одного зерна с локальной частью обрабатываемой заготовки производят с помощью микроскопического моделирования. Макроскопические модели применяются для расчета тепловыделения и остаточных напряжений в поверхностных слоях обрабатываемой заготовки. Для моделирования МКЭ требуется задать входные параметры (механические свойства обрабатываемой детали, коэффициент теплопроводности материала, геометрические характеристики обрабатываемой детали, технологические параметры, силы резания и т.д.). МКЭ-модели также позволяют учитывать особенности геометрии заготовок.

В работах [12, 122 и др.] разработаны и использованы модели, полученные методом конечных элементов. Недостатки данных моделей связаны с необходимостью использования высокопроизводительной вычислительной техники, использования специальных программ, значительными затратами времени для анализа процесса, особенно если необходимо задать большое количество входных факторов.

### **Искусственные нейронные модели**

Модели искусственной нейронной сети (ИНС) применяются для моделирования сложных, нестабильных процессов. Данное моделирование позволяет учесть значительное количество входных параметров.

Для моделей искусственной нейронной сети можно выделить ряд свойств.

1. Для создания модели искусственной нейронной сети используется процедура самообучения. При этом модели строятся автоматически [142].

2. Модели искусственной нейронной сети обрабатывают большой объем информации, полученный от не связанных между собой датчиков или физических процессов.

3. Существует возможность сочетать модели ИНС с физическими моделями, что приводит к повышению производительности процесса моделирования.

Таким образом, моделирование процессов обработки деталей шлифованием может быть реализовано с помощью модели ИНС [156].

Как следует из анализа публикаций, данный вид моделирования применяется для прогнозирования сил резания, шероховатости поверхности и других параметров процесса шлифования.

Преимущества моделей искусственной нейронной сети соответствуют их свойствам. В качестве недостатков можно выделить то, что модели сложно анализировать, так как они часто представляют из себя, скрытые и неявные функции и значительный размер баз входных данных [58].

### **Модели нечеткой логики**

Zadeh L.A. в 1965 г. ввел регулятор с нечеткой логикой (НЛ) в качестве расширения теории множеств [167]. Нечеткая логика используется для моделирова-

ния параметров шлифования и других методов механической обработки. С целью прогнозирования и контроля шероховатости поверхностей при шлифовании [151] и точении [145] создана адаптивная нейро - нечеткая система. В работе [135] была создана трехслойная нечеткая модель для прогнозирования шероховатости поверхностей деталей, обработанных шлифованием. Использовалось 16 входных факторов. В работе [141] произведено проектирование и моделирование системы управления шлифованием на основе нечеткой логики с непрерывной электролитической правкой.

Анализ источников показывает, что нечеткая логика может применяться для моделирования в сложных задачах, связанных с большим количеством входных параметров, подходит для моделирования процесса шлифования.

### **Эмпирические регрессионные модели**

Регрессионный анализ является наиболее применяемым методом для моделирования процессов механической обработки. Эмпирические регрессионные модели имеют широкий спектр использования. Данный вид моделирования применяется и для механической обработки шлифованием [148]. В работе [139] созданы модели для расчета составляющих силы резания при шлифовании деталей из подшипниковой стали. Сравнение данных моделей с моделями, построенными методами ИНС и показало, что регрессионные модели могут с ними успешно конкурировать, а модели с НЛ даже превосходят. Аналогичное сравнение было проведено в работе [165], в результате сравнения сделан вывод об адекватности всех моделей. Для выбора модели предлагается произвести рассмотрение дополнительных факторов (затраты на вычислительный процесс, количество входных и выходных параметров и т.д.).

В работах Тышкевича В.Н., Носенко В.А., Орлова С.В. регрессионные модели использованы для оптимизации процесса плоского шлифования торцов подшипниковых колец малой осевой жёсткости [48-51, 54-56, 59, 60, 116, 119].

Обеспечение требуемого качества обработанной поверхности является приоритетной задачей современного машиностроения. При этом эксплуатационные свойства деталей оказывают на показатели качества непосредственное влияние.

Следовательно, необходимо иметь зависимости, связывающие параметры качества обработанной поверхности с технологическими факторами процесса шлифования. Созданию математических моделей при плоском шлифовании отводится важная роль. Стохастическая природа абразивной обработки значительно осложняет процесс моделирования [109]. Численные модели, позволяющие аналитически определять величину сил резания при шлифовании, разработаны С.Г. Редько [72], С.Н. Корчаком [28], Л.Н. Филимоновым [120, 121], В.И. Островским [62], *J. Peklenik* [153], *A. Pahlitzsch* [152] и т.д. С.Н. Корчак является одним из первых ученых, получившим физическую зависимость сил резания с основными параметрами процесса механической обработки шлифованием. Для анализа формирования микрогеометрии поверхности заготовки, обрабатываемой шлифованием, он использовал кинематическую модель с применением случайных функций и теории вероятности [28].

Многие российские ученые занимались оптимизацией абразивной обработки с целью повышения качества изготовления деталей машин: В.К. Старков [109], Г.Б. Лурье [32, 33], З.И. Кремень [29], А.В. Носенко [45, 46], А.Г. Суслов [111], Ю.М. Зубарев [20, 21], А.Н. Резников [74], А.В. Якимов [129, 130], Я.И. Солер [86 - 101], В.М. Оробинский [61], Ю.Н. Полянчиков [69], Братан С.М. [41, 136, 137] и др.

А.В. Якимов [129] выяснил, что одним из важнейших факторов, влияющих на формирование поверхностного слоя обрабатываемых деталей при механической обработке шлифованием, является тепловой поток. В работах Г.Б. Лурье [32, 33] исследованы вопросы зависимости шероховатости поверхности и точности обработанной заготовки от режима шлифования и характеристик абразивного инструмента, определены рекомендации по обработке шлифованием без прижогов. Солер Я.И. в работах [86 - 101] исследовал вопросы повышения качества деталей, оптимизации процесса резания конструкционных и инструментальных сталей и сплавов при плоском шлифовании.

В работах Братана С.М. [41, 136, 137] предложена методология стабилизации параметров качества деталей при чистовой и отделочной обработке деталей

на основе изучения поведения технологической операции как динамической системы, при условии воздействия на нее переменных входных, управляющих и возмущающих воздействий.

Старков В.К. считает, что оптимизация – поиск варианта управления процессом резания при шлифовании. Цель поиска - определение экстремума критерия, характеризующего качество управления [109].

В работах Сулова А.Г., Безъязычного В.Ф. [112 - 114] с целью осуществления прогнозирования параметров качества поверхности на всех этапах механической обработки при шлифовании предложен экспериментально-статистический метод поиска зависимостей, объединяющих теорию планирования эксперимента, дисперсионный, корреляционный и регрессионный анализы.

#### **1.4. Основные выводы**

Процесс плоского шлифования играет доминирующую роль, по сравнению с лезвийной обработкой, в обеспечении параметров качества обработанной поверхности при изготовлении деталей малой жёсткости. Повышение эффективности обработки заготовок малой жесткости шлифованием является одним из приоритетных направлений в машиностроении, подшипниковой промышленности.

Вместе с тем процесс плоского шлифования деталей малой жесткости имеет ряд особенностей. Эти особенности вызывают большие сложности при обеспечении требуемой геометрической точности обработанных поверхностей деталей малой жёсткости.

1. При закреплении и обработке детали малой жёсткости возникают упругие деформации, величина которых может достигать одного порядка с допусками на геометрические параметры обработанной поверхности. После обработки и закрепления упругие деформации возвращают определённую величину отклонения геометрическим параметрам, которые могут превышать заданные требования к обработанной поверхности.

2. Режимы токарной и фрезерной обработок, условия закрепления заготовок малой жёсткости выбираются с учётом жёсткости заготовок. Отмечается суще-

ственное влияние жёсткости заготовок на оптимальные режимы плоского шлифования при обеспечении требуемого качества обработанной поверхности.

3. При шлифовании деталей малой жёсткости необходимо учитывать упругие деформации заготовки, возникающие от действия магнитного поля стола станка и силы резания. Ограничение величины упругих деформаций заготовки позволит уменьшить время и стоимость операции при гарантированном обеспечении геометрической точности детали.

4. Недостаточно изучен вопрос упругого деформирования призматических заготовок направляющих линейных подшипников под действием магнитного поля стола и усилия резания при плоском шлифовании. В первую очередь, из-за сложности моделирования контактного взаимодействия поверхностей заготовки и стола станка.

5. Регрессионный анализ является самым распространенным методом для моделирования процессов механообработки с целью поиска математических зависимостей между входными и выходными параметрами.

На основании анализа литературных источников определены цель и задачи исследования, представленные выше.

## 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 2.1. Экспериментальные образцы

Для выполнения работы использовались экспериментальные образцы, изготовленные из цементированной, закаленной стали 20Х ГОСТ 4543-71 размеров 120×45×10 мм. Характеристики материала приведены в соответствующих таблицах источников [14, 34].

Изготовление экспериментальных образцов, цементация на глубину 1,8-2 мм и закалка до 58...62 единиц по *HRC*, контроль качества термической обработки производились на предприятии ОАО «ВПЗ».

Твердость образцов измерялась твердомером модели «ТР-5006» в лабораторных условиях в соответствии с ГОСТ 9013-59.

Для того чтобы исключить влияние технологической наследственности производили срез с образцов слоя металла толщиной 0,1...0,15 мм.

### 2.2. Абразивный инструмент

Для механической обработки экспериментальных образцов применялись шлифовальные круги прямого профиля на керамической связке. Марка абразивного материала кругов – электрокорунд белый марки 25А. Размеры круга 250×16×76 мм. Маркировка кругов - 1 250×16×76 25AF70K7V, 1 250×16×76 25AF70L7V ГОСТ Р 52781-2007 производства ОАО «Волжский абразивный завод».

Фактическую твердость шлифовальных кругов определяли ультразвуковым методом (ГОСТ Р 52710-2007) с помощью прибора «Звук-110М». Для выполнения работы использовали круги с твердостью в пределах степени *K* и *L*. Для измерения твердости абразивный круг устанавливали в стойку прибора, изменяли частоту возбуждающих колебаний до наступления резонанса, после чего измеряли частоту возбуждающих колебаний, соответствующую резонансной частоте. Скорость распространения акустических волн определяли в 8 диаметральных сечениях круга.

Прежде чем производить шлифование экспериментальных образцов проводили визуальную проверку круга на наличие трещин и сколов. Также производили правку круга (алмазным карандашом марки 3908-0061 исп. А тип 04 ГОСТ 607-80) и статическую балансировку круга.

### **2.3. Методика определения составляющих сил резания $P_y$ и $P_z$**

Экспериментальное исследование производилось с целью определения зависимости величины радиальной и касательной составляющих силы резания, возникающих на операции механической обработки шлифованием от различных параметров и режимов шлифования заготовок из материала сталь 20Х.

В работе была использована методика определения составляющих сил резания аналогичная методике, использованной в источнике [60].

Для шлифования экспериментальных образцов использовали плоскошлифовальный станок 3Г71.

Процесс шлифования осуществляли с применением СОЖ (5% эмульсионный раствор «Авазол»). Расход СОЖ - 6-12 л/мин.

СОЖ подавали в зону резания и правки под давлением 0,6 МПа.

Регистрацию показателей шлифования производили с помощью измерительно-регистрирующих приборов.

Составляющие силы резания определяли с помощью динамометра УДМ-100 конструкции ВНИИ, который позволяет одновременно измерять составляющие силы  $P_z$ ,  $P_y$ ,  $P_x$  и величину крутящего момента  $M_{кр}$ . [63].

Экспериментальные образцы закреплялись в динамометре с помощью тисков.

Последовательность передачи сигнала на персональный компьютер следующая: сигнал передается от динамометра через усилитель УТ4-1 ТУ25.06.1377-82, затем через аналогово-цифровой преобразователь Е14-140 (частотный диапазон от 0 до 500 кГц). Погрешность измеренных мгновенных значений сил резания не превышает 10% [60].



Для сбора и анализа данных использовали персональный компьютер, оборудованный устройством преобразования аналогового видеосигнала.

Для перевода в ньютоны (Н) численных значений составляющих сил резания, которые на персональном компьютере представляются в виде графиков зависимостей с единицами измерения в вольтах (В), строятся тарировочные графики по каждой отдельно взятой составляющей силы резания при шлифовании. Для дальнейших расчетов вычисляют тарировочные коэффициенты на основе тарировочных графиков.

#### **2.4. Методики определения шероховатости, волнистости, отклонения от плоскостности, прижогов**

Для определения шероховатость поверхности использовали профилограф - профилометр «СЕЙТРОНИК ПШ8-4 С.С.». Этот прибор позволяет определять шероховатость поверхности за счет ощупывания ее алмазной иглой щупа первичного преобразователя (радиус иглы 0,002 мм). Измерение параметров шероховатости производится по системе средней линии (ГОСТ 25142-82) в соответствии с номенклатурой и соотношениями значений параметров, предусмотренными ГОСТ 2789-83. Погрешность прибора составляет  $\pm 5 \%$ .

Измерение параметров шероховатости поверхности производили в рабочей зоне станка.

Для определения волнистости поверхности образца использовали щуповой контактный профилометр - профилограф *FORM TALYSURF INTRA*. Данный прибор позволяет производить измерения отклонения формы, волнистости, шероховатости, плоскостности и других параметров. Основание и колонна профилографа изготовлены из искусственного гранита, что позволяет обеспечить высокую точность измерений. Для облегчения установки крепежных элементов в столе прибора предусмотрены Т-образные пазы.

Для определения отклонения от плоскостности боковых граней направляющей линейного подшипника использовали измерительную головку 1 МИГ со

шкалой деления 1 мкм (ГОСТ 9696-82) при установке детали на магнитный стол станка.

Для определения шлифовочных прижогов [128] производили травление поверхность заготовки по инструкции ВНИПП 101. Для чего, после шлифования обработанную поверхность промывают теплой водой, затем - травят в 5 % -ном растворе азотной кислоты (по ГОСТ 4461-77) 30-60 секунд, пока не произойдет почернение поверхности. Далее обработанную поверхность опять промывают теплой водой и погружают на 3 секунды в 50 %-ный водный раствор соляной кислоты (по ГОСТ 3118 – 77). Промывают водой.

### 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ. АЛГОРИТМ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ШЛИФОВАНИЯ

#### 3.1. Выбор расчетной схемы для определения величины упругих деформаций призматических заготовок

При шлифовании поверхностей боковых граней призматических заготовок малой жёсткости необходимо учитывать упругие деформации в направлении перпендикулярном поверхности стола.

Для реализации предложенного способа устранения отклонений от плоскостности при шлифовании путём ограничения величины упругих деформаций необходима математическая модель для определения величины деформаций.

Разрабатываемая математическая модель максимальных упругих деформаций заготовок основана на теории изгиба балок, поэтому геометрические параметры заготовок должны удовлетворять ограничению:  $l_3/h > 10$  (где  $l_3$  – длина заготовки,  $h$  – наибольший размер поперечного сечения заготовки).

Для исследования упругих деформаций, возникающих при закреплении и шлифовании заготовки, выбрана направляющая роликового однорядного подшипника ЛРХ 6/350, изготавливаемая на ОАО «ЕПК Самара» (рисунок 3.1).

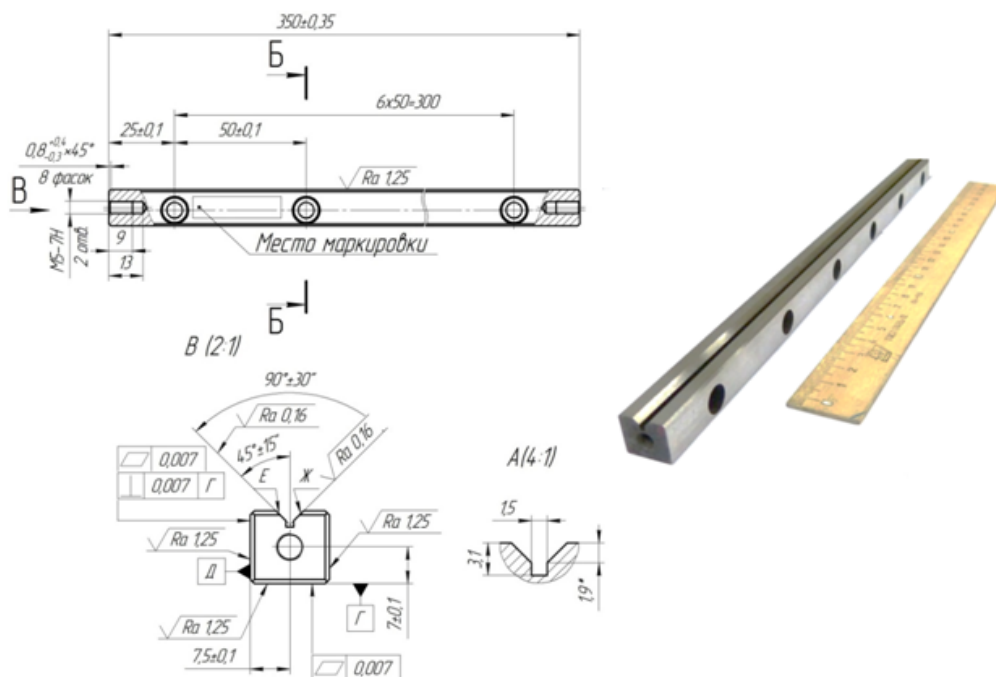


Рисунок 3.1 – Исследуемая направляющая подшипника ЛРХ 6/350

Направляющая подшипника изготовлена из стали 20Х (ГОСТ 4543 – 71). В соответствии с заводским технологическим процессом предварительно производили отрезную операцию заготовки, торцевали заготовку в размер 350 мм, производили фрезеровку призматических граней. Далее производили черновое шлифование боковых граней (обрабатывая одну из противоположных граней как чисто, другую, снимая припуск  $t = 0,6$  мм, радиальная подача  $S_p = 0,04$  мм/х, скорость подачи стола  $v_s = 20$  м/мин), фрезерование плоскостей призмы и паза, шлифование плоскостей призмы, производили центровочную операцию двух отверстий на торцах. Далее заготовку цементировали на глубину 1,6 - 1,8 мм, производили рихтовку на прессе (отклонение от плоскостности - 0,1мм), черновое шлифование боковых граней (припуск на обработку  $t = 0,2$  мм, радиальная подача  $S_p = 0,02$  мм/х, скорость подачи стола  $v_s = 20$  м/мин, сверление отверстий крепления, нарезание резьбы в отверстиях для крепления направляющей и центровочных отверстиях. Далее заготовку подвергали закалке (HRC 58-62), рихтовке на прессе (отклонение 0,1мм). Затем выполняли черновое шлифование всех граней при максимальной силе притяжения магнитного поля стола станка (припуск на обработку  $t = 0,4$  мм, радиальная подача  $S_p = 0,02$  мм/х, скорость подачи стола  $v_s = 20$  м/мин, размер поперечного сечения в результате обработки - 15,2х16,6).

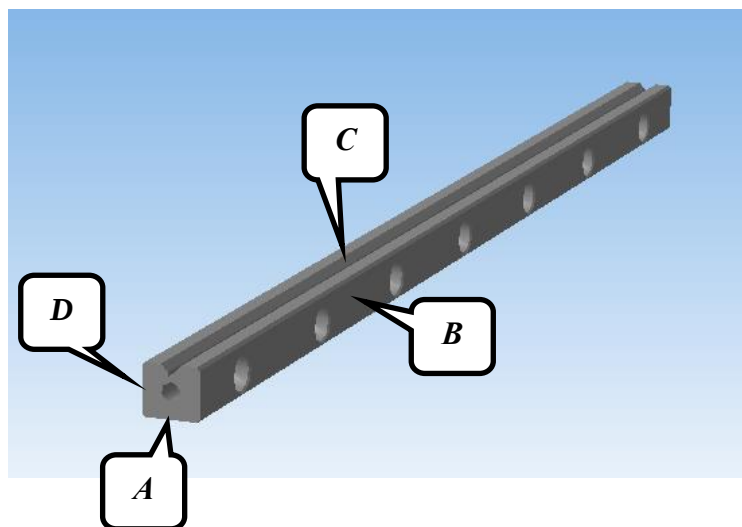


Рисунок 3.2 –Исследуемые грани направляющей

Исследование отклонений от плоскостности выполняли на поверхности грани  $A$  (см. рисунок 3.2), которая в дальнейшем используется как базовая. Исследовали отклонения грани  $A$  на пяти заготовках. Измерения выполняли измерительной головкой 1 МИГ со шкалой деления 1 мкм (ГОСТ 9696-82) при продольном перемещении стола станка, шаг измерений – 25 мм.

Отклонение от плоскостности имеет выраженные волны макроотклонений (рисунок 3.3).

Общая погрешность серии измерений для независимых параметров определяется:

$$\delta = \sqrt{\delta_{ст}^2 + \delta_{и.г.}^2 + \delta_{стола}^2}$$
, где  $\delta_{ст}$  – статистическая погрешность,  $\delta_{и.г.} = \pm 0,75$  мкм – погрешность индикаторной головки,  $\delta$  стола – допуск плоскостности стола станка = 3,5 мкм на длине заготовки (ГОСТ 16528-87).

Для проверки однородности среднеквадратических отклонений (выборочных дисперсий) используют критерий Кохрена. Для этого составляется отношение максимальной дисперсии к сумме всех дисперсий:

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}.$$

Количество параллельных измерений – 3 (по ширине заготовки), количество опытов для одной заготовки – 15.

Полученное отношение сравнивается с табличным:  $G_{1-p}(f_1, f_2)$ , где  $p = 0,95$ ; число степеней свободы  $f_1 = m - 1 = 3 - 1 = 2$ ;  $f_2 = N = 15$ .

Таким образом,  $G_{\text{табл}} = 0,3346$ .

Таблица 3.1

| Заготовка | Максимальная дисперсия | Сумма дисперсий | Расчетное значение критерия Кохрена ( $G_{\text{набл}}$ ) | Табличный критерий Кохрена ( $G_{\text{табл}}$ ) |
|-----------|------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 1         | 9,3                    | 32,7            | 0,2844                                                    | 0,3346                                           |
| 2         | 5,33                   | 37,92           | 0,1407                                                    | 0,3346                                           |
| 3         | 5,33                   | 36              | 0,1482                                                    | 0,3346                                           |
| 4         | 8,33                   | 47,33           | 0,1761                                                    | 0,3346                                           |
| 5         | 9,33                   | 45,67           | 0,2044                                                    | 0,3346                                           |

Сравнение дисперсий 3-х параллельных измерений в 15 сечениях по критерию Кохрена показали, что во всех случаях дисперсии отличаются незначимо (таблица 3.1).

Результаты измерений усредненной, из пяти измеренных, заготовки представлены на рисунке 3.3.

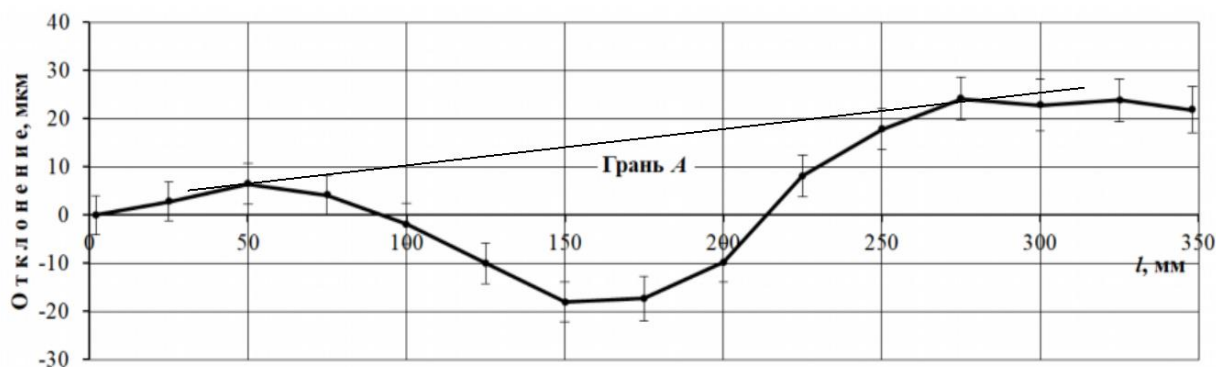


Рисунок 3.3 – Отклонения усредненной поверхности заготовки (грань А)

При дальнейших исследованиях заготовку положили на поверхность стола станка гранью А, при этом заготовка касается поверхности стола наиболее выступающими поверхностями (рисунок 3.4). Для более точного определения положения выступающих поверхностей заготовки и характерной длины волны  $l$  на участках с наиболее выступающими поверхностями заготовки измерения производили с шагом 1 мм.

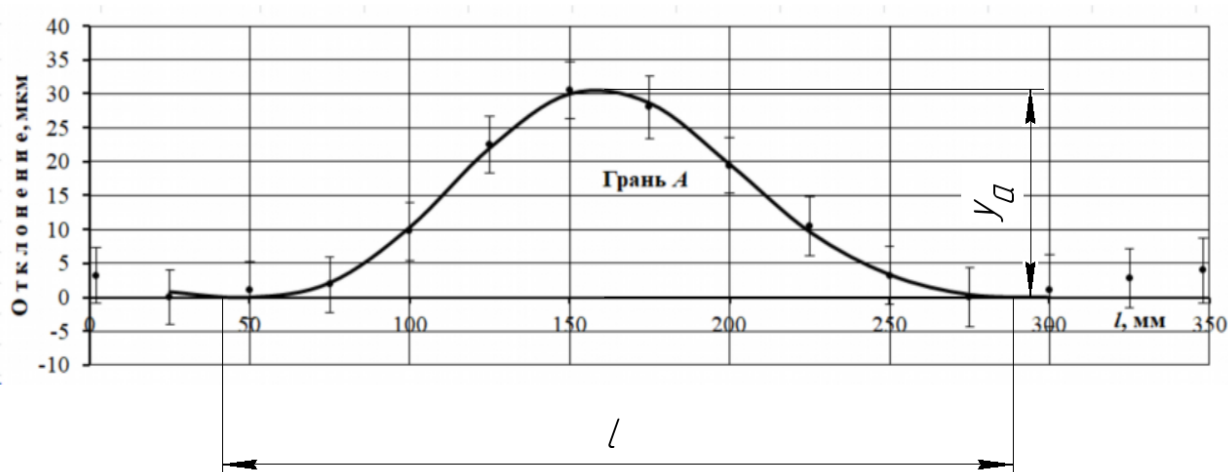


Рисунок 3.4 – Параметры синусоиды: характерная длина волны  $l$ , удвоенная амплитуда  $u_a$  для грани А

Удвоенная амплитуда определяется проведением нормали к общей касательной, проведенной к наиболее выступающим поверхностям заготовки (рисунок 3.3).

Поверхность грани  $A$ , контактирующей с поверхностью стола близка к синусоиде. В связи с этим, аппроксимацию поверхности задавали уравнением синусоиды:  $y=a+bsin(cx+d)$ . После аппроксимации фактической кривой усредненной заготовки методом наименьших квадратов получим синусоиду  $y=15+15sin(5,5x+24,5)$ , представленную на рисунке 3.4, где  $l$  – характерная длины волны,  $y_a$  – удвоенная амплитуда. Результаты измерений амплитуды и характерной длины волны для пяти заготовок представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Результаты измерений амплитуды и характерной длины волны

| № заготовки             | $y_a$ , мкм | Погрешность измерений, $\delta$ , мкм | $l$ , мм | Погрешность измерений, $\delta$ , мм |
|-------------------------|-------------|---------------------------------------|----------|--------------------------------------|
| 1                       | 31          | 3,75                                  | 247      | 5,7                                  |
| 2                       | 32          | 3,75                                  | 248      | 5,7                                  |
| 3                       | 26          | 3,75                                  | 239      | 5,7                                  |
| 4                       | 28          | 3,75                                  | 242      | 5,7                                  |
| 5                       | 33          | 3,75                                  | 250      | 5,7                                  |
| Среднее по 5 заготовкам | 30          | 3,75                                  | 245      | 5,7                                  |

Проверяем адекватность замены формы реальной поверхности синусоидой по критерию Фишера для первой заготовки. Для этого составляется дисперсионное отношение

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_{воспр}^2},$$

где  $S_{ад}^2$  – дисперсия адекватности, зависящая от разности между значениями параметра, определенными по синусоиде, и экспериментальными результатами определения параметра и рассчитывается по формуле:

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - y_i)^2}{N};$$

Так как синусоидой моделируется только поверхность между точками контакта заготовки и стола станка  $N=11$ . Подставив численные значения, получим:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{27,42}{11} = 2,493.$$

Ранее мы доказали однородность дисперсий с помощью критерия Кохрена, следовательно в качестве оценки для дисперсии воспроизводимости можно взять среднюю дисперсию с числом степеней свободы  $f_{\text{воспр}} = N(m-1) = 22$ :

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_i^2}{N} ;$$

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{15,33}{11} = 1,394.$$

Таким образом, расчетный коэффициент Фишера:

$$F = \frac{2,493}{1,394} = 1,79.$$

Полученное отношение сравнивается с табличным:  $F_{1-p}(f_1, f_2)$ , где уровень значимости  $p = 0,95$ ; число степеней свободы дисперсии адекватности  $f_1 = N*m = 33$ ; число степеней свободы дисперсии воспроизводимости  $f_2 = N(m-1) = 11 (3-1) = 22$ . Таким образом  $F_{\text{табл}}=1,97$ .

Аналогичным образом производим проверку для оставшихся четырех заготовок, результаты вычислений заносим в таблицу 3.3

Таблица 3.3

| Заготовка | Дисперсия адекватности ( $S_{\text{ад}}^2$ ) | Дисперсия воспроизводимости ( $S_{\text{воспр}}^2$ ) | Расчетное значение критерия Фишера ( $F_{\text{расч}}$ ) | Табличный критерий Фишера ( $F_{\text{табл}}$ ) |
|-----------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 1         | 2,49                                         | 1,39                                                 | 1,79                                                     | 1,97                                            |
| 2         | 2,68                                         | 1,72                                                 | 1,56                                                     | 1,97                                            |
| 3         | 2,95                                         | 1,57                                                 | 1,88                                                     | 1,97                                            |
| 4         | 2,19                                         | 1,97                                                 | 1,11                                                     | 1,97                                            |
| 5         | 2,71                                         | 2,18                                                 | 1,25                                                     | 1,97                                            |

Выполнено условие  $F < F_{\text{табл}}$ , следовательно, дисперсии адекватности и воспроизводимости однородны, доказана адекватность замены реальной поверхности синусоидой.



В результате исследований установлено, что определяющим фактором возникновения начальных отклонений от плоскостности боковых граней призматических заготовок, является деформация заготовки в процессе её термообработки и предшествующих шлифованию операций механической обработки. Вследствие чего заготовка получает изогнутость поверхности с выраженными регулярными волнами макроотклонений. Макроотклонение поверхности заготовки, соприкасающейся с поверхностью стола станка, моделируется цилиндрической поверхностью с направляющей в виде синусоиды с характерной длиной волны  $l$  (рисунок 3.5). Длина  $l$  зависит от ряда факторов, к которым относятся: конструктивные особенности, изгибная жёсткость заготовки, виды термической и механической обработки, предшествующие операции шлифования. Удвоенная амплитуда синусоиды  $y_a$  принимается равной максимальной высоте волн макроотклонений (см. рисунок 3.5).

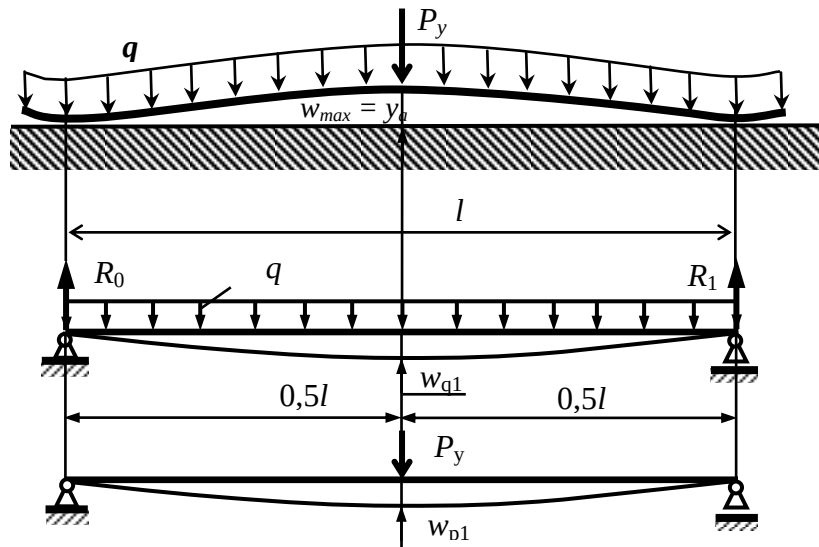


Рисунок 3.5 - Расчетная схема заготовки для определения максимального прогиба  $w_{max}$  (в данном случае начальное отклонение от плоскостности  $y$ )

Разрабатываемая математическая модель максимальной деформации при закреплении заготовки магнитным полем стола и шлифовании имеет общий вид:

$$w_{max} = w_q + w_p + w_k, \quad (3.1)$$

где  $w_q$ ,  $w_p$  – максимальная упругая деформации заготовки при изгибе, под действием массы заготовки и усилия притяжения магнитного поля стола станка, радиальной составляющей силы резания, соответственно;  $w_k$  – суммарная контакт-

ная деформация:  $w_k = w_{kq} + w_{kp}$ , где  $w_{kp}$  - контактная деформация поверхности заготовки с плоскостью стола при действии силы резания;  $w_{kq}$  - контактная деформация поверхности заготовки с плоскостью стола при действии веса заготовки и усилия притяжения магнитного поля стола станка.

В рабочих условиях определённая часть контактной деформации может быть и пластической. Величина последней учитывается только для уменьшения зазора между соприкасающимися поверхностями стола и заготовки.

Призматическая направляющая моделируется неразрезной балкой, нагруженной равномерно распределенной по центральной оси нагрузкой интенсивностью  $q = q_c + q_m$  (от действия усилия притяжения магнитного поля стола станка  $q_c$  и массы заготовки  $q_m$ ) и сосредоточенной силы  $P_y$  - радиальной составляющей силы резания (рисунок 3.5).

Для рассматриваемых заготовок  $\alpha_1 = l_3/h = 350/15 = 23,3 > 10$  (отношение длины заготовки к наибольшему размеру поперечного сечения). Данное условие позволяет использовать для определения максимальных упругих перемещений при изгибе заготовки  $w_p$  и  $w_q$  теорию изгиба балок [102].

Для обеспечения требуемого допуска плоскостности величина максимальной упругой деформации уменьшается введением дополнительных опор с помощью компенсаторов (рисунок 3.6).

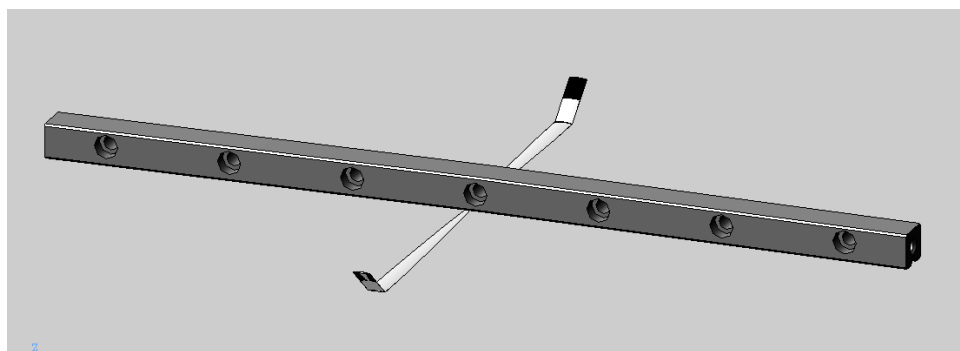


Рисунок 3.6 – Установка компенсаторов

Компенсатор выполняется в виде асимметричного клина. Материал - немагнитная сталь круглого профиля диаметром 30 мм. Опорная грань, контактирующая с поверхностью стола станка, выполняется плоской. Грань, контактирующая с поверхностью заготовки, ограничивается цилиндрической поверхностью. Вели-

чина уклона между гранями составляет 1:100. Для удобства использования утопленная часть компенсатора отогнута вверх и имеет рифление.

Компенсаторы водятся попарно с обеих сторон заготовки.

Увеличение жёсткости заготовки при деформировании под нагрузкой реализуется за счет установки компенсаторов с разбиением пролета на равные части. Достаточное число компенсаторов определяется из условия обеспечения требуемого допуска плоскостности по алгоритмам, представленным в разделе 3.5.

Число пар компенсаторов на характерной длине  $l$  ограничивается двумя из соображений сокращения вспомогательного времени на операции шлифования.

### **3.2. Определение максимальных прогибов призматических заготовок при закреплении магнитным полем стола станка**

На заготовку действует равномерно распределённая нагрузка интенсивностью:

$$q = q_c + q_m,$$

где  $q_c$  и  $q_m$  – интенсивность равномерно распределённой нагрузки от действия усилия притяжения магнитного поля стола станка и собственного веса заготовки, соответственно.

Макроотклонение поверхности заготовки, соприкасающейся с гладкой поверхностью стола моделируется цилиндрической поверхностью с направляющей в виде синусоиды с характерной длиной волны  $l$  (см. рисунок 3.5).

Удвоенная амплитуда синусоиды  $y_a$  (см. рисунок 3.5) принимается равной максимальной высоте волн макроотклонений.

Величина максимального прогиба от действия усилия притяжения магнитного поля стола станка, собственного веса заготовки  $w_{q1}$  и координата максимального прогиба  $x_{\max 1}$  будут равны [15]:

$$w_{q1} = 13 \times 10^{-3} \frac{ql^4}{EI_z}; \quad x_{\max 1} = 0,5l. \quad (3.2)$$

Величина зазора между соприкасающимися поверхностями заготовки и стола станка  $y_1 = y_a$  (см. рисунок 3.5).

Для повышения изгибной жёсткости заготовок при закреплении магнитным

полем стола станка рекомендуется использовать компенсаторы (см. раздел 3.1).

При установке компенсаторов заготовка также моделируется неразрезной балкой. Пары компенсаторов устанавливаются с разбиением характерной длины волны  $l$  на равные части  $l/2$ ,  $l/3$ .

Если мы устанавливаем одну пару компенсаторов, то в результате получаем расчётную схему двух пролётной балки  $n = 2$  (рисунок 3.7).

При количестве пролётов более одного ( $n > 1$ ) балка будет статически неопределимой и максимальные прогибы  $w_{qn}$  и координаты максимальных прогибов  $x_{maxn}$  определяем методом начальных параметров, интегрируя дифференциальное уравнение упругой линии балки в первом пролёте (см. рисунок 3.7):

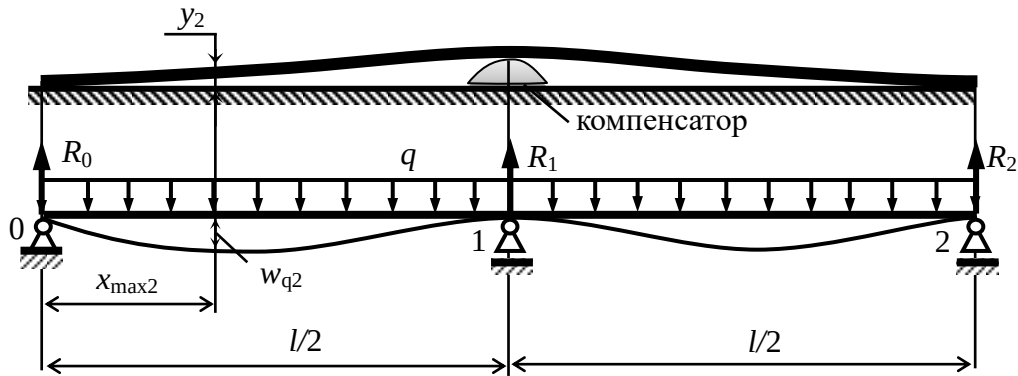


Рисунок 3.7 – Расчётная схема заготовки при закреплении магнитным полем стола станка с одной парой компенсаторов

$$\frac{d^2 w(x)}{dx^2} = \frac{1}{EI_z} \left( R_0 \cdot x - q \frac{x^2}{2} \right).$$

Угол поворота произвольного поперечного сечения в первом пролёте балки:

$$\theta(x) = \frac{dw(x)}{dx} = \theta_0 + \frac{1}{EI_z} \left( R_0 \cdot \frac{x^2}{2} - q \frac{x^3}{6} \right).$$

Прогиб произвольного поперечного сечения в первом пролёте балки:

$$w(x) = w_0 + \theta_0 \cdot x + \frac{1}{EI_z} \left( R_0 \cdot \frac{x^3}{6} - q \frac{x^4}{24} \right),$$

где  $\theta_0$ ,  $w_0$  – угол поворота и прогиб в начале координат (на нулевой опоре).

Из граничных условий:  $w_0 = w|_{x=0} = 0$ .  $\theta_0$  определяем из условия равенства нулю прогиба на первой опоре:

$$w|_{x=0,5l} = 0: \theta_0 = -\frac{1}{EI_z} \left( R_0 \cdot \frac{l^2}{6n^2} - q \frac{l^3}{24n^3} \right).$$

С учётом постоянных интегрирования угол поворота и прогиб произвольного сечения первого пролёта балки будут равны:

$$\theta(x) = \frac{1}{EI_z} \left[ \frac{R_0}{2} \left( x^2 - \frac{l^2}{3n^2} \right) - \frac{q}{6} \left( x^3 - \frac{l^3}{4n^3} \right) \right]; \quad (3.3)$$

$$w(x) = \frac{1}{EI_z} \left[ \frac{R_0}{6} \left( x^3 - \frac{l^2 x}{n^2} \right) - \frac{q}{24} \left( x^4 - \frac{l^3 x}{n^3} \right) \right]. \quad (3.4)$$

Координату сечения с максимальным прогибом в первом пролёте балки  $x_{\max n}$  определяем из условия равенства нулю угла поворота сечения:

$$\theta|_{x_{\max n}} = 0: \quad \frac{R_0}{2} \left( x_{\max n}^2 - \frac{l^2}{3n^2} \right) - \frac{q}{6} \left( x_{\max n}^3 - \frac{l^3}{4n^3} \right) = 0. \quad (3.5)$$

Для двух пролётной неразрезной балкой при  $n = 2$  (см. рисунок 3.7). Реакция левой опоры будет равна [15]:

$$R_0 = \frac{3}{16} ql.$$

Уравнение (3.5) примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{3}{32} l x_{\max 2}^2 - \frac{l^3}{48} - \frac{x_{\max 2}^3}{6} + \frac{l^3}{192} &= 0; \\ -32 x_{\max 2}^3 + 18 l x_{\max 2}^2 - 4 l^3 &= 0. \end{aligned} \quad (3.6)$$

Решая кубическое уравнение (3.6), получим координату сечения с максимальным прогибом:

$$x_{\max 2} = 0,211l.$$

Максимальный прогиб из (3.4) при  $x = x_{\max 2} = 0,211l$ :

$$w_{q2} = 0,339 \times 10^{-3} \frac{ql^4}{EI_z}. \quad (3.7)$$

Непосредственно из (3.4) величина прогиба получается отрицательной, что по правилу знаков показывает направление прогиба вниз, но здесь и в дальнейшем при определении прогибов будем для удобства величину прогиба оставлять положительной.

Начальное отклонение от плоскостности поверхности боковой грани заготовки перед операцией шлифования определяется величиной удвоенной амплитуды синусоиды  $y_a$  (см. рисунок 3.5). Касание поверхностей заготовки и стола станка при изгибе заготовки под действием усилия притяжения магнитного поля стола и собственного веса происходит в сечениях максимального прогиба с координатой  $x_{\max n}$ . Расстояние между точками касания поверхностей  $y_n$  (см. рисунки 3.5, 3.7) определяется уравнением:

$$y_n = 0,5y_a \left[ 1 - \cos \left( 2\pi \cdot \frac{x_{\max n}}{l} \right) \right] - w_{\text{кн}}. \quad (3.8)$$

$y_1 = y_a$  при  $x_{\max 1} = 0,5l$ ;  $y_2 = 0,379y_a - w_{\text{кн}}$  при  $x_{\max 2} = 0,211l$ .

При установке двух пар компенсаторов (рисунок 3.8) получим:

$$w_{q3} = 0,0863 \times 10^{-3} \frac{ql^4}{EI_z}; \quad (3.9)$$

$$x_{\max 3} = 0,15l; \quad (3.10)$$

$$y_3 = 0,206y_a - w_{\text{кн}}. \quad (3.11)$$

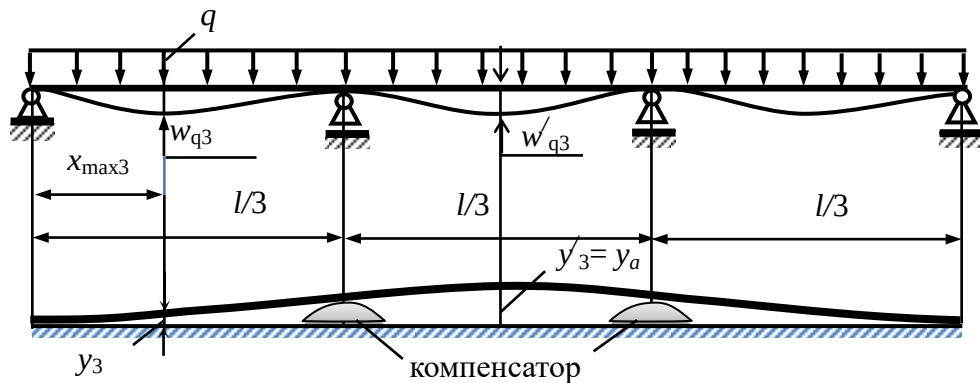


Рисунок 3.8 – Расчётная схема заготовки при закреплении магнитным полем стола станка с двумя парами компенсаторов

Если мы устанавливаем две пары компенсаторов, то закрытие зазора между поверхностями заготовки и стола станка будет происходить последовательно от первого пролёта к среднему (см. рисунки 3.8). Если величина максимального прогиба в первом пролёте балки будет равна зазору между поверхностями заготовки и стола  $w_{q3} = y_3$ , а величина зазора будет меньше или равна допускаемому откло-

нению от плоскостности  $[\Delta]$ :  $y_3 \leq [\Delta]$ , то дальнейшие расчёты величины максимального прогиба необходимо продолжать в среднем пролёте балки.

При установке двух пар компенсаторов (см. рисунок 3.8) реакции нулевой и первой опоры будут равны:

$$R_0 = 0,133ql; \quad R_1 = 0,367ql.$$

Угол поворота произвольного сечения второго пролёта:

$$\theta(x) = \theta_0 + \frac{1}{EI_z} \left[ R_0 \cdot \frac{x^2}{2} + \frac{R_1}{2} \left( x - \frac{l}{3} \right)^2 - q \frac{x^3}{6} \right].$$

Прогиб произвольного сечения второго пролёта:

$$w(x) = w_0 + \theta_0(x) + \frac{1}{EI_z} \left[ R_0 \cdot \frac{x^3}{6} + \frac{R_1}{6} \left( x - \frac{l}{3} \right)^3 - q \frac{x^4}{24} \right].$$

Из граничных условий:  $w_0 = w|_{x=0} = 0$ .  $\theta_0$  определяем из условия равенства нулю прогиба на первой опоре:

$$w|_{x=l/3} = 0: \quad \theta_0 = -\frac{1}{EI_z} \left( R_0 \cdot \frac{l^2}{54} - q \frac{l^3}{648} \right).$$

С учётом постоянных интегрирования угол поворота и прогиб произвольного сечения второго пролёта балки будут равны:

$$\begin{aligned} \theta(x) &= \frac{1}{EI_z} \left[ \frac{R_0}{2} \left( x^2 - \frac{l^2}{27} \right) - \frac{q}{6} \left( x^3 - \frac{l^3}{108} \right) + \frac{R_1}{2} \left( x - \frac{l}{3} \right)^2 \right]; \\ w(x) &= \frac{1}{EI_z} \left[ \frac{R_0}{6} \left( x^3 - \frac{xl^2}{9} \right) - \frac{q}{24} \left( x^4 - \frac{xl^3}{27} \right) + \frac{R_1}{6} \left( x - \frac{l}{3} \right)^3 \right]. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Координату сечения с максимальным прогибом во втором пролёте балки  $x'_{\max 3}$  определяем из условия равенства нулю угла поворота сечения:

$$\begin{aligned} \theta|_{x'_{\max 3}} = 0: \quad & \frac{R_0}{2} \left( x'^2_{\max 3} - \frac{l^2}{27} \right) - \frac{q}{6} \left( x'^3_{\max 3} - \frac{l^3}{108} \right) + \frac{R_1}{2} \left( x'_{\max 3} - \frac{l}{3} \right)^2 = 0; \\ & -166,7 x'^3_{\max 3} + 250 l x'^2_{\max 3} - 122,2 l^2 x'_{\max 3} + 19,4 l^3 = 0. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Решая кубическое уравнение (3.13), получим координату сечения с максималь-

ным прогибом:  $x'_{\max 3} = 0,5l$ .

Максимальный прогиб из (3.12) при  $x = x'_{\max 3} = 0,5l$ :

$$w'_{q3} = 0,00643 \times 10^{-3} \frac{ql^4}{EI_z}. \quad (3.14)$$

Расстояние между точками касания поверхностей заготовки и стола  $y'_3$  из уравнения (3.8):  $y'_3 = y_a$ .

Математическая модель максимальных прогибов от действия усилия притяжения магнитного поля стола станка и собственного веса заготовки имеет вид:

- в первом пролёте:  $w_{qn} = a_{qn}ql^4 \times 10^{-3} / (EI_z)$ ;

- в среднем пролёте:  $w_{qn} = a'_{qn}ql^4 \times 10^{-3} / (EI_z)$ .

Величины коэффициентов  $a_n$ , координаты максимальных прогибов  $x_{\max n}$ , расстояний между точками касания поверхностей заготовки и стола станка  $y_n$  в зависимости от числа пролётов  $n$  приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 - Расчётные параметры математических моделей максимальных прогибов при закреплении заготовки магнитным полем стола

| Число пролётов, $n$ | $a_{qn}$                | $x_{\max n} \times l$ | $y_n \times y_a$ | $a'_{qn}$                | $x'_{\max n} \times l$ | $y'_n \times y_a$ |
|---------------------|-------------------------|-----------------------|------------------|--------------------------|------------------------|-------------------|
|                     | <b>в первом пролёте</b> |                       |                  | <b>в среднем пролёте</b> |                        |                   |
| $n = 1$             | 13,00                   | 0,500                 | 1,000            | -                        | -                      | -                 |
| $n = 2$             | 0,339                   | 0,211                 | 0,379            | -                        | -                      | -                 |
| $n = 3$             | 0,0863                  | 0,150                 | 0,206            | 0,0064                   | 0,500                  | 1,000             |

### 3.3. Определение максимальных прогибов призматических заготовок при шлифовании с закреплением магнитного поля стола

При шлифовании величина упругого перемещения (отжатия) заготовки от действия радиальной составляющей силы резания  $P_y$  будет зависеть от соотношения жесткостей технологической системы (шпиндель станка – узлы крепления шпинделя станка) -  $j_c$  и заготовки -  $j_{zn}$ :  $c_n = j_c / (j_{zn} + j_c)$ . При этом жёсткость заготовки  $j_{zn}$  будет зависеть от числа пролётов моделируемой неразрезной балки  $n$ . Жёсткость плоскошлифовальных станков с прямоугольным столом определяется по ГОСТ 13135-90 [105].

Заготовка моделируется неразрезной балкой, лежащей на опорах.

При  $n = 1$  имеем однопролётную балку с двумя опорами (см. рисунок 3.5). Максимальный прогиб при действии радиальной составляющей силы резания  $w_{p1}$



и координата максимального прогиба  $x_{\max 1}$  будут равны [15]:

$$w_{p1} = 20,8 \times 10^{-3} \frac{P_y l^3}{EI_z} \times c_1; \quad x_{\max 1} = 0,5l. \quad (3.15)$$

Расстояние (зазор) между точками касания соприкасающихся поверхностей заготовки и стола  $y_1 = y_a$  (см. рисунок 3.5).

При числе пролетов более одного ( $n > 1$ ) балка будет статически неопределимой и максимальные прогибы  $w_{qn} + w_{pn}$  и координаты максимальных прогибов  $x_{\max n}$  определяем методом начальных параметров, интегрируя дифференциальное уравнение упругой линии балки в первом пролёте (рисунок 3.9) [102].

Расчётная схема заготовки при шлифовании с закреплением заготовки магнитным полем стола с одним компенсатором показана на рисунке 3.9.

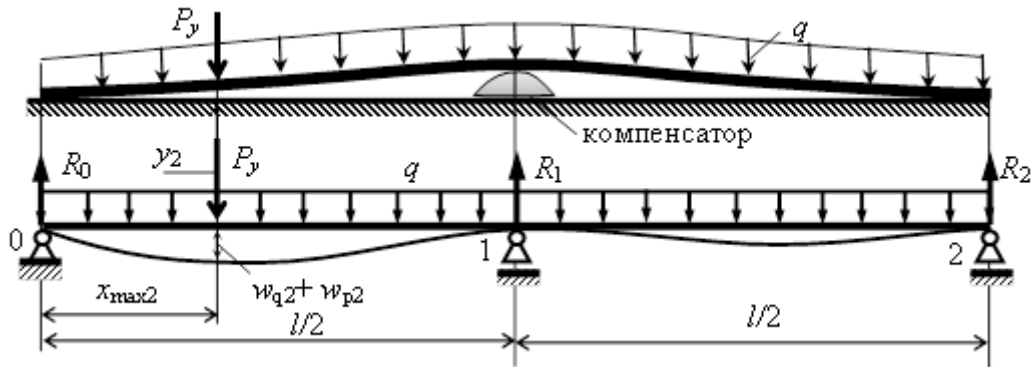


Рисунок 3.9 – Расчётная схема заготовки при шлифовании с закреплением заготовки магнитным полем стола с одним компенсатором

Для получения дифференциального уравнения упругой линии балки необходимо раскрыть статическую неопределимость при экстремальном расположении радиальной составляющей силы резания.

Координату  $b$  положения силы  $P_y$ , соответствующего максимальному прогибу (см. рисунок 3.10, а), определяем из условия экстремума прогиба в первом пролёте  $\theta|_{x_{\max 2}} = 0$ . Раскрываем статическую неопределимость балки методом сил. Для эквивалентной системы один раз статически неопределимой балки (рисунок 3.10, б):

$$X_1 = -\frac{A_p}{\delta_{11}}, \quad (3.16)$$

где  $\Delta_{1P}$ ,  $\delta_{11}$  – перемещения в направлении  $X_1$  в основной системе при грузовом нагружении (рисунок 3.10, в) и при единичном нагружении (рисунок 3.10, з).

Реакции опор при грузовом нагружении (см. рисунок 3.10, в):

$$R_1^P = \frac{a + 0,5l}{0,5l} P_y; \quad R_2^P = -\frac{a}{0,5l} P_y.$$

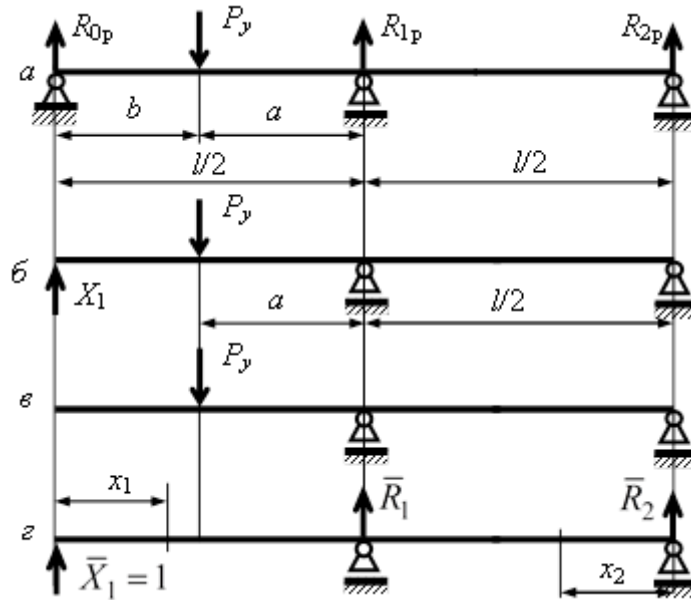


Рисунок 3.10 – Расчётные схемы заготовки при шлифовании от действия радиальной составляющей силы резания для раскрытия статической неопределённости при  $n > 1$ : а – схема нагружения; б – эквивалентная система; в – грузовое нагружение; г – единичное нагружение

Реакции опор при единичном нагружении (см. рисунок 3.10, г):

$$\bar{R}_1 = -2; \quad \bar{R}_2 = 1.$$

Перемещения  $\delta_{11}$ ,  $\Delta_{1P}$  будут равны:

$$\delta_{11} = \sum_{i=1}^2 \frac{\bar{M}_{zi} \cdot \bar{M}_{zi}}{EI_z} dx = \frac{1}{EI_z} \left[ \int_0^{l/2} x^2 dx + \int_0^{l/2} x^2 dx \right] = \frac{2l^3}{3EI_z}; \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} \Delta_{1P} &= \sum_{i=1}^2 \frac{M_{zpi} \cdot \bar{M}_{zi}}{EI_z} dx = \frac{1}{EI_z} \left[ -\int_0^a P_y (b+x) x dx - \int_0^{l/2} P_y \frac{a}{0,5l} x^2 dx \right] = \\ &= -\frac{P_y a \left\{ 3ba + 2 \left[ a^2 + 0,25l^2 \right] \right\}}{6EI_z}, \end{aligned} \quad (3.18)$$

где  $\bar{M}_{zi}$ ,  $M_{zpi}$  – изгибающие моменты на  $i$  – ом участке при единичном и грузовом нагружении (см. рисунок 3.10, в, г).

Подставляя (3.17), (3.18) в (3.16), получим:

$$R_{0p} = X_{lp} = \frac{P_y a \left\{ 3ba + 2 \left[ a^2 + 0,25l^2 \right] \right\}}{4(0,5l)^3}. \quad (3.19)$$

Дифференциальное уравнение упругой линии балки в первом пролёте, угол поворота и прогиб произвольного поперечного сечения (см. рисунок 3.10):

$$\begin{aligned} \frac{d^2 w_P(x)}{dx^2} &= \frac{1}{EI_z} \left[ R_{0p} \cdot x - P_y (x-b) \right]; \\ \theta(x) = \frac{dw_P(x)}{dx} &= \theta_0 + \frac{1}{EI_z} \left[ R_{0p} \cdot \frac{x^2}{2} - P_y \frac{(x-b)^2}{2} \right]; \\ w_P(x) &= w_{P0} + \theta_0 \cdot x + \frac{1}{EI_z} \left[ R_{0p} \frac{x^3}{6} - P_y \frac{(x-b)^3}{6} \right]. \end{aligned}$$

Из граничных условий:  $w_{P0} = w_P|_{x=0} = 0$ .  $\theta_0$  определяем из условия равенства нулю

прогиба на первой опоре:  $w_P|_{x=0,5l} = 0$ :  $\theta_0 = -\frac{1}{EI_z} \left[ R_{0p} \cdot \frac{l^2}{24} - P_y \frac{a^3}{3l} \right]$ .

С учётом постоянных интегрирования угол поворота и прогиб произвольного сечения первого пролёта балки будут равны:

$$\begin{aligned} \theta(x) &= \frac{1}{EI_z} \left\{ \frac{R_{0p}}{2} \left( x^2 - \frac{l^2}{24} \right) - \frac{P_y}{2} \left[ (x-b)^2 - \frac{2a^3}{3l} \right] \right\}; \\ w_P(x) &= \frac{1}{EI_z} \left\{ \frac{R_{0p}}{6} (x^3 - l^2 x) - \frac{P_y}{6} \left[ (x-b)^3 - \frac{a^3 x}{l} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (3.20)$$

Координату сечения с максимальным прогибом в первом пролёте балки  $x_{\max 2}$  определяем из условия равенства нулю угла поворота сечения:

$$\theta|_{x_{\max 2}} = 0: \quad \frac{R_{0p}}{2} \left( x_{\max 2}^2 - \frac{l^2}{24} \right) - \frac{P_y}{2} \left[ (x_{\max 2} - b)^2 - \frac{2a^3}{3l} \right] = 0. \quad (3.21)$$

Приведём уравнение (3.21) к удобному виду:

$$Ax^2 + Bx + C = 0,$$

где  $A = R_{0p} - P_y$ ;  $B = 2bP_y$ ;  $C = -R_{0p} \frac{l^2}{24} - P_y \left( b^2 - \frac{2a^3}{3l} \right)$ .

Решение квадратного уравнения:

$$x_{1,2} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}.$$

Подставляя соответствующее решение квадратного уравнения в уравнение прогиба (3.20), получим величину максимального прогиба в первом пролёте. Задача осложняется тем, что величину максимального прогиба необходимо определять и варьируя координату точки приложения силы  $P_y$  в первом пролёте  $b$  (см. рисунок 3.10).

Решение определяется численным перебором величины  $b$  в пределах  $0,17l \dots 0,28l$ , используя программу *Mathcad*. Пример расчёта для двух пролётной балки ( $n = 2$ ) показан на рисунке 3.11.

Решение получено при  $b = 0,235l$ :

$$w_{p2} = 15,1 \times 10^{-3} \frac{P_y l^3}{EI_z} \times c_2. \quad (3.22)$$

При этом координата максимального прогиба  $x_{\max 2}$  совпадает с координатой точки приложения силы  $b$ :  $x_{\max 2} = 0,235l$ .

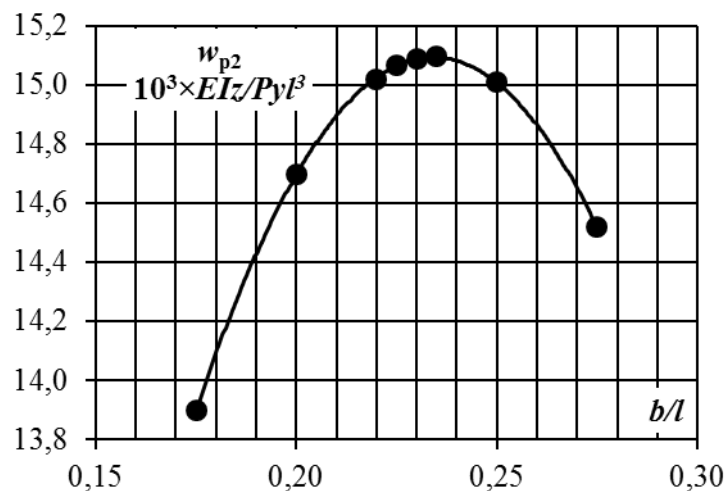


Рисунок 3.11 – Зависимость максимального прогиба  $w_{p2}$  двух пролётной балки от координаты точки приложения силы  $b$  (см. рисунок 3.10)

Реакции опор для расчётной схемы рисунка 3.9 будут равны:

$$R_0 = ql/2 + X_{1p} = ql/2 + 0,438P_y; R_2 = ql/2 + X_{1p} - 2P_y a/l = ql/2 - 0,092P_y;$$

$$R_1 = ql/2 + P_y + 0,092P_y - X_{1p} = ql/2 + 0,654 P_y.$$

Из дифференциального уравнения упругой линии балки (3.4) при  $x_{\max 2} = 0,235l$  получим прогиб от действия усилия притяжения магнитного поля стола станка:

$$w_{q2} = 0,334 \times 10^{-3} \frac{ql^4}{EI_z}.$$

Расчётная схема заготовки при шлифовании с закреплением заготовки магнитным полем стола с двумя компенсаторами показана на рисунке 3.12.

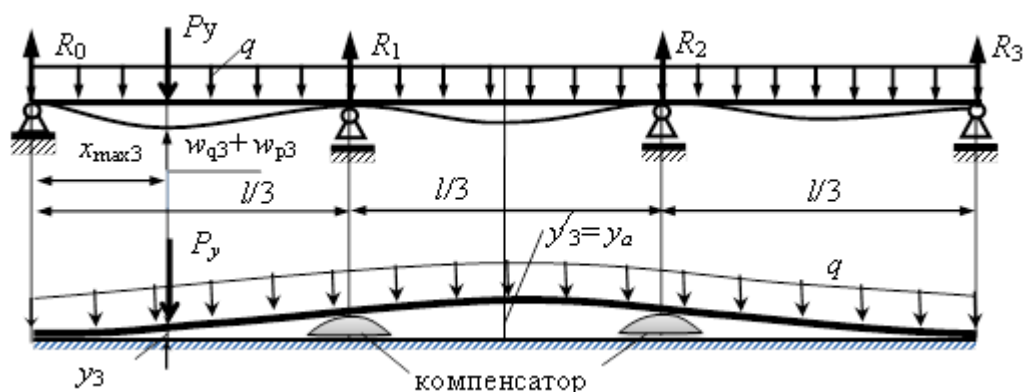


Рисунок 3.12 – Расчётная схема заготовки при шлифовании с закреплением магнитным полем стола станка с двумя компенсаторами

Координату  $b$  положения силы  $P_y$ , соответствующего максимальному прогибу (рисунок 3.13, а), определяем из условия экстремума прогиба в первом пролёте  $\theta|_{x_{\max 3}} = 0$ . Раскрываем статическую неопределимость, используя уравнения трёх моментов.

Статическую неопределимость для эквивалентной системы (рисунок 3.13, б, в) раскрываем, используя уравнение трёх моментов [102]:

$$\begin{cases} 2X_1 \cdot 2\frac{l}{3} + X_2 \cdot \frac{l}{3} = -6 \cdot 0,5P_y \cdot \left( 0,111bl - \frac{b^3}{l} \right); \\ X_1 \cdot \frac{l}{3} + 2X_2 \cdot 2\frac{l}{3} = 0. \end{cases}$$

Решение системы уравнений:

$$X_1 = -2,4P_y(0,111b - b^3/l^2);$$

$$X_2 = 0,6P_y(0,111b - b^3/l^2).$$

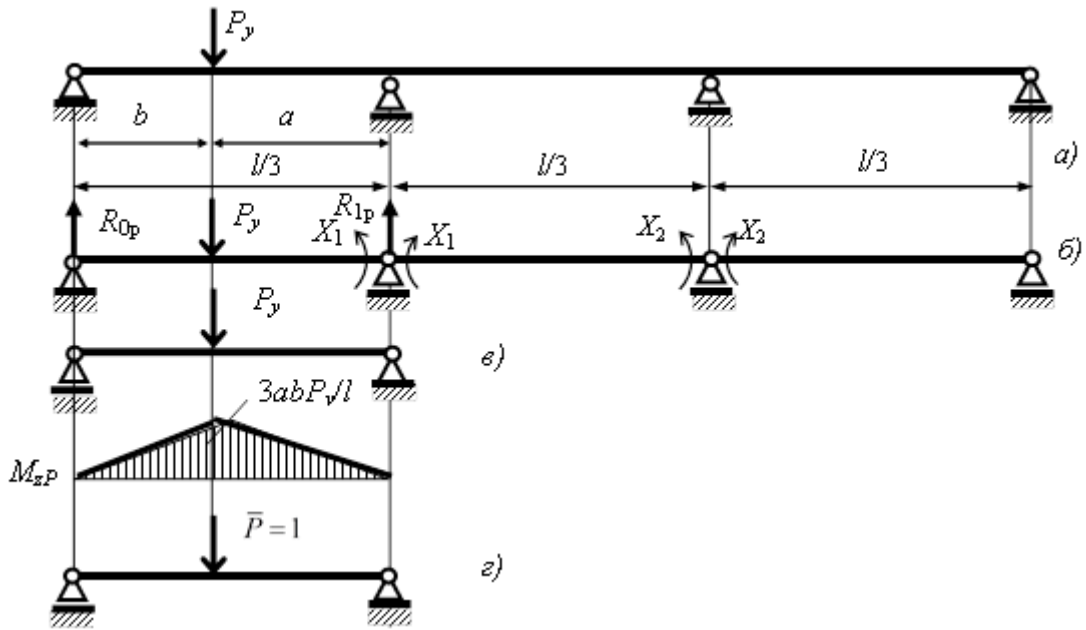


Рисунок 3.13 – Расчётная схема заготовки для определения максимального прогиба в первом пролёте при действии радиальной составляющей силы резания с двумя компенсаторами (а), эквивалентная система (б), грузовое нагружение и эпюра изгибающих моментов (в), единичное нагружение (г)

Реакции опор в эквивалентной системе (см. рисунок 3.13, б):

$$R_{0p} = \frac{3a}{l} P_y + \frac{3X_1}{l} = P_y \left( 1 - \frac{3b}{l} - \frac{7,2}{l} \left( 0,111b - \frac{b^3}{l^2} \right) \right);$$

$$R_{1p} = \frac{3b}{l} P_y - \frac{3X_1}{l} = P_y \left( \frac{3b}{l} + \frac{7,2}{l} \left( 0,111b - \frac{b^3}{l^2} \right) \right).$$

Дифференциальное уравнение упругой линии балки в первом пролёте, угол поворота и прогиб произвольного поперечного сечения:

$$\frac{d^2 w_P(x)}{dx^2} = \frac{1}{EI_z} [R_{0p} \cdot x - P_y(x-b)];$$

$$\theta(x) = \frac{dw_P(x)}{dx} = \theta_0 + \frac{1}{EI_z} \left[ R_{0p} \cdot \frac{x^2}{2} - P_y \frac{(x-b)^2}{2} \right];$$

$$w_P(x) = w_{P0} + \theta_0 \cdot x + \frac{1}{EI_z} \left[ R_{0p} \frac{x^3}{6} - P_y \frac{(x-b)^3}{6} \right].$$

Из граничных условий:  $w_{P0} = w_P|_{x=0} = 0$ .  $\theta_0$  определяем из условия равенства нулю

прогиба на первой опоре:  $w_P|_{x=0,33l} = 0$ ;  $\theta_0 = -\frac{1}{EI_z} \left[ R_{0p} \cdot \frac{l^2}{54} - P_y \frac{a^3}{2l} \right]$ .

С учётом постоянных интегрирования угол поворота и прогиб произвольного сечения первого пролёта балки будут равны:

$$\begin{aligned}\theta(x) &= \frac{1}{EI_z} \left\{ \frac{R_{0p}}{2} \left( x^2 - \frac{l^2}{27} \right) - \frac{P_y}{2} \left[ (x-b)^2 - \frac{a^3}{l} \right] \right\}; \\ w_P(x) &= \frac{1}{EI_z} \left\{ \frac{R_0}{6} \left( x^3 - \frac{l^2 x}{9} \right) - \frac{P_y}{6} \left[ (x-b)^3 - \frac{3a^3 x}{l} \right] \right\}.\end{aligned}\quad (3.23)$$

Координату сечения с максимальным прогибом в первом пролёте балки  $x_{\max 3}$  определяем из условия равенства нулю угла поворота сечения:

$$\theta|_{x_{\max 2}} = 0: \quad \frac{R_{0p}}{2} \left( x_{\max 3}^2 - \frac{l^2}{27} \right) - \frac{P_y}{2} \left[ (x_{\max 3} - b)^2 - \frac{a^3}{l} \right] = 0. \quad (3.24)$$

Приведём уравнение (3.21) к удобному виду:  $Ax^2 + Bx + C = 0$ ,

где  $A = R_{0p} - P_y$ ;  $B = 2bP_y$ ;  $C = -R_0 \frac{l^2}{27} - P_y \left( b^2 - \frac{a^3}{l} \right)$ .

Решение квадратного уравнения:  $x_{1,2} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$ .

Подставляя соответствующее решение квадратного уравнения в уравнение прогиба (3.23), получим величину максимального прогиба в первом пролёте. Задача осложняется тем, что величину максимального прогиба необходимо определять и варьируя координату точки приложения силы  $P_y$  в первом пролёте  $b$  (см. рисунок 3.13). Решение определяется численным перебором величины  $b$  в пределах  $0,11l \dots 0,2l$ , используя программу *Mathcad*. Решение показано на рисунке 3.14.

Решение получено при  $b = 0,16 l$ :

$$w_{p3} = 0,63 \times 10^{-3} \frac{P_y l^3}{EI_z} \times c_3. \quad (3.22)$$

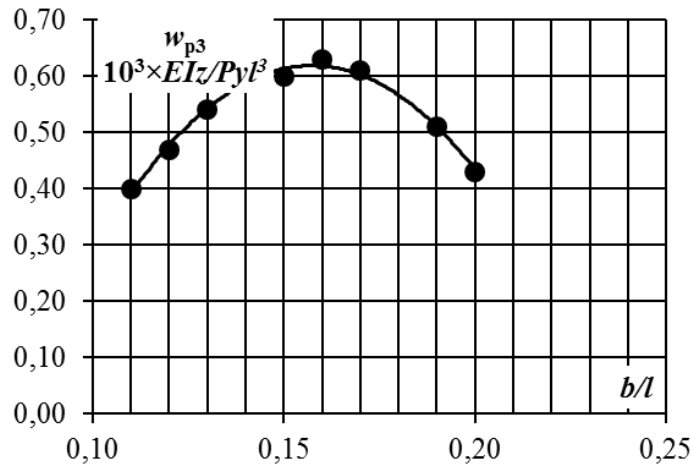


Рисунок 3.14 – Зависимость максимального прогиба  $w_{p3}$  трёх пролётной балки от координаты точки приложения силы  $b$  (см. рисунок 3.13, а)

При этом координата максимального прогиба  $x_{\max 3}$  совпадает с координатой точки приложения силы  $b$ :  $x_{\max 3} = 0,16l$ .

Реакции опор для расчётной схемы рисунка 3.12 будут равны:

$$R_0 = ql/3 + R_{0p} = ql/3 + 0,422P_y;$$

$$R_1 = ql/3 + R_{1p} = ql/3 + 0,578P_y.$$

Из дифференциального уравнения упругой линии балки (3.4) при  $x_{\max 3} = 0,16l$  получим прогиб от действия усилия притяжения магнитного поля

стола:

$$w_{q3} = 0,084 \times 10^{-3} \frac{ql^4}{EI_z}.$$

При использовании двух пар компенсаторов закрытие зазора между поверхностями заготовки и стола станка будет происходить последовательно от первого пролёта к среднему. Если величина максимального прогиба в первом пролёте балки будет равна зазору между поверхностями заготовки и стола  $w_{q3} + w_{p3} = y_3$ , а величина зазора будет меньше или равна допускаемому отклонению от плоскостности  $[\Delta]$ :  $y_3 \leq [\Delta]$ , то дальнейшие расчёты величины максимального прогиба необходимо продолжать в среднем пролёте балки.

При установке двух компенсаторов получим расчётную схему трёх пролётной балки с нагружением силой в середине второго пролёта (рисунок 3.15).



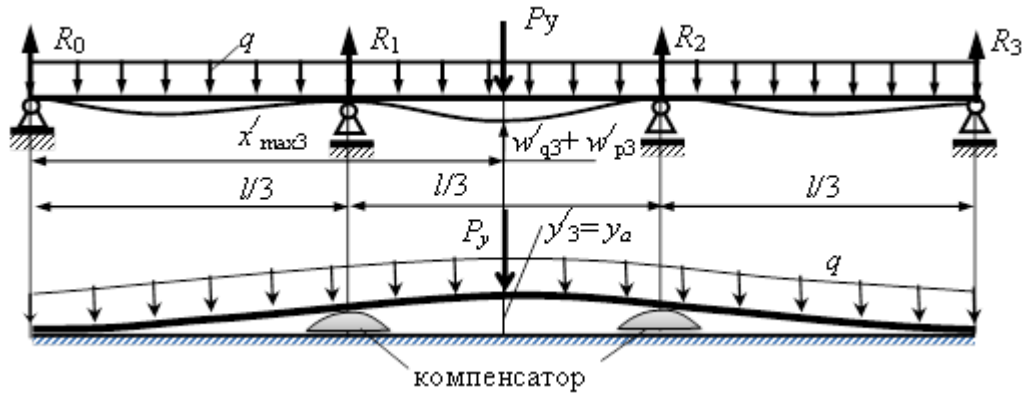


Рисунок 3.15 – Расчётная схема заготовки при закреплении магнитным полем стола станка с двумя компенсаторами при загрузении силой резания в среднем пролёте

Максимальный прогиб будет в среднем пролёте при  $x'_{\max 3} = 0,5l$ . Расстояние между точками касания поверхностей заготовки и стола  $y_3$  определяется по уравнению (3.8):  $y_3 = y_a - w_{к3}$  (см. рисунок 3.15).

Определяем величину максимального прогиба в среднем пролёте  $w_{p3}$  от действия  $P_y$ . Статическую неопределимость для эквивалентной системы (рисунок 3.16) раскрываем, используя уравнение трёх моментов [102]:

$$\begin{cases} 2X_1 \cdot 2\frac{l}{3} + X_2 \cdot \frac{l}{3} = -6 \cdot 0,5 \cdot 0,0833P_y l \cdot 0,167l; \\ X_1 \cdot \frac{l}{3} + 2X_2 \cdot 2\frac{l}{3} = -6 \cdot 0,5 \cdot 0,0833P_y l \cdot 0,167l. \end{cases}$$

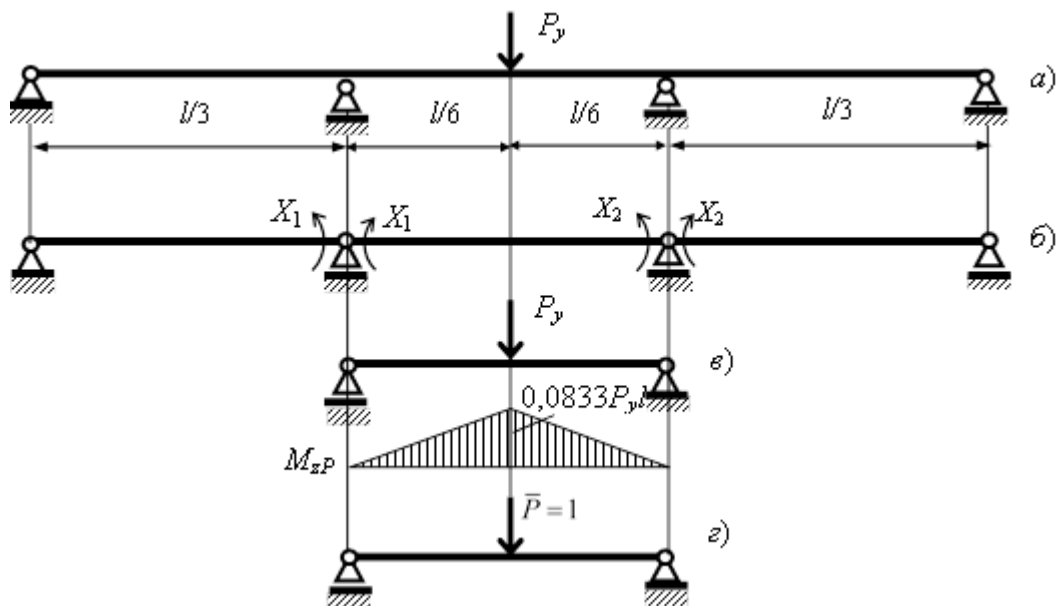


Рисунок 3.16 – Расчётная схема заготовки для определения максимального прогиба в среднем пролёте при действии радиальной составляющей силы резания с двумя компенсаторами (а), эквивалентная система (б), грузовое нагружение и эпюра изгибающих моментов(в), единичное нагружение (г)

После упрощений получим:

$$\begin{cases} 1,33X_1 + 0,333X_2 = -0,04165P_y l; \\ 0,333X_1 + 1,33X_2 = -0,04165P_y l. \end{cases}$$

Решение системы уравнений:  $X_1 = X_2 = -0,025P_y l$ .

Максимальный прогиб в среднем пролёте  $w'_{p3}$  определяем методом Мора, используя единичное нагружение на рисунке 3.16,  $z$ :

$$w'_{p3} = \frac{2 \times c_3}{EI_z} \int_0^{0,167l} (0,5P_y x - 0,025P_y l) 0,5x dx = \frac{0,000428P_y l^3}{EI_z} \times c_3.$$

Координата  $x'_{\max 3} = 0,5l$  (см. рисунок 3.15).

Из дифференциального уравнения упругой линии балки (3.4) при  $x'_{\max 3} = 0,5l$  получим прогиб от действия усилия притяжения магнитного поля стола станка:

$$w'_{q3} = 0,084 \times 10^{-3} \frac{ql^4}{EI_z}.$$

При шлифовании на заготовку совместно действуют усилие резания, усилия притяжения магнитного поля станка, собственного веса заготовки.

Максимальный прогиб при шлифовании с закреплением заготовки магнитным полем стола представлен суммой деформаций в виде:

- в первом пролёте  $w_{qn} + w_{pn} = (a_n ql^4 + b_n c_n P_y l^3) \times 10^{-3} / (EI_z)$ .

- в среднем пролёте  $w'_{qn} + w'_{pn} = (a'_n ql^4 + b'_n c_n P_y l^3) \times 10^{-3} / (EI_z)$ ,

где  $w_{qn}$ ,  $w'_{qn}$  – прогибы от действия усилия притяжения магнитного поля стола станка и собственного веса заготовки в сечении, в котором возникает максимальный прогиб от действия радиальной составляющей усилия резания.

Таблица 3.5 - Расчётные параметры математических моделей максимальных прогибов при шлифовании заготовки с закреплением магнитным полем стола

| Число пролётов, $n$ | $a_n$                   | $b_n$  | $x_{\max n} \times l$ | $y_n \times y_a$ | $b'_n$                   | $a'_n$  | $x'_{\max n} \times l$ | $y'_n \times y_a$ |
|---------------------|-------------------------|--------|-----------------------|------------------|--------------------------|---------|------------------------|-------------------|
|                     | <b>в первом пролёте</b> |        |                       |                  | <b>в среднем пролёте</b> |         |                        |                   |
| $n = 1$             | 13,000                  | 20,800 | 0,500                 | 1,000            | -                        | -       | -                      | -                 |
| $n = 2$             | 0,334                   | 1,890  | 0,235                 | 0,451            | -                        | -       | -                      | -                 |
| $n = 3$             | 0,084                   | 0,630  | 0,160                 | 0,233            | 0,428                    | 0,00643 | 0,500                  | 1,000             |

Величины расчётных параметров математической модели максимальных прогибов при шлифовании заготовки с закреплением магнитным полем стола: коэффициентов  $a_n$ ,  $a'_n$ ,  $b_n$ ,  $b'_n$ ; координат максимального прогиба  $x_{\max n}$  и расстояний между точками касания поверхностей заготовки и стола  $y_n$  в сечении максимального прогиба в зависимости от числа пролётов  $n$  приведены в таблице 3.5.

### 3.4. Определение контактных деформаций

Реальная поверхность заготовки имеет продольную и поперечную волнистость и шероховатость, параметры которых измеряются экспериментально.

Поверхность стола станка в рабочей части имеет шероховатость на порядок меньше, чем у поверхности заготовки, что позволяет при определении контактных деформаций считать стол гладким [126].

Контактная деформация (сближение) складывается из трёх составляющих:

$$w_{\text{кп}} = w_{\text{кп1}} + w_{\text{кп2}} + w_{\text{кп3}},$$

где  $w_{\text{кп1}}$  - контактная деформация (сближение) за счёт деформации микронеровностей,  $w_{\text{кп2}}$  - контактная деформация (сближение) за счёт деформации волн;  $w_{\text{кп3}}$  - контактная деформация (сближение) за счёт деформации макроотклонений.

Для приближенной оценки характера контактной деформации используем критерий (определяется упругий или пластический контакт) [123]:

$$Q_p = \frac{E}{HB} \cdot \sqrt{\frac{Rp}{r_{\text{ш}}}}.$$

При  $Q_p > 3$  контакт является пластическим.

При расчёте учитываем механические свойства более мягкого тела, а шероховатость более твёрдого из контактирующих тел [126].

При пластической деформации контактную деформацию (сближение) за счёт деформации микронеровностей  $w_{\text{кп1}}$  определяем по формуле [16, 17, 123]:

$$w_{\text{кп1}} = Rp \cdot \left( \frac{p_c}{p_r t_m} \right)^{1/v},$$

где, принимаем среднее фактическое давление равным твёрдости материала стола

$p_r = HB$  [16, 123]:

$$\nu = 2t_m \left( \frac{Rp}{Ra} \right) - 1.$$

Контурное давление  $p_c$  в контакте определяем по модели контакта сферической шероховатой волны с плоской поверхностью [29, 172]:

$$p_c = \frac{1}{1,8K_w} \left( \frac{W_{\max}}{2r_w} \cdot \left( \frac{E}{1-\mu^2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2+\delta_w}} \cdot p_a^{\frac{\delta_w}{2+\delta_w}}.$$

Номинальное давление  $p_a$  определяем для наибольшей номинальной нагрузки в контакте.

Начальное макроотклонение от плоскостности аппроксимируется цилиндрической поверхностью с направляющей в виде волны синусоиды характерной длиной  $l$  (см. рисунок 3.5). Радиус выступа макроотклонений определяется аналогично определению данного параметра для волнистости, по формуле [16]:

$$R = \frac{5S_w^2}{32W_p},$$

где  $S_w = 0,5l$  – среднее расстояние между точками пересечения профилограммы со средней линией;  $W_p = 0,5y_a$  – расстояние от вершины наиболее высокой волны макроотклонений до средней линии профилограммы.

Считаем, что первоначальный номинальный контакт заготовки с поверхностью стола будет линейным. Нагрузка в контакте с учётом действия магнитного поля  $P_{qc}$ , массы заготовки  $m$  и радиальной составляющей силы резания  $P_y$  будет равна:

$$P_c = (P_{qc} + mg + P_y)/(n + 1).$$

Величины  $P_{qc}$  и  $P_y$  определяются в соответствии с параметрами оптимальных режимов шлифования. При использовании далее компенсаторов величина нагрузки будет уменьшаться в соответствии с числом дополнительных опор.

Номинальная площадь контакта цилиндрической поверхности с плоскостью стола:  $A_a = bc$ , где  $b$  – ширина грани заготовки,  $c$  – ширина площадки контакта, определяемая по [37]:

$$c = 2\sqrt{R \cdot 1,16 \cdot 10^{-5} q_k} \quad ,$$

где  $q_k = P_c/b$  – распределённая по длине линии контакта нагрузка.

Номинальное давление будет равно:  $p_a = P_c/A_a$ .

Контактная деформация (сближение) за счет деформации волн  $w_{\text{кп2}}$  определяем для контакта волнистой поверхности с плоской по формуле [115]:

$$w_{\text{кп2}} = 3,83 \cdot W_{\text{max}}^{0,8} \cdot r_w^{0,2} \cdot [p_a \cdot (1-\mu^2) \cdot E]^{0,4}.$$

Контактная деформация (сближение) за счет деформации макроотклонений  $w_{\text{кп3}}$  для контактирующей стальной цилиндрической поверхности заготовки радиусом  $R$  со стальной плоскостью стола станка определяется по формуле [37]:

$$w_{\text{кп3}} = 1,16 \cdot 10^{-5} \cdot q_k,$$

где  $q_k = P_c/b$  – распределённая по длине линии контакта нагрузка в Н/мм, а  $w_{\text{кп3}}$  вычисляется в мм.

Максимальная упругая деформация заготовки при шлифовании определяется суммой деформаций:

$$w_{\text{max}} = w_{\text{maxn}} (w'_{\text{maxn}}) = w_{\text{qn}} (w'_{\text{qn}}) + w_{\text{pn}} (w'_{\text{pn}}) + w_{\text{кп}},$$

где  $w_{\text{qn}}, (w'_{\text{qn}})$  – максимальный прогиб заготовки от действия собственного веса и усилия притяжения магнитного поля стола станка, определяемый в зависимости от числа пролётов  $n$ , в первом ( $w_{\text{qn}}$ ) или в среднем ( $w'_{\text{qn}}$ ) пролёте;  $w_{\text{pn}}, (w'_{\text{pn}})$  – максимальный прогиб заготовки от действия радиальной составляющей силы резания, определяемый в зависимости от числа пролётов  $n$ , в первом ( $w_{\text{pn}}$ ) или в среднем ( $w'_{\text{pn}}$ ) пролёте;  $w_{\text{кп}}$  – суммарная упругая контактная деформация.

### **3.5. Алгоритм выбора оптимальных условий плоского шлифования боковых граней призматических заготовок малой жёсткости.**

#### **Условия обеспечения требуемого допуска плоскостности**

Предлагаемый алгоритм выбора оптимальных условий плоского шлифования боковых граней призматических заготовок малой жёсткости предусматривает выделение двух этапов оптимизации процесса. На первом этапе (рисунок 3.17),

заготовку рассматриваем, как абсолютно жёсткую и оптимизацию осуществляем из условия выполнения требований к параметрам качества обработанной поверхности: шероховатость, волнистость, отсутствие шлифовочных прижогов, трещин и др., кроме допуска плоскостности.

С использованием математических моделей составляющих силы резания, параметра шероховатости и т.д. определяются области допустимых значений параметров характеристики абразивного инструмента и режимов, обеспечивающих выполнение требований к качеству обработанной поверхности.

Целевая функция оптимизации [76, 84] – наибольшая производительность обработки при условии расположения в области допустимых значений входных параметров  $[x_i]$ :  $\max Q(x), x \in [x]$ .

Область допустимых значений  $[x_i]$  представляет собой совокупность функциональных и прямых ограничений:

$$\Phi(x_i) = \begin{cases} Ra(x_i) \leq [Ra]; \\ P_z(x_i) \leq [P_z]; \\ \dots \end{cases} \quad [x] = \{\Phi(x_i) \geq 0, x_{i \min} \leq x_i \leq x_{i \max}\};$$

$x_i = \{\text{характеристики шлифовального круга: твёрдость - } c_1; \text{ зернистость; структура; абразивный материал; вид связки; ...; режимные параметры: радиальная подача - } S_p; \text{ скорость подачи стола - } v_s; \dots\}$ , где  $[Ra]$  – допускаемая величина параметра шероховатости;  $[P_z]$  – допускаемая величина составляющей силы резания, обеспечивающая безприжоговое шлифование.

Прямые ограничения определяются особенностями шлифования призматических заготовок малой жёсткости:  $c_1$  – твёрдость шлифовального круга;  $S_p$  – радиальная подача;  $v_s$  – скорость подачи стола;  $F$  – зернистость шлифовального круга и т.д.

Полученные оптимальные параметры определяют первый режим шлифования – **режим 1**.

Требуемый допуск плоскостности обеспечивается на втором этапе ограничением величины упругой деформации заготовки при закреплении и обработке.

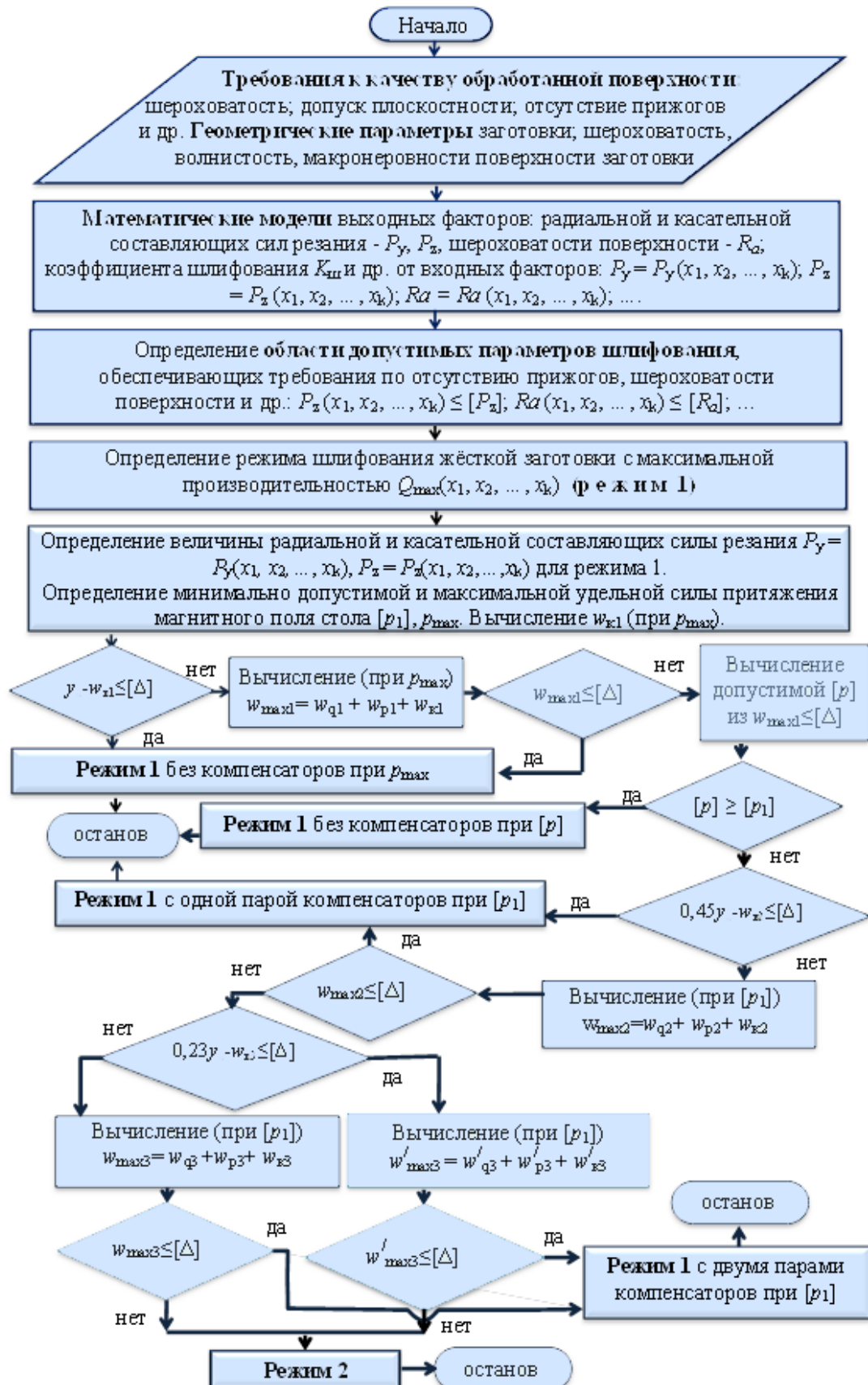


Рисунок 3.17 – Алгоритм выбора оптимальных условий плоского шлифования, обеспечивающих достижение требуемого качества, в том числе, допуска плоскостности обработанной поверхности

Варьируемыми параметрами здесь являются сила притяжения магнитного поля стола и жёсткость заготовки при изгибе (см. рисунок 3.17).

Условия обеспечения требуемого допуска плоскостности обработанной поверхности ограничивают максимальную упругую деформацию от действия магнитного поля, собственного веса заготовки, усилия резания  $w_{\max}$  допускаемой величиной максимальной упругой деформацией  $[\Delta]$  [59]:  $w_{\max} \leq [\Delta]$ , где  $[\Delta] = \lambda\Delta - \Delta_T$ ,  $\lambda$  - коэффициент точности при проектировании, принимаемый равным 0,75 [4];  $\Delta$  - допуск плоскостности поверхности на операции шлифования;  $\Delta_T$  - достижимое отклонение от плоскостности обработанной поверхности при шлифовании жёсткой заготовки. Для определения величины максимальных упругих деформаций при закреплении и шлифовании заготовки необходима математическая модель, учитывающая контактные деформации поверхностей заготовки и стола, форму поперечного сечения и жёсткость заготовки при изгибе.

Условия обеспечения требуемого допуска плоскостности обработанной поверхности заготовки при режиме 1 (шлифование заготовки с наибольшей производительностью при оптимальных условиях для жёсткой заготовки):

$$y_a - w_{k1} \leq [\Delta]; w_{\max1} \leq [\Delta], \quad (3.23)$$

реализуется шлифование на режиме 1 при максимальном удельном усилии притяжения магнитного поля стола  $p_{\max}$ ;

$$[p] \geq [p_1], \quad (3.24)$$

реализуется шлифование на режиме 1 при допустимом удельном усилии притяжения магнитного поля стола  $[p]$ , определяемом из условия  $w_{\max1} \leq [\Delta]$ ;

$$0,45y_a - w_{k2} \leq [\Delta]; w_{\max2} \leq [\Delta], \text{ расчет при } [p_1], \quad (3.25)$$

реализуется шлифование на режиме 1 при минимально допустимом удельном усилии притяжения магнитного поля стола  $[p_1]$  с одной парой компенсаторов;

$$0,23y_a - w_{k3} \leq [\Delta]; w_{\max3} \leq [\Delta]; w'_{\max3} \leq [\Delta], \text{ расчет при } [p_1], \quad (3.26)$$

реализуется шлифование на режиме 1 при минимально допустимом удельном усилии притяжения магнитного поля стола  $[p_1]$  с двумя компенсаторами.



Если условия (3.26) не выполняются, реализуется режим 2 – шлифование с дополнительными переходами. Параметры процесса шлифования соответствуют режиму 1, но время шлифования возрастает в среднем на 40 %.

### 3.6. Выводы

1. Определено совокупное влияние формы и размеров поперечного сечения, длины заготовки направляющих линейных подшипников малой жесткости, силовых факторов (веса заготовки, магнитного притяжения стола станка, силы резания), количества опорных контактов поверхностей заготовки и стола станка, изменения изгибной жесткости заготовки при использовании компенсаторов и контактной деформации на величину максимальной упругой деформации заготовки. Разработана математическая модель максимальной упругой деформации призматической заготовки малой жесткости, основанная на теории изгиба балок, учитывающая:

- совокупность силовых факторов (силу резания, силу притяжения магнитного поля стола станка, собственный вес заготовки);
- количество опорных контактов соприкасающихся поверхностей заготовки и стола станка;
- форму поперечного сечения заготовки;
- увеличение изгибной жесткости заготовки при использовании компенсаторов;
- контактную деформацию реальных поверхностей.

2. Разработан алгоритм выбора оптимальных условий плоского шлифования, обеспечивающих достижение требуемого качества, в том числе, допуска плоскостности обработанной поверхности боковых граней призматических направляющих линейных подшипников малой жёсткости при наибольшей производительности процесса плоского шлифования.

#### 4. МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЫХОДНЫХ ФАКТОРОВ, МАКСИМАЛЬНЫХ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ ДЛЯ УСЛОВИЙ ШЛИФОВАНИЯ НАПРАВЛЯЮЩЕЙ ЛИНЕЙНОГО ПОДШИПНИКА ЛРХ 6/350

##### 4.1 План факторного эксперимента типа $2^3$

Планирование эксперимента, требования к входным факторам, этапы планирования подробно описаны в работах [1, 82, 83, 103 и др.].

В данной работе рассматривался процесс плоского врезного шлифования заготовки, изготовленной из цементированной, закаленной стали 20Х. В результате исследований необходимо было получить математические модели приведенных к единице ширины обрабатываемой поверхности составляющих силы резания,  $(p_y, p_z)$ , шероховатости обработанной поверхности (параметр  $Ra$ ). Произвести оценку влияния составляющей силы резания  $P_y$  на величину упругих деформаций в материале обрабатываемой заготовки при шлифовании. Величину составляющей силы резания  $P_z$  будем использовать в дальнейшем в качестве критерия, определяющего вероятность образования шлифовочных прижогов [107].

В качестве абразивного инструмента использовали шлифовальные круги одинаковой геометрии и зернистости, отличающиеся твердостью.

В результате литературного поиска и предварительных экспериментов при моделировании процесса механической обработки шлифованием в качестве входных факторов выбраны [31, 39, 77, 86, 121]:  $c_1 (x_1)$  – твердость шлифовального круга, определяемая звуковым методом по приведенной скорости распространения акустических волн, м/с (ГОСТ Р 52710);  $S_p (x_2)$  – радиальная подача, мм/х;  $v_s (x_3)$  – скорость подачи стола, м/мин.

Параметры, указанные в скобках, являются условными обозначениями кодированных значений факторов. Зернистость шлифовального круга  $F70$  (ГОСТ Р 52381-2005).

Диапазоны варьирования входных факторов были выбраны с учётом производственного опыта и имеют границы:  $c_1$  - от 4500 м/с (К) до 4900 м/с (L);  $S_p$  - от 0,01 до 0,02 мм/х;  $v_s$  - от 10 до 20 м/мин.

Число параллельных опытов – 3. Регулировку режимов резания при шлифовании производили на станке.

#### 4.2 Регрессионные модели составляющих силы резания

При изготовлении призматических направляющих линейных подшипников малой жесткости возникает множество трудностей, связанных с получением требуемых параметров точности поверхностей. При шлифовании плоских граней с начальным отклонением от плоскостности, полученным при термообработке или предшествующих шлифованию операциях, под действием силы притяжения магнитного поля стола станка и усилий резания в заготовке возникают упругие деформации. После завершения обработки и раскрепления заготовки упругие деформации возвращают определенную часть отклонения от плоскостности. Таким образом, необходимо обеспечить такой процесс шлифования, при котором остаточные упругие деформации не превышали бы величины допустимого отклонения от плоскостности.

Для исследования вышеуказанных проблем, связанных с получением требуемой точности при шлифовании плоских поверхностей призматических деталей малой жесткости проводились опыты, в которых рассматривался процесс шлифования образца, изготовленного из материала сталь 20Х. Размеры образца - 120×45×10 мм.

Рассмотрим процесс плоского врезного шлифования заготовки из материала сталь 20Х. Параметром оптимизации взята составляющая силы шлифования  $P_y$ , так как она оказывает наибольшее влияние на возникновение упругих деформаций в вертикальном направлении.

Значения уровней и интервалов варьирования факторов, рассмотренных ранее, приведены в табл. 4.1.

Изменение твердости круга обеспечивалось путем замены инструментов.

Для уменьшения влияния случайных ошибок работа выполнялась в одно время суток и одним исследователем.

Для планирования эксперимента применяли метод полного факторного эксперимента, так как он является наиболее распространенным и достаточно точным. Методика расчета взята из источника [103] и применялась для расчета радиальной и нормальной составляющих силы резания при шлифовании. Для расчета использовались значения сил, приведенные к 1 мм обработанной поверхности образца.

Таблица 4.1 - Кодирование факторов

| Наименование и обозначение факторов                  | Уровни варьирования |      |      | Интервал варьирования | Шаг варьирования |
|------------------------------------------------------|---------------------|------|------|-----------------------|------------------|
|                                                      | -1                  | 0    | +1   |                       |                  |
| Твердость круга – $c_1(x_1)$ , м/с (звуковой индекс) | 4500                | 4700 | 4900 | 400                   | 200              |
| Радиальная подача – $S_p(x_2)$ , мкм/х               | 10                  | 15   | 20   | 10                    | 5                |
| Скорость подачи – $v_s(x_3)$ , м/мин                 | 10                  | 15   | 20   | 10                    | 5                |

Рассмотрим ПФЭ для нормальной составляющей силы  $P_y$  при встречном шлифовании. В работе проводился эксперимент типа  $2^3$ . Число факторов  $k = 3$ , число уровней  $p = 2$ , число опытов  $N = 8$ , число повторных опытов  $m = 3$ .

Матрица планирования эксперимента приведена в таблице 4.2.

После проведения экспериментов была выполнена статистическая обработка результатов.

Среднеквадратичное отклонение (дисперсия) определяют по выражению:

$$S_i^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y}_i)^2}{m-1}, \quad (4.1)$$

Таблица 4.2 - Матрица планирования эксперимента

| Номер опыта | Факторы       |               |               | Функция отклика |
|-------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|
|             | $x_1$         | $x_2$         | $x_3$         |                 |
|             | $c_1$ , м/сек | $S_p$ , мкм/х | $v_s$ , м/мин | $p_y$ , Н/мм    |
| 1           | -1            | -1            | -1            | $y_1$           |
| 2           | -1            | -1            | -1            | $y_2$           |
| 3           | -1            | -1            | 1             | $y_3$           |
| 4           | -1            | -1            | 1             | $y_4$           |
| 5           | -1            | 1             | -1            | $y_5$           |
| 6           | -1            | 1             | -1            | $y_6$           |
| 7           | -1            | 1             | 1             | $y_7$           |
| 8           | -1            | 1             | 1             | $y_8$           |

где  $\bar{y}_i$  - среднее арифметическое значение параметра оптимизации из трех повторных опытов.

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{i=1}^m y_i}{m} \quad (4.2)$$

Для проверки однородности среднеквадратических отклонений (выборочных дисперсий) используют критерий Кохрена. Для этого составляется отношение максимальной дисперсии к сумме всех дисперсий:

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2} ; \quad (4.3)$$

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2} = \frac{10,1}{48,81} = 0,207 .$$

Полученное отношение сравнивали с табличным:  $G_{1-p}(f_1, f_2)$ , где  $p = 0,95$ ; число степеней свободы  $f_1 = m - 1 = 3 - 1 = 2$ ;  $f_2 = N = 8$ .

Таким образом  $G_{\text{табл}} = 0,516$ . Условие  $G < G_{\text{табл}}$  выполняется, следовательно, дисперсии однородны.

В этом случае в качестве оценки для дисперсии воспроизводимости можно взять среднюю дисперсию с числом степеней свободы  $f_{\text{воспр}} = N(m - 1)$ :

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_i^2}{N} ; \quad (4.4)$$

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_i^2}{N} = \frac{48,81}{8} = 6,1.$$

С учетом парных взаимодействий математические модели выходных факторов процесса механической обработки шлифованием искали в следующем общем виде:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots + b_{12}x_1x_2 + b_{23}x_2x_3 + \dots + b_{123}x_1x_2x_3,$$

где  $y$  – выходной фактор;  $x$  – кодированное значение входного фактора;  $b$  – коэффициенты полинома.

Коэффициенты регрессии при полном факторном эксперименте определяют по формуле:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} \bar{y}_i}{N}. \quad (4.5)$$

Рассчитанные коэффициенты регрессии сведены в таблице 4.3.

Определим ошибку коэффициентов:

$$S_{b_j} = \sqrt{\frac{S_{\text{воспр}}^2}{N \cdot m}}; \quad (4.6)$$

$$S_{b_j} = \sqrt{\frac{6,1}{8 \cdot 3}} = 0,51.$$

Значимость коэффициентов регрессии проверяется по критерию Стьюдента. В условиях нулевой гипотезы, отношение абсолютной величины коэффициента уравнения регрессии к его ошибке имеет распределение Стьюдента. Для всех коэффициентов уравнения составляется  $t$ -отношение:

$$t_j = \frac{|b_j|}{S_{b_j}}, \quad (4.7)$$

которое сравнивается с табличным  $t_{1-p}(f)$ . Для уровня значимости  $p = 0,95$  и числа степеней свободы  $f = N(m - 1) = 8(3 - 1) = 16$   $t_{\text{табл}} = 2,12$ .

Таблица 4.3 - Коэффициенты уравнения регрессии для  $P_y$

| Коэффициент регрессии | Числовое значение |
|-----------------------|-------------------|
| $b_0$                 | 22,1              |
| $b_1$                 | 1,35              |
| $b_2$                 | -2,29             |
| $b_3$                 | 1,21              |
| $b_{12}$              | -1,12             |
| $b_{13}$              | 0,54              |
| $b_{23}$              | -3,01             |
| $b_{123}$             | 1,52              |

Данные расчета  $t$ -отношений сведены в таблицу 4.4.

Если  $t_j < t_{\text{табл}}$ , то принимается гипотеза равенства нулю генерального коэффициента регрессии, а соответствующий выборочный коэффициент как незначи-

мый отсеивается из уравнения регрессии. Из таблицы 4.5 видно, что  $t_{1,3}$  меньше  $t_{\text{табл}}$ , следовательно условие не выполняется. При этом в виду ортогональности

Таблица 4.4 - Расчетные значения критерия Стьюдента для  $P_y$

| $t$ -отношение | Числовое значение |
|----------------|-------------------|
| $t_0$          | 43,85             |
| $t_1$          | 2,68              |
| $t_2$          | -4,54             |
| $t_3$          | 2,4               |
| $t_{12}$       | -2,22             |
| $t_{13}$       | -1,07             |
| $t_{23}$       | -5,97             |
| $t_{123}$      | 3,02              |

матрицы планирования остальные коэффициенты не приходится пересчитывать.

Таким образом, отсеивается коэффициент регрессии  $b_{1,3}$ . Уравнение регрессии будет иметь следующий вид:

$$y = 22,1 + 1,35 \cdot x_1 - 2,29 \cdot x_2 + 1,21 \cdot x_3 - 1,12 \cdot x_4 - 3,01 \cdot x_6 + 1,52 \cdot x_7.$$

Проверяем адекватность уравнения регрессии по критерию Фишера. Для этого составляется дисперсионное отношение

$$F = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\text{воспр}}^2}, \quad (4.8)$$

где  $S_{\text{ад}}^2$  – дисперсия адекватности, зависящая от разности между значениями параметра, рассчитанными по математической модели, и экспериментальными результатами определения параметра и рассчитывается по формуле:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{m \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - y_i)^2}{N - l}, \quad (4.9)$$

где  $l$  – число значимых коэффициентов в уравнении регрессии.

Подставив численные значения, получим:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{3 \cdot 2,33}{8 - 7} = 6,99; \quad F = \frac{6,99}{6,1} = 1,147.$$

Полученное отношение сравнивается с табличным:  $F_{1-p}(f_1, f_2)$ , где уровень значимости  $p = 0,95$ ; число степеней свободы дисперсии адекватности  $f_1 = N - l =$

$8 - 7 = 1$ ; число степеней свободы дисперсии воспроизводимости  $f_2 = N(m - 1) = 8(3 - 1) = 16$ . Таким образом  $F_{\text{табл}} = 4,49$ .

Выполнено условие  $F < F_{\text{табл}}$ , следовательно, модель адекватна.

Окончательный вид уравнения регрессии:

$$P_y = 22,1 + 1,35 \cdot x_1 - 2,29 \cdot x_2 + 1,21 \cdot x_3 - 1,12 \cdot x_1 x_2 - 3,01 \cdot x_2 x_3 + 1,52 \cdot x_1 x_2 x_3.$$

Коэффициенты при переменных указывают на силу влияния факторов. В данном случае наибольшее влияние из основных факторов оказывают радиальная подача, скорость подачи стола и твердость круга. Использование кругов меньшей твердости приводит к уменьшению составляющей силы резания  $P_y$ . Увеличение радиальной подачи приводит к уменьшению составляющей силы резания  $P_y$ . Увеличение скорости подачи стола приводит к увеличению составляющей силы резания  $P_y$ .

Из факторов взаимодействия наибольшее влияние оказывают фактор двойного ( $S_p \times v_s$ ) и фактор тройного ( $c_1 \times S_p \times v_s$ ) взаимодействия. При уменьшении фактора двойного взаимодействия сила  $P_y$  увеличится, а при уменьшении фактора тройного взаимодействия сила  $P_y$  уменьшится.

При получении модели для тангенциальной составляющей силы резания  $P_z$  при встречном шлифовании также были учтены все возможные факторы взаимодействия. Рассчитанные коэффициенты регрессии при полном факторном эксперименте представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Коэффициенты уравнения регрессии для  $P_z$

| Коэффициент регрессии | Числовое значение |
|-----------------------|-------------------|
| $b_0$                 | 7,78              |
| $b_1$                 | 1,58              |
| $b_2$                 | 0,19              |
| $b_3$                 | 0,88              |
| $b_{12}$              | -0,59             |
| $b_{13}$              | 0,54              |
| $b_{23}$              | -0,64             |
| $b_{123}$             | 0,92              |

Определим ошибку коэффициентов:



$$S_{b_j} = \sqrt{\frac{S_{\text{воспр}}^2}{N \cdot m}} = \sqrt{\frac{0,97}{8 \cdot 3}} = 0,201.$$

Данные расчета  $t$ -отношений сведены в таблицу 4.6.

Таблица 4.6 - Расчетные значения критерия Стьюдента для  $P_y$

| $t$ -отношение | Числовое значение |
|----------------|-------------------|
| $t_0$          | 38,71             |
| $t_1$          | 7,86              |
| $t_2$          | 0,95              |
| $t_3$          | 4,38              |
| $t_{12}$       | -2,94             |
| $t_{13}$       | 2,69              |
| $t_{23}$       | -3,18             |
| $t_{123}$      | 4,58              |

Если  $t_j < t_{\text{табл}}$  ( $t_{\text{табл}} = 2,12$ ), то принимается гипотеза равенства нулю генерального коэффициента регрессии, а соответствующий выборочный коэффициент как незначимый отсеивается из уравнения регрессии. Из таблицы 4.5 видно, что  $t_2$  меньше  $t_{\text{табл}}$ , следовательно условие не выполняется. При этом в виду ортогональности матрицы планирования остальные коэффициенты не приходится пересчитывать. Таким образом, отсеивается коэффициент регрессии  $b_2$ . Уравнение регрессии будет иметь следующий вид:

$$y = 7,78 + 1,58 \cdot x_1 + 0,88 \cdot x_3 - 0,59 \cdot x_4 + 0,54 \cdot x_5 - 0,64 \cdot x_6 + 0,92 \cdot x_7.$$

Для проверки однородности среднеквадратических отклонений (выборочных дисперсий) используют критерий Кохрена. Для этого составляется отношение максимальной дисперсии к сумме всех дисперсий:

$$G = \frac{S_{\text{max}}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2} = \frac{2,21}{7,79} = 0,285.$$

Полученное отношение сравнивается с табличным:  $G_{1-p}(f_1, f_2)$ , где  $p = 0,95$ ; число степеней свободы  $f_1 = m - 1 = 3 - 1 = 2$ ;  $f_2 = N = 8$ .

Таким образом  $G_{\text{табл}} = 0,516$ .

Выполнено условие  $G < G_{\text{табл}}$ , следовательно, дисперсии однородны.

Тогда в качестве оценки для дисперсии воспроизводимости можно взять среднюю дисперсию

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_i^2}{N} = \frac{7,79}{8} = 0,98$$

с числом степеней свободы  $f_{\text{воспр}} = N(m - 1)$ .

Проверяем адекватность уравнения регрессии по критерию Фишера:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{3 \cdot 0,289}{8 - 7} = 0,87; \quad F = \frac{0,87}{0,98} = 0,89.$$

Полученное отношение сравнивается с табличным:  $F_{1-p}(f_1, f_2)$ , где уровень значимости  $p = 0,95$ ; число степеней свободы дисперсии адекватности  $f_1 = N - l = 8 - 7 = 1$ ; число степеней свободы дисперсии воспроизводимости  $f_2 = N(m - 1) = 8(3 - 1) = 16$ .

Таким образом  $F_{\text{табл}} = 4,49$ .

Выполнено условие  $F < F_{\text{табл}}$ , следовательно, модель адекватна.

Окончательный вид уравнения регрессии при встречном шлифовании:

$$P_z = 7,78 + 1,58x_1 + 0,88x_3 - 0,59x_1x_2 + 0,54x_1x_3 - 0,64x_2x_3 + 0,92x_1x_2x_3.$$

В данном случае наибольшее влияние из основных факторов на составляющую силы шлифования  $P_z$  оказывают твердость круга и скорость подачи стола. С уменьшением твердости и скорости подачи стола сила  $P_z$  уменьшается. Из факторов взаимодействия наибольшее влияние при шлифовании оказывают фактор двойного ( $S_p \times v_s$ ) и тройного ( $c_1 \times S_p \times v_s$ ) взаимодействия.

### **4.3 Регрессионные модели шероховатости обработанной поверхности (параметр $Ra$ ) и коэффициента шлифования**

Для расчета математической модели шероховатости обработанной поверхности используем ту же методику, что и для расчета сил резания.

Данные, полученные в результате измерений, обрабатываются с помощью специальной программы Профиль. Результат, обработанных программой параметров шероховатости сохраняются в файле с расширением .xls.

Значения параметра шероховатости  $Ra$  определялись по 20 точкам. Проверяем значения на однородность. Находим средние значения в каждом опыте.

Проводился эксперимент типа  $2^3$ , где число факторов  $k = 3$ , число уровней  $p = 2$ , число опытов  $N = 8$ , число повторных опытов  $m = 3$ . При составлении плана проведения экспериментов (матрицы планирования) были учтены все возможные факторы взаимодействия.

Матрица планирования приведена в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Матрица планирования эксперимента

| Номер опыта | Факторы       |               |               | Функция отклика |
|-------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|
|             | $x_1$         | $x_2$         | $x_3$         | $y$             |
|             | $c_1$ , м/сек | $S_p$ , мкм/х | $v_s$ , м/мин | $R_a$ , мкм     |
| 1           | -1            | -1            | -1            | $y_1$           |
| 2           | -1            | -1            | 1             | $y_2$           |
| 3           | -1            | 1             | -1            | $y_3$           |
| 4           | -1            | 1             | 1             | $y_4$           |
| 5           | 1             | -1            | -1            | $y_5$           |
| 6           | 1             | -1            | 1             | $y_6$           |
| 7           | 1             | 1             | -1            | $y_7$           |
| 8           | 1             | 1             | 1             | $y_8$           |

После проведения опытов выполнена статистическая обработка результатов. Для проверки однородности среднеквадратических отклонений (выборочных дисперсий) используют критерий Кохрена. Для этого составляется отношение максимальной дисперсии к сумме всех дисперсий:

$$G = \frac{0,00253}{0,0147} \approx 0,172.$$

Полученное отношение сравнивается с табличным:  $G_{1-p}(f_1, f_2)$ , где  $p = 0,95$ ; число степеней свободы  $f_1 = m - 1 = 3 - 1 = 2$ ;  $f_2 = N = 8$ .

Таким образом  $G_{\text{табл}} = 0,516$ .

Выполнено условие  $G < G_{\text{табл}}$ , следовательно, дисперсии однородны.

Тогда в качестве оценки для дисперсии воспроизводимости можно взять среднюю дисперсию

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{0,0147}{8} = 0,0018$$

с числом степеней свободы  $f_{\text{воспр}} = N(m-1) = 8(3-1) = 16$ .

Рассчитанные коэффициенты регрессии сведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Коэффициенты уравнения регрессии для  $Ra$

| Коэффициент регрессии | Числовое значение |
|-----------------------|-------------------|
| $b_0$                 | 1,46              |
| $b_1$                 | -0,25             |
| $b_2$                 | 0,3               |
| $b_3$                 | 0,3               |
| $b_{12}$              | -0,17             |
| $b_{13}$              | -0,2              |
| $b_{23}$              | 0,003             |
| $b_{123}$             | 0,00044           |

Определим ошибку коэффициентов:

$$S_{b_j} = \sqrt{\frac{S_{\text{воспр}}^2}{N \cdot m}} = \sqrt{\frac{0,0018}{8 \cdot 3}} = 0,00875.$$

Значимость коэффициентов регрессии проверяется по критерию Стьюдента. В условиях нулевой гипотезы отношение абсолютной величины коэффициента уравнения регрессии к его ошибке имеет распределение Стьюдента. Для всех коэффициентов уравнения составляется  $t$ -отношение, которое сравнивается с табличным  $t_{1-p}(f)$  для уровня значимости  $p = 0,95$  и числа степеней свободы  $f = N(m-1) = 8(3-1) = 16$ .

Таким образом  $t_{\text{табл}} = 2,12$ .

Данные расчета  $t$ -отношений сведены в таблицу 4.9.

Если  $t_j < t_{\text{табл}}$ , то принимается гипотеза равенства нулю генерального коэффициента регрессии, а соответствующий выборочный коэффициент как незначимый отсеивается из уравнения регрессии.

Из таблицы 4.9 видно, что  $t_6$  и  $t_7$  меньше  $t_{\text{табл}}$ , следовательно условие не выполняется. При этом в виду ортогональности матрицы планирования остальные коэффициенты не приходится пересчитывать.

Таблица 4.9 – Расчетные значения критерия Стьюдента для  $Ra$ 

| $t$ -отношение | Числовое значение |
|----------------|-------------------|
| $t_0$          | 100,32            |
| $t_1$          | 17,57             |
| $t_2$          | 20,496            |
| $t_3$          | 20,29             |
| $t_{1,2}$      | 11,62             |
| $t_{13}$       | 13,66             |
| $t_{23}$       | 0,205             |
| $t_{123}$      | 0,298             |

Таким образом, отсеиваются следующие коэффициенты регрессии:  $b_6$  и  $b_7$ .  
Уравнение регрессии будет иметь следующий вид:

$$y = 1,46 - 0,25 \cdot x_1 + 0,3 \cdot x_2 + 0,3 \cdot x_3 - 0,17 \cdot x_4 - 0,2 \cdot x_5.$$

Проверяем адекватность уравнения регрессии по критерию Фишера:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{3 \cdot 0,0021}{8 - 6} = 0,0031; \quad F = \frac{0,0031}{0,0018} = 1,72.$$

Полученное отношение сравнивается с табличным:  $F_{1-p}(f_1, f_2)$ , где уровень значимости  $p = 0,95$ ; число степеней свободы дисперсии адекватности  $f_1 = N - l = 8 - 6 = 2$ ; число степеней свободы дисперсии воспроизводимости  $f_2 = N(m - 1) = 8(3 - 1) = 16$ .

Таким образом  $F_{\text{табл}} = 3,63$ . Выполнено условие  $F < F_{\text{табл}}$ , следовательно, модель адекватна. Окончательный вид уравнения регрессии:

$$Ra = 1,46 - 0,25x_1 + 0,30x_2 - 0,17x_1x_2 - 0,20x_1x_3 + 0,30x_3$$

Коэффициенты при переменных указывают на то, какое влияние на параметр шероховатости  $Ra$  оказывает тот или иной фактор. В данном случае наибольшее влияние из основных факторов оказывает радиальная подача ( $S_p$ ) и скорость подачи стола  $v_s$ , причем с увеличением каждого из данных факторов шероховатость тоже увеличивается. Из факторов взаимодействия наибольшее влияние оказывают фактор двойного ( $c_1 \times v_s$ ) взаимодействия, при этом данный фактор имеет обратную зависимость с шероховатостью поверхности.

Таблица 4.10 – Расчетные и табличные значения критерия Фишера

| Выходные параметры | $S_{ад}^2$ | $F_{расчетный}$ | $F_{табличный}$ |
|--------------------|------------|-----------------|-----------------|
| $p_y$ , Н/мм       | 18,33      | 2,85            | 4,49            |
| $p_z$ , Н/мм       | 2,89       | 2,97            | 4,49            |
| Ra, мкм            | 0,00615    | 3,41            | 3,63            |

Для окончательной проверки адекватности полученных математических моделей были проведены опыты в центре матрицы планирования эксперимента, то есть при равенстве нулю кодированных значений факторов.

Сравнение полученных по результатам экспериментов дисперсий адекватности с ранее найденными дисперсиями воспроизводимости по критерию Фишера при 5%-ном уровне значимости показало их однородность (таблица 4.10), что свидетельствует об адекватности разработанных математических моделей.

#### 4.4. Определение контактных деформаций для направляющей линейного подшипника

Реальная поверхность заготовки имеет продольную и поперечную волнистость и шероховатость. Шероховатость поверхности определяли с помощью профилографа-профилометра «СЕЙТРОНИК ПШ8-4 С.С.». Волнистость поверхности образца измеряли с помощью профилографа FORM TALYSURF INTRA.

Для исследуемой заготовки направляющей параметры волнистости и шероховатости боковой поверхности определены экспериментально перед операцией шлифования и приведены в таблицах 4.11 и 4.12.

Таблица 4.11 – Параметры волнистости боковой поверхности заготовки направляющей

| Продольная                                          |                                           |                                                           | Поперечная                                         |                                          |                                                          | Расчётный<br>(приведённый)<br>радиус<br>кривизны<br>$r_w$ ,<br>мм |
|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| наибольшая<br>высота волн<br>$W_{\max пр}$ ,<br>мкм | средний<br>шаг волн<br>$S_{w пр}$ ,<br>мм | средний<br>радиус кривизны<br>выступов<br>$r_{w пр}$ , мм | наибольшая<br>высота волн<br>$W_{\max п}$ ,<br>мкм | средний<br>шаг волн<br>$S_{w п}$ ,<br>Мм | средний<br>радиус кривизны<br>выступов<br>$r_{w п}$ , мм |                                                                   |
| 4,1                                                 | 3                                         | 50                                                        | 4,2                                                | 1                                        | 20                                                       | 31,6                                                              |

В таблицах 4.11, 4.12 представлены расчётные (приведённые) радиусы кривизны выступов волнистости и шероховатости, соответственно:  $r_{w=}(r_{wп} \cdot r_{wпр})^{0,5}$ ,  $r_{ш=}(r_{ш} \cdot r_{пр})^{0,5}$ .

Поверхность стола станка в рабочей части имеет шероховатость с  $Ra = 0,16$  мкм. Этот параметр на порядок меньше, чем у боковой грани заготовки ( $Ra = 1,6$  мкм), что позволяет при определении контактных деформаций считать стол гладким [126].

Таблица 4.12– Параметры шероховатости боковой поверхности заготовки направляющей

| Наибольшая высота профиля $R_{max}$ , мкм | Среднеарифметическое отклонение профиля $Ra$ , мкм | Высота наибольшего выступа профиля $Rp$ , мкм | Относительная опорная длина профиля по средней линии $t_{п}$ , % | Средний радиус кривизны выступов (поперечных) $r_{п}$ , мкм | Средний радиус кривизны выступов (продольных) $r_{пр}$ , мкм | Расчётный (приведённый) радиус кривизны выступа $r_{ш}$ , мкм |
|-------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 10                                        | 1,6                                                | 5,33                                          | 0,51                                                             | 8,0                                                         | 280                                                          | 47,3                                                          |

Контактная деформация (сближение) складывается из трёх составляющих:

$$w_{кп} = w_{кп1} + w_{кп2} + w_{кп3},$$

где  $w_{кп1}$  - контактная деформация (сближение) за счёт деформации микронеровностей,  $w_{кп2}$  - контактная деформация (сближение) за счет деформации волн;  $w_{кп3}$  - контактная деформация (сближение) за счет деформации макроотклонений.

Для приближенной оценки характера контактной деформации используем критерий [126]:

$$Q_p = \frac{E}{HB} \cdot \sqrt{\frac{Rp}{r_{ш}}} = \frac{200000}{2290} \cdot \sqrt{\frac{5,33}{47,3}} = 29,3.$$

$Q_p > 3$ , значит контакт пластический.

При расчёте учитываем механические свойства более мягкого тела, а шероховатость более твёрдого из контактирующих тел [126]. Твёрдость материала стола  $HB = 2290$  МПа; твёрдость поверхности заготовки  $HB = 6200$  МПа.

Модули нормальной упругости материала стола  $E = 200\,000$  МПа; материала заготовки -  $E = 216\,000$  МПа.

При пластической деформации контактную деформацию (сближение) за счёт деформации микронеровностей  $w_{\text{кн1}}$  определяем по формуле [16, 17, 126]:

$$w_{\text{кн1}} = Rp \cdot \left( \frac{p_c}{p_r t_m} \right)^{1/v} = 5,33 \cdot \left( \frac{p_c}{2290 \cdot 0,51} \right)^{1/2,4},$$

где, принимаем среднее фактическое давление равным твёрдости материала стола  $p_r = HB = 2290$  МПа, параметр опорной кривой профиля шероховатости  $v$  равен [16, 126]:

$$v = 2t_m \left( \frac{Rp}{Ra} \right) - 1 = 2 \cdot 0,51 \left( \frac{5,33}{1,6} \right) - 1 = 2,4.$$

Контурное давление  $p_c$  в контакте определяем по модели контакта сферической шероховатой волны с плоской поверхностью [16, 126]:

$$p_c = \frac{1}{1,8K_w} \left( \frac{W_{\text{max}}}{2r_w} \cdot \left( \frac{E}{1-\mu^2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2+\delta_w}} \cdot p_a^{\frac{\delta_w}{2+\delta_w}}.$$

В этих формулах приняты значения коэффициентов  $K_w = 1,65$ ;  $\delta_w = 3,7$  в соответствии с [29] при

$$E/[HB(1-\mu^2)] = 200000/[2290(1-0,3^2)] = 96,$$

$$R_{\text{max}}/W_{\text{max}} = 10/4,2 = 2,38.$$

Номинальное давление  $p_a$  определяем для наибольшей номинальной нагрузки в контакте.

Начальное макроотклонение от плоскостности аппроксимируется цилиндрической поверхностью с направляющей в виде волны синусоиды характерной длиной  $l = 245$  мм. Радиус выступа макроотклонений определяется, аналогично определению данного параметра для волнистости, по формуле [16]:

$$R = \frac{5S_w^2}{32W_p} = \frac{5 \cdot 123^2}{32 \cdot 0,015} = 157,6 \cdot 10^3 \text{ мм} = 157,6 \text{ м},$$

где  $S_w = 123$  мм – среднее расстояние между точками пересечения профилограммы со средней линией (см. рисунок 3.3);  $W_p = 15$  мкм – расстояние от вершины наиболее высокой волны макроотклонений до средней линии профилограммы.



Считаем, что первоначальный номинальный контакт заготовки с поверхностью стола осуществляется по двум наиболее выступающим макроотклонениям, радиусы цилиндрических поверхностей которых определены. Номинальный контакт поверхности заготовки с плоскостью стола будет линейным.

Нагрузка в контакте с учётом действия магнитного поля  $P_q$ , веса заготовки и радиальной составляющей силы резания при двух опорном контакте будет равна:

$$P_2 = (P_{qc} + mg + P_y)/2.$$

Величины  $P_{qc}$  и  $P_y$  определяем в соответствии с параметрами оптимальных режимов шлифования, приведенных в гл. 5.

При использовании компенсаторов величина нагрузки будет уменьшаться в соответствии с числом дополнительных опор.

Номинальная площадь контакта цилиндрической поверхности с плоскостью стола:

$$A_a = bc,$$

где  $b$  – ширина торца заготовки,  $c$  – ширина площадки контакта, определяемая по [37]:

$$c = 2\sqrt{R \cdot 1,16 \cdot 10^{-5} q},$$

где  $q = P_2/b$  – распределённая по длине линии контакта нагрузка.

Номинальное давление будет равно:

$$p_a = P_2/A_a.$$

Контактную деформацию за счет деформации волн  $w_{k2}$  определяем для контакта волнистой поверхности с плоской по формуле [115]:

$$w_{kn2} = 3,83 \cdot W_{\max}^{0,8} \cdot r_w^{0,2} \cdot [p_a \cdot (1 - \mu^2) / E]^{0,4}.$$

Контактная деформация (сближение) за счет деформации макроотклонений  $w_{k3}$  для контактирующей стальной цилиндрической поверхности заготовки радиусом  $R$  со стальной плоскостью стола станка определяется по формуле [37]:

$$w_{кп3} = 1,16 \cdot 10^{-5} \cdot q_k,$$

где  $q_k = P_2/b$  – распределённая по длине линии контакта нагрузка в Н/мм, а  $w_{кп3}$  вычисляется в мм.

Результаты расчётов для двух граней заготовки при нагрузках, соответствующих режиму 1 шлифования (см. главу 5) приведены в таблице 4.13.

Интенсивность равномерно распределённой нагрузки от усилия притяжения магнитного поля стола  $q_c = [p_1] \cdot b$ .

При шлифовании узкой грани -  $q_c = 2,1$  Н/мм, результирующая сила

Таблица 4.13 - Параметры заготовки для определения контактных деформаций и суммарная контактная деформация (сближение)

| Параметры                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Заготовка направляющей                                                        |                                                                              |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | узкая грань                                                                   | широкая грань                                                                |
| Радиус выступа макроотклонений, $R, \text{м}$                                                                                                                                                                                                                                                                    | 157,6                                                                         | 181,8                                                                        |
| Ширина торца заготовки $b, \text{мм}$                                                                                                                                                                                                                                                                            | 13,9                                                                          | 15,0                                                                         |
| Суммарная нагрузка на заготовку:<br>при закреплении магнитным полем стола<br>$P = P_q + mg, \text{Н}$<br>при шлифовании заготовки с закреплени-<br>ем магнитным полем стола<br>$P = P_q + mg + P_y, \text{Н}$<br>при шлифовании заготовки без закреплени-<br>я магнитным полем стола<br>$P = mg + P_y, \text{Н}$ | 729,8 + 4,9 = 734,7<br><br>729,8 + 4,9 + 247 = 981,7<br><br>4,9 + 247 = 251,9 | 787,5 + 4,9 = 792,4<br><br>787,5 + 4,9 + 267 = 1059<br><br>4,9 + 267 = 271,9 |
| Суммарная контактная деформация (сближение) при закреплении заготовки от действия магнитного поля стола и собственного веса за счет микронеровностей $w_{кq1}$ , деформации волн $w_{кq2}$ и деформации макроотклонений $w_{кq3}$                                                                                |                                                                               |                                                                              |
| при однопролётном двух опорном контакте: $w_{кq1} = w_{кq11} + w_{кq21} + w_{кq31}$ , МКМ                                                                                                                                                                                                                        | 0,77 + 0,90 + 0,31 = 1,98 ≈ 2                                                 | 0,75 + 0,88 + 0,31 = 1,94 ≈ 1,9                                              |
| при двух пролётах и трёх опорном контакте: $w_{кq2} = w_{кq12} + w_{кq22} + w_{кq32}$ , МКМ                                                                                                                                                                                                                      | 0,73 + 0,83 + 0,20 = 1,76 ≈ 1,8                                               | 0,71 + 0,81 + 0,20 = 1,72 ≈ 1,7                                              |
| при трёх пролётах и четырёх опорном контакте: $w_{кq3} = w_{кq13} + w_{кq23} + w_{кq33}$ , МКМ                                                                                                                                                                                                                   | 0,70 + 0,79 + 0,15 = 1,64 ≈ 1,6                                               | 0,69 + 0,77 + 0,15 = 1,61 ≈ 1,6                                              |
| Суммарная контактная деформация (сближение) при шлифовании заготовки от действия магнитного поля стола, собственного веса и усилия резания за счет микронеровностей $w_{к1}$ , деформации волн $w_{к2}$ и деформации макроотклонений $w_{к3}$                                                                    |                                                                               |                                                                              |
| при двух опорном контакте:<br>$w_{к1} = w_{к11} + w_{к21} + w_{к31}$ , МКМ                                                                                                                                                                                                                                       | 0,80 + 0,96 + 0,41 = 2,16 ≈ 2,2                                               | 0,78 + 0,93 + 0,41 = 2,12 ≈ 2,1                                              |
| при трёх опорном контакте:<br>$w_{к2} = w_{к12} + w_{к22} + w_{к32}$ , МКМ                                                                                                                                                                                                                                       | 0,76 + 0,88 + 0,27 = 1,91 ≈ 1,9                                               | 0,74 + 0,86 + 0,27 = 1,87 ≈ 1,9                                              |
| при четырёх опорном контакте:<br>$w_{к3} = w_{к13} + w_{к23} + w_{к33}$ , МКМ                                                                                                                                                                                                                                    | 0,73 + 0,83 + 0,21 = 1,77 ≈ 1,8                                               | 0,71 + 0,81 + 0,21 = 1,73 ≈ 1,7                                              |

| Параметры                                                                                             | Заготовка направляющей      |                            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
|                                                                                                       | узкая грань                 | широкая грань              |
| Радиус выступа макроотклонений, $R, \text{м}$                                                         | 157,6                       | 181,8                      |
| Ширина торца заготовки $b, \text{мм}$                                                                 | 13,9                        | 15,0                       |
| Суммарная нагрузка на заготовку:<br>при закреплении магнитным полем стола<br>$P = P_q + mg, \text{Н}$ | $729,8 + 4,9 = 734,7$       | $787,5 + 4,9 = 792,4$      |
| при шлифовании заготовки с закреплением магнитным полем стола<br>$P = P_q + mg + P_y, \text{Н}$       | $729,8 + 4,9 + 247 = 981,7$ | $787,5 + 4,9 + 267 = 1059$ |
| при шлифовании заготовки без закрепления магнитным полем стола<br>$P = mg + P_y, \text{Н}$            | $4,9 + 247 = 251,9$         | $4,9 + 267 = 271,9$        |

$$P_c = 729,8 \text{ Н.}$$

При шлифовании широкой грани -  $q_c = 2,25 \text{ Н/мм}$ , результирующая сила

$$P_c = 787,5 \text{ Н.}$$

Интенсивность равномерно распределённой нагрузки от собственного веса:

$$q_m = 0,5 \cdot 9,81 / 350 = 0,014 \text{ Н/мм.}$$

Радиальная составляющая усилия резания равна:

$$P_y = 17,8 \cdot b.$$

При шлифовании широкой грани -  $P_y = 267 \text{ Н}$ .

При шлифовании узкой грани -  $P_y = 247 \text{ Н}$ .

Доля пластической деформации  $w_{kl}$  (контактная деформация за счёт деформации микронеровностей) от суммарной контактной деформации  $w_k$  для исследуемых заготовок составляет 37...46 %.

#### 4.5. Экспериментальные исследования упругих деформаций

Максимальную деформацию заготовки проверяли от действия только усилия притяжения магнитного поля стола станка и контактных деформаций. Заготовку кладем на грань А. Устанавливаем индикаторную головку на грань С в сечении, соответствующем середине характерной длины волны синусоиды. В соответствии с результатами измерения пяти заготовок, представленными в таблице 3.2 минимальный размер зазора между поверхностью заготовки и стола станка равен 26 мкм. Необходимо подобрать такую величину силы притяжения

магнитного поля стола станка, чтобы любая из исследуемых заготовок не «легла» на стол станка. Зададимся, например, величиной максимального прогиба заготовки 20 мкм и рассчитаем с помощью формулы максимального прогиба от действия усилия притяжения магнитного поля стола станка и собственного веса заготовки:

$$w_{q1} = 13 \times 10^{-3} \frac{ql^4}{EI_z}$$

усилие притяжения магнитного поля стола станка, создающее необходимую деформацию. При этом необходимо исключить вес заготовки, так как экспериментально деформацию от веса заготовки мы проверить не сможем. После преобразований, усилие притяжения магнитного поля стола станка определяется:

$$p = \left[ \frac{w_{q1} \cdot EI_z}{13 \times 10^{-3}} - \frac{mg}{l} \right] / b;$$

$I_z = 3357 \text{ мм}^4$ ,  $E = 2,16 \times 10^5 \text{ МПа}$ ,  $b = 15 \text{ мм}$ . В результате вычислений получим  $p = 0,018 \text{ МПа}$ .

Оценивалась величина максимального прогиба заготовки с использованием математической модели, предложенной в работе (формула 3.1) и экспериментально.

Рукоятку магнитного стола устанавливаем в положение, соответствующее удельной силе притяжения магнитного поля ( $p = 0,02 \text{ МПа}$ ). По тарировочному графику (рис.4.3) этой величине силы притяжения соответствует угол поворота рукоятки 160 градусов. Заготовка деформируется, фиксируем максимальную деформацию заготовки (результаты представлены в таблице 4.14).

Расчет максимальной упругой деформации производим в соответствии с математической моделью (формула 3.1), учитывая только интенсивность равномерно распределённой нагрузки от действия магнитного поля и контактную деформацию (формулы раздела 4.4). Результаты расчета заносим в таблицу 4.17.

Экспериментально измеренные максимальные перемещения исследованных заготовок имеют относительные погрешности от теоретических не превышающие 17 %. Средняя относительная погрешность составляет 11%.

Таблица 4.14 - Максимальный прогиб заготовки от действия силы притяжения магнитного поля стола станка ( $p = 0,02$  МПа)

| № заготовки             | Максимальный прогиб $w_{\max 1}$ , мкм | Погрешность измерений, $\delta$ , мкм | Рассчитанная величина максимального прогиба $w_{\max 1}$ , мкм | Относительная погрешность $\delta$ , % |
|-------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| 1                       | 20                                     | 1,5                                   | 22                                                             | 10                                     |
| 2                       | 19                                     | 1,5                                   | 23                                                             | 17                                     |
| 3                       | 18                                     | 1,5                                   | 20                                                             | 10                                     |
| 4                       | 19                                     | 1,5                                   | 21                                                             | 14,3                                   |
| 5                       | 23                                     | 1,5                                   | 24                                                             | 4,3                                    |
| Среднее по 5 заготовкам | 19,8                                   | 1,5                                   | 22                                                             | 11                                     |

Проверяем адекватность математической модели по критерию Фишера при 5% уровне значимости. Для этого составляется дисперсионное отношение

$$F = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\text{воспр}}^2},$$

где  $S_{\text{ад}}^2$  – дисперсия адекватности, зависящая от разности между значениями параметра, определенными по математической модели, и экспериментальными результатами определения параметра и рассчитывается по формуле:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - y_i)^2}{N};$$

Подставив численные значения из таблицы 4.16, получим:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{29}{5} = 5,8.$$

В качестве дисперсии воспроизводимости берем дисперсию ряда экспериментально определенных максимальных деформаций пяти заготовок с числом степеней свободы  $f_{\text{воспр}} = 5$ :

$$S_{\text{воспр}}^2 = 3,7.$$

Таким образом, расчетный коэффициент Фишера:

$$F = \frac{5,8}{3,7} = 1,57.$$

Полученное отношение сравниваем с табличным:  $F_{1-p}(f_1, f_2)$ , где уровень значимости  $p = 0,95$ ; число степеней свободы дисперсии адекватности  $f_1 = 5$ ; число степеней свободы дисперсии воспроизводимости  $f_2 = 5$ . Таким образом  $F_{\text{табл}} = 5,05$ .

Выполнено условие  $F < F_{\text{табл}}$ , следовательно, дисперсии адекватности и воспроизводимости однородны, математическая модель адекватна.

Для рассматриваемых заготовок шлифование осуществляется при минимально допускаемой удельной силе притяжения магнитного поля стола из условия отсутствия сдвига заготовки ( $p_1 = 0,15$  МПа), определенной в разделе 4.6.

Расчет максимальной упругой деформации производим в соответствии с математической моделью (формула 3.1), учитывая только интенсивность равномерно распределённой нагрузки от действия магнитного поля и контактную деформацию (формулы раздела 4.4). Результаты расчета заносим в таблицу 4.15.

Таблица 4.15 - Максимальный прогиб заготовки от действия силы притяжения магнитного поля стола станка ( $p = 0,15$  МПа)

| № заготовки             | Максимальный прогиб $W_{\text{max1}}$ , мкм | Погрешность измерений, $\delta$ , мкм | Рассчитанная величина максимального прогиба $W_{\text{max1}}$ , мкм |
|-------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 1                       | 32                                          | 1,5                                   | 183                                                                 |
| 2                       | 32                                          | 1,5                                   | 192                                                                 |
| 3                       | 28                                          | 1,5                                   | 167                                                                 |
| 4                       | 30                                          | 1,5                                   | 175                                                                 |
| 5                       | 34                                          | 1,5                                   | 200                                                                 |
| Среднее по 5 заготовкам | 31,2                                        | 1,5                                   | 183                                                                 |

Как видно из таблицы 3.2, величина зазора между поверхностью заготовки и стола станка варьируется в пределах от 26 до 33 мкм, что значительно меньше рассчитанной величины максимального прогиба (таблица 4.15), следовательно, под действием минимально допускаемой удельной силы притяжения магнитного поля стола из условия отсутствия сдвига заготовки ( $p_1 = 0,15$  МПа) заготовка полностью прижмется к столу станка.

Рукоятку магнитного стола устанавливаем в положение, соответствующее удельной силе притяжения магнитного поля ( $p = 0,15$  МПа). По тарировочному графику (рисунок 4.3) этой величине силы притяжения соответствует угол поворота рукоятки 130 градусов. Заготовка деформируется, фиксируем максимальную деформацию заготовки (результаты представлены в таблице 4.15).

Экспериментально измеренные максимальные прогибы исследованных заготовок превышают величины зазора между поверхностью заготовки и стола станка с учетом погрешности измерений.

Исходя из условий обеспечения требуемого допуска плоскостности обработанной поверхности узкая и широкая грани заготовки шлифуются при режиме 1 при минимально допустимом удельном усилии притяжения магнитного поля стола ( $p_1 = 0,15$  МПа), с двумя компенсаторами. Количество компенсаторов определено в разделе 4.6. Режимы шлифования ( $S_{p \text{ opt}} = 0,01$  мм/ход;  $v_{\text{sopt}} = 11$  м/мин), обеспечивающие наибольшую производительность процесса шлифования при обеспечении необходимого качества обработанной поверхности определены в разделе 5.2, глубина шлифования 0,4 мм.

После шлифования произвели оценку качества обработанной поверхности. Шероховатость поверхности не превышает  $Ra = 1,6$  мкм, прижоги отсутствуют, величины отклонений от плоскостности обработанной поверхности не превышают заданной величины (7 мкм), следовательно, можно сделать вывод об адекватности выбранных режимов шлифования и математической модели максимальной упругой деформации заготовки, с помощью которой определено необходимое число пар компенсаторов, обеспечивающее увеличение жесткости заготовки для ограничения максимальной упругой деформации ее допусковым значением.

#### **4.6. Проверка условий обеспечения требуемого допуска плоскостности обработанной поверхности при шлифовании боковых граней направляющей линейного подшипника**

Проверим условия обеспечения требуемого допуска плоскостности обработанной поверхности заготовки при режиме 1 (по алгоритму рисунка 3.17):

$$y_a \leq [\Delta].$$

Допускаемая максимальная упругая деформация заготовки  $[\Delta]$  принимается равной:  $[\Delta] = \lambda \Delta - \Delta_T = 0,75 \cdot 7 - 3 = 2,25 \approx 2$  мкм. Максимальное отклонение от плоскостности  $y_a = 30$  мкм.

$y_a = 30$  мкм  $> [\Delta] = 2$  мкм - условие не выполняется. Проверяем условие  $w_{max1} \leq [\Delta]$ , для этого определяем величину  $w_{max1}$  при максимальном удельном усилии притяжения магнитного поля стола  $p_{max} = 0,67$  МПа.

Длина направляющей  $l_3 = 350$  мм, характерная длина волны синусоиды усредненной заготовки  $l = 245$  мм, ширина узкой грани 13,9 мм, широкой – 15 мм. Масса – 0,5 кг.

Модуль продольной упругости для стали 20Х равен:  $E = 2,16 \times 10^5$  МПа. Главный центральный момент инерции поперечного сечения при шлифовании широкой грани -  $I_z = 3357$  мм<sup>4</sup>, при шлифовании узкой грани -  $I_z = 3909$  мм<sup>4</sup>.

Интенсивность равномерно распределённой нагрузки от усилия притяжения магнитного поля стола  $q_c = p_{max} b$ . При шлифовании узкой грани -  $q_c = 9,4$  Н/мм, результирующая сила  $P_c = 3260$  Н. При шлифовании широкой грани -  $q_c = 10,05$  Н/мм, результирующая сила  $P_c = 3517,7$  Н.

Интенсивность равномерно распределённой нагрузки от собственного веса  $q_m = 0,5 \cdot 9,81 / 350 = 0,014$  Н/мм.

Величины силы резания берем для оптимальных режимов шлифования определённых в главе 5:  $p_{yopt} = 17,8$  Н/мм;  $p_{zopt} = 4,45$  Н/мм.

Радиальная составляющая усилия резания равна:  $P_y = 17,8 \cdot b$ . При шлифовании широкой грани -  $P_y = 267$  Н. При шлифовании узкой грани -  $P_y = 247$  Н.

Вычисляем максимальные прогибы и контактные деформации для однопролётной балки от действия магнитного поля стола, собственного веса заготовки и радиальной составляющей силы резания.

По таблицам 3.5, 4.13 (контактная деформация только упругая, первое слагаемое, соответствующее пластической деформации не учитывается).

Жёсткость технологической системы [105]:  $j_c = 247 / 0,040 = 6175$  Н/мм.

Для узкой грани:



$$w_{\max 1} = w_{q1} + w_{p1}c_1 + w_{k1} = 523 + 97c_1 + 1,36 = 593 \text{ мкм} > [\Delta] = 2 \text{ мкм}.$$

Для узкой грани жёсткость заготовки  $j_{31} = 247/0,097 = 2546 \text{ Н/мм}$ .

$$c_1 = 0,706.$$

Для широкой грани:  $w_{\max 1} = w_{q1} + w_{p1}c_1 + w_{k1} = 652 + 113c_1 + 1,3 = 735 \text{ мкм} > [\Delta] = 2 \text{ мкм}$ .

Для широкой грани жёсткость заготовки  $j_{31} = 267/0,113 = 2363 \text{ Н/мм}$ ,

$$c_1 = 0,723.$$

Условие 3.23 не выполняется, определим допускаемое удельное усилие притяжения магнитного поля стола  $[p]$  из условия  $w_{\max 1} \leq [\Delta]$ .

Для узкой грани:

$$w_{\max 1} = w_{q1} + w_{p1}c_1 + w_{k1} = 523 + 97c_1 + 1,36 = 2 \text{ мкм}, \text{ отсюда } w_{q1} = -68 \text{ мкм}.$$

Тогда удельное усилие притяжения магнитного поля стола  $[p] = -0,087 \text{ МПа}$ .

Для широкой грани:

$$w_{\max 1} = w_{q1} + w_{p1}c_1 + w_{k1} = 652 + 113c_1 + 1,3 = 2 \text{ мкм}, \text{ отсюда } w_{q1} = -81 \text{ мкм}.$$

Тогда удельное усилие притяжения магнитного поля стола  $[p] = -0,083 \text{ МПа}$ .

Условие 3.24 не выполняется.

Для проверки условия 3.25 необходимо сначала определить минимально допускаемые удельные силы притяжения магнитного поля стола  $[p_1]$  для исследуемой направляющей из условия отсутствия сдвига заготовки [107, 108]:

$$k \cdot (P_y + mg + Q_c) \geq P_z, \quad (4.10)$$

где  $k = 0,1$  – коэффициент трения скольжения;  $P_y$  – радиальная составляющая силы резания;  $m$  – масса заготовки;  $g$  – ускорение свободного падения;  $P_z$  – касательная составляющая силы резания;  $Q_c = k_\phi [p_1] b \cdot l_3 / (K \cdot k_m \cdot k_h)$  – усилие притяжения магнитного поля стола;  $K$  – коэффициент запаса,  $K = 2$ ;  $k_\phi$ ,  $k_m$ ,  $k_h$  – коэффициенты влияния формы заготовки, магнитных свойств материала заготовки и толщины заготовки;  $k_\phi = k_m = k_h = 1$ ;  $l_3$  – длина заготовки,  $b$  – ширина боковой грани, соприкасающейся с поверхностью стола.

Из (4.10) получим расчётную формулу для  $[p_1]$ :

$$[p_1] = K k_m k_h (P_z / k - P_y - mg) / (k_\phi \cdot b \cdot l_3).$$

Для широкой грани получим:

$$[p_1] = 2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot (4,45 \cdot 15 / 0,1 - 17,8 \cdot 15 - 0,5 \cdot 9,81) / (1 \cdot 15 \cdot 350) = 0,15 \text{ МПа.}$$

Для узкой грани:

$$[p_1] = 2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot (4,45 \cdot 13,9 / 0,1 - 17,8 \cdot 13,9 - 0,5 \cdot 9,81) / (1 \cdot 13,9 \cdot 350) = 0,15 \text{ МПа.}$$

Интенсивность равномерно распределённой нагрузки от усилия притяжения магнитного поля стола  $q_c = [p_1] \cdot b$ . При шлифовании узкой грани -  $q_c = 2,1 \text{ Н/мм}$ , результирующая сила  $P_c = 729,8 \text{ Н}$ . При шлифовании широкой грани -  $q_c = 2,25 \text{ Н/мм}$ , результирующая сила  $P_c = 787,5 \text{ Н}$ .

Проверяем условия 3.25 по алгоритму (см. рисунок 3.13):

$$0,45u_a - w_{k2} = 0,45 \times 30 - 1,2 = 12,3 \text{ мкм} > [\Delta] = 2 \text{ мкм} - \text{не выполняется.}$$

Вычисляем максимальные прогибы и контактные деформации для однопролётной балки от действия магнитного поля стола, собственного веса заготовки и радиальной составляющей силы резания при установке одной пары компенсаторов.

По формулам таблиц 3.5, 4.13 для узкой грани:

$$w_{\max 2} = w_{q2} + w_{p2}c_2 + w_{k2} = 3,0 + 8,8c_2 + 1,2 = 5,8 \text{ мкм} > [\Delta] = 2 \text{ мкм.}$$

Для узкой грани жёсткость заготовки  $j_{31} = 247 / 0,0088 = 28070 \text{ Н/мм}$ ,

$$c_2 = 0,18.$$

Для широкой грани:

$$w_{\max 2} = w_{q2} + w_{p2}c_2 + w_{k2} = 3,8 + 10c_2 + 1,16 = 6,9 \text{ мкм} > [\Delta] = 2 \text{ мкм.}$$

Для широкой грани жёсткость заготовки  $j_{31} = 267 / 0,010 = 26700 \text{ Н/мм}$ ,

$$c_2 = 0,19.$$

Условия (3.25) не выполняются, одной пары компенсаторов недостаточно для увеличения жёсткости заготовки.

Проверяем условия (3.26) по алгоритму рисунка 3.17:

$$0,23u_a - w_{k3} = 0,23 \times 30 - 1 = 5,9 \text{ мкм} > [\Delta] = 2 \text{ мкм.}$$

Вычисляем максимальные прогибы и контактные деформации для однопролётной балки от действия магнитного поля стола, собственного веса заготовки и радиальной составляющей усилия резания при установке двух пар компенсаторов по формулам таблиц 3.5, 4.13. Для узкой грани:

$$w_{\max 3} = w_{q3} + w_{p3}c_3 + w_{k3} = 0,76 + 2,9c_3 + 1,0 = 1,96 \text{ мкм} < [\Delta] = 2 \text{ мкм.}$$

Для узкой грани жёсткость заготовки  $j_{31} = 247/0,0029 = 85200 \text{ Н/мм}$ ,  
 $c_3 = 0,07$ .

Для широкой грани:

$$w_{\max 3} = w_{q3} + w_{p3} + w_{k3} = 0,95 + 3,4c_3 + 1,0 = 1,99 \text{ мкм} < [\Delta] = 2 \text{ мкм}.$$

Для широкой грани жёсткость заготовки  $j_{31} = 267/0,0034 < 78530 \text{ Н/мм}$ ,  $c_{12} = 0,073$ .

Условия (3.26) выполняется.

Узкая и широкая грани заготовки шлифуются при режиме 1 при минимально допустимом удельном усилии притяжения магнитного поля стола  $[p_1]$  с двумя компенсаторами.

#### **4.7. Тарировка удельного усилия притяжения магнитного поля стола станка**

Тарировка удельного усилия притяжения магнитного поля стола станка необходима для реализации возможности регулирования усилия притяжения заготовки магнитным полем стола станка для управления упругими деформациями, возникающими при закреплении заготовки.

Для тарировки удельного усилия притяжения магнитного поля стола станка используется следующие оборудование и инструменты:

1. Станок 3Г71 с прямоугольной магнитной плитой с ручным переключением, ГОСТ 16528-87.
2. Динамометр УДМ-100.
3. Усилитель УТ4-1.
4. Аналогово-цифровой преобразователь Е14-140 (АЦП).
5. Персональный компьютер.
6. Угломер электронный «ЗУБР ЭКСПЕРТ» (погрешность измерения  $\pm 0,1^\circ$ ).

Экспериментальные исследования по определению усилия притяжения магнитного поля стола станка проводились на станке 3Г71 с прямоугольной магнитной плитой с ручным переключением, ГОСТ 16528-87 (рисунок 4.1).

Усилие притяжения магнитного поля стола определяется динамометром при отрыве от стола цилиндрического образца (рисунок 4.2, а) при различных по-

ложениях рукоятки переключателя (рисунок 4.2, б). Динамометр расположен на шлифовальной головке, и усилие отрыва образца создаётся подъёмом шлифовальной головки станка.



Рисунок 4.1 – Экспериментальная установка для тарировки удельного усилия притяжения магнитного поля стола станка

Измерительная система для определения силы отрыва образца от магнитного стола состоит из динамометра, усилителя, АЦП и персонального компьютера.

Погрешность измерительной системы  $\pm 5 \%$ .

Порядок тарировки следующий:

1. Устанавливаем цилиндрический образец на магнитный стол станка 3Г71, соединив его с динамометром, расположенным на шлифовальной головке.

2. Совмещаем угломер с рукояткой при выключенном магнитном поле стола станка и выставляем ноль. (При построении тарировочного графика за нулевое положение рукоятки приняли положение, соответствующее максимальной силе прижима).

3. Поворачиваем рукоятку на 20 градусов. Поднимаем шлифовальную головку станка до тех пор, пока не произойдет отрыв цилиндрического образца от

стола станка (Измерения производим от минимальной силы притяжения к максимальной для минимизации влияния остаточной намагниченности стола на результат).

4. Фиксируем показания динамометра.



*а*



*б*

Рисунок 4.2 – Цилиндрический образец для тарировки удельного усилия притяжения магнитного поля стола станка (*а*) и фиксация положения рукоятки переключения (*б*)

5. Производим подобные измерения при различных углах наклона рукоятки переключателя, что будет соответствовать различным значениям величины магнитного поля стола (угол наклона рукоятки определяется с помощью угломера).

7. Строим тарировочный график для средних значений усилия притяжения магнитного поля стола станка, полученный по экспериментальным данным.

Для каждого положения рукоятки управления величиной усилия притяжения магнитного поля стола станка было произведено 3 опыта на 29 полюсных выступах, при расположении центра образца на расстоянии 85 мм от переднего края стола (см. рисунок 4.2).

Тарировочный график для удельного усилия притяжения магнитного поля стола станка от угла поворота рукоятки, полученный по экспериментальным данным таблицы 4.16, показан на рисунке 4.3.

Тарировка удельного усилия притяжения магнитного поля стола шлифовального станка внедрена в виде лабораторной работы в учебный процесс по направлению 15.03.05 – Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительного производства при преподавании дисциплин «Технология шлифования» в Волжском политехническом институте (филиале) ВолгГТУ.

Таблица 4.16 - Измерения силы отрыва образца от магнитного стола

| Положение рукоятки управления (поворот против часовой стрелки) | $R_{\text{ср}}, \text{ Н}$ | $\pm \Delta R, \text{ Н}$ | Удельное усилие $p, \text{ МПа}$ |
|----------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| $0^\circ$                                                      | 531                        | 26,5                      | 0,67                             |
| $20^\circ$                                                     | 451                        | 22,5                      | 0,58                             |
| $40^\circ$                                                     | 410                        | 20,5                      | 0,52                             |
| $60^\circ$                                                     | 356                        | 17,8                      | 0,45                             |
| $90^\circ$                                                     | 252                        | 12,5                      | 0,32                             |
| $120^\circ$                                                    | 148                        | 12,4                      | 0,19                             |
| $140^\circ$                                                    | 69                         | 3,5                       | 0,099                            |
| $160^\circ$                                                    | 21                         | 1                         | 0,02                             |

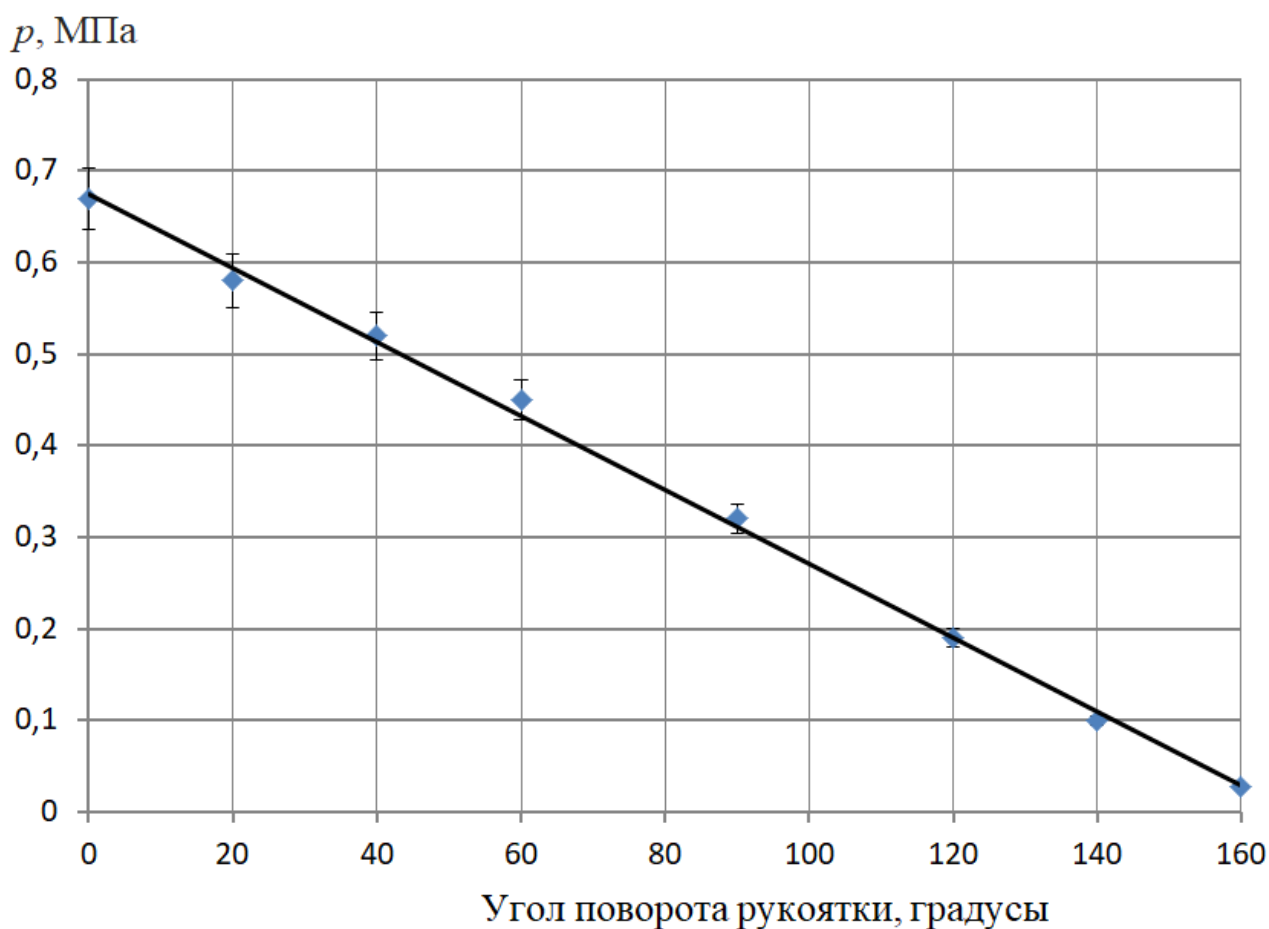


Рисунок 4.3 –Тарировочный график для удельного усилия притяжения магнитного поля стола станка

#### 4.8. Выводы

1. Методом полного факторного эксперимента разработаны математические модели приведённых к ширине образца составляющих силы резания ( $p_y$ ,  $p_z$ ) и шероховатости обработанной поверхности (параметр  $R_a$ ) при шлифовании цементированной, закаленной стали 20Х.

2. Произведен анализ влияния основных факторов и факторов взаимодействия на составляющие силы резания, параметр шероховатости.

3. Экспериментально определены максимальные упругие деформации направляющей подшипника ЛРХ 6/350 под действием магнитного поля стола. Установлено, что относительная погрешность экспериментальных величин максимальных деформаций заготовки с расчетными значениями, полученными с использованием разработанной математической модели, не превышают 17 %.

## 5. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛОСКОГО ШЛИФОВАНИЯ ЗАГОТОВОК МАЛОЙ ЖЁСТКОСТИ НАПРАВЛЯЮЩИХ ЛИНЕЙНЫХ ПОДШИПНИКОВ

### 5.1. Алгоритм и методика для определения оптимальных условий шлифования боковых граней призматических заготовок

На первом этапе, при выборе оптимальных условий шлифования (режим 1), заготовку рассматриваем, как абсолютно жесткую и оптимизацию режимов осуществляем из условия выполнения требований к шероховатости и отсутствию шлифовочных прижогов (рисунок 5.1).

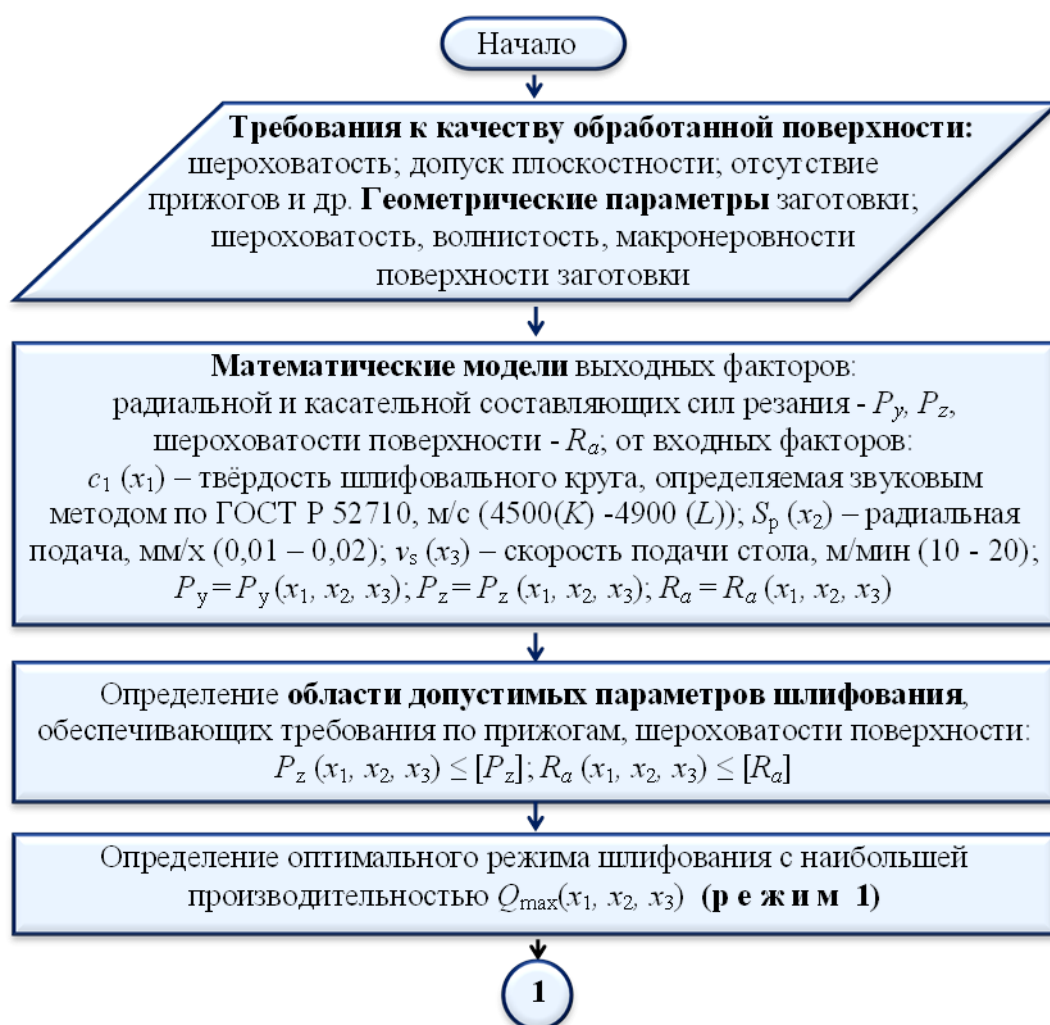


Рисунок 5.1 – Алгоритм выбора оптимальных условий плоского шлифования, обеспечивающих достижение требуемого качества обработанной поверхности (для жёсткой заготовки)



С использованием математических моделей составляющих силы резания, параметра шероховатости и т. д. ( $P_y = P_y(x_1, x_2, x_3)$ ;  $P_z = P_z(x_1, x_2, x_3)$ ;  $Ra = Ra(x_1, x_2, x_3)$ ; ...) (см. рисунок 5.1) определяются области допустимых значений параметров характеристики абразивного инструмента и режимов  $x_1, x_2, x_3$ , обеспечивающих выполнение требований к качеству поверхности.

Дальнейшая оптимизация параметров в области допустимых значений производится по критерию наибольшей производительности процесса  $Q_{\max}(x_1, x_2, x_3)$ .

Эти параметры определяют первый режим шлифования (режим 1).

Требуемый допуск плоскостности обеспечивается на втором этапе оптимизации режимов ограничением величины упругой деформации (рисунок 5.2).

Варьируемыми параметрами являются сила притяжения магнитного поля стола станка и жёсткость заготовки при изгибе (изменяется при установке компенсаторов).

Требуемый допуск плоскостности обеспечивается на втором этапе оптимизации режимов ограничением величины упругой деформации (рисунок 5.2).

Варьируемыми параметрами являются сила притяжения магнитного поля стола станка и жёсткость заготовки при изгибе (изменяется при установке компенсаторов).

Условия обеспечения требуемого допуска плоскостности обработанной поверхности заготовки при режиме 1 (шлифование заготовки с наибольшей производительностью при оптимальных условиях для жёсткой заготовки):

$$y_a - w_{k1} \leq [\Delta]; w_{\max 1} \leq [\Delta],$$

реализуется шлифование на режиме 1 при максимальном удельном усилии притяжения магнитного поля стола  $p_{\max}$ ;

$$[p] \geq [p_1],$$

реализуется шлифование на режиме 1 при допустимом удельном усилии притяжения магнитного поля стола  $[p]$ , определяемом из условия  $w_{\max 1} \leq [\Delta]$ ;

$$0,45y_a - w_{k2} \leq [\Delta]; w_{\max 2} \leq [\Delta], \text{ расчет при } [p_1],$$

реализуется шлифование на режиме 1 при минимально допустимом удельном усилии притяжения магнитного поля стола  $[p_1]$  с одной парой компенсаторов;

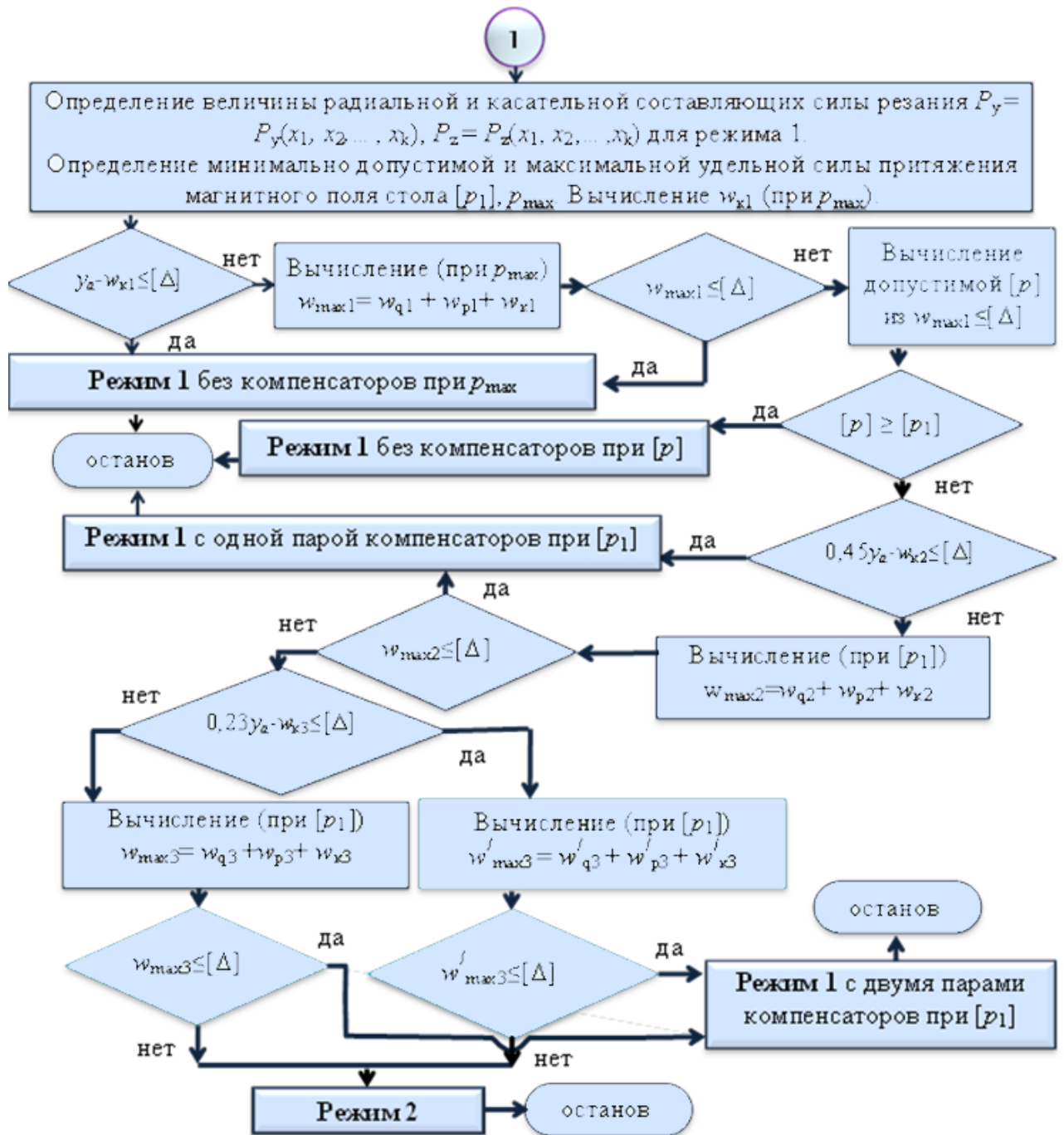


Рисунок 5.2 – Алгоритм выбора оптимальных условий плоского шлифования, обеспечивающих достижение требуемого качества, в том числе, допуска плоскостности обработанной поверхности

$$0,23y_a - w_{k3} \leq [\Delta]; w_{\max 3} \leq [\Delta]; w'_{\max 3} \leq [\Delta], \text{ расчет при } [p_1], \quad (5.1)$$

реализуется шлифование на режиме 1 при минимально допустимом удельном усилии притяжения магнитного поля стола  $[p_1]$  с двумя компенсаторами.

Если условия (5.1) не выполняются, реализуется режим 2 – шлифование с дополнительными переходами. Параметры процесса шлифования соответствуют режиму 1, но время шлифования возрастает в среднем на 40 %.

## **5.2. Разработка рекомендаций по повышению эффективности процесса плоского врезного шлифования боковых граней призматических направляющих малой жёсткости**

Приведём пример практической реализации методики для направляющей роликового однорядного подшипника ЛРХ 6/350, изготавливаемой на ОАО «ЕПК Самара» (см. рисунок 3.1). Направляющую подшипника, изготовленную из стали 20Х (ГОСТ 4543 – 71), подвергают цементации с получением цементированного слоя глубиной 1,6 – 1,8 мм. До операции плоского шлифования в заготовке сверлятся поперечные и продольные отверстия, обрабатываются продольные пазы.

Требования к качеству боковой поверхности на операции шлифования: отсутствие шлифовочных прижогов; шероховатость поверхности  $Ra = 1,25$  мкм; допуск плоскостности  $\Delta = 7$  мкм.

Длина направляющей  $l_3 = 350$  мм; ширина узкой грани 13,9 мм, широкой – 15 мм; характерная длина волны синусоиды образующей поверхности макроотклонений  $l = 245$  мм. Момент инерции поперечного сечения при шлифовании широкой грани -  $I_z = 3357$  мм<sup>4</sup>, при шлифовании узкой грани -  $I_z = 3909$  мм<sup>4</sup>. Масса – 0,5 кг.

Допускаемая максимальная упругая деформация заготовки:  $[\Delta] = \lambda \Delta - \Delta_T = 0,75 \cdot 7 - 3 = 2,25 \approx 2$  мкм. Максимальное начальное отклонение от плоскостности  $y = 30$  мкм. Модуль продольной упругости для стали 20Х равен:  $E = 2,16 \times 10^5$  МПа.

Математические модели приведённых к ширине образца составляющих силы резания ( $p_y, p_z$ ) и шероховатости обработанной поверхности (параметр  $Ra$ ) получены в главе 4 методом полного факторного эксперимента типа  $2^3$  на образцах из стали 20Х (таблица 5.1).

Таблица 5.1 -Математические модели показателей процесса шлифования стали 20Х

|              |                                                                                     |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| $p_z$ , Н/мм | $7,78 + 1,58 x_1 + 0,88x_3 - 0,59x_1x_2 + 0,54x_1x_3 - 0,64 x_2x_3 + 0,92x_1x_2x_3$ |
| $p_v$ , Н/мм | $22,1 + 1,35x_1 - 2,29x_2 + 1,21x_3 - 1,12x_1x_2 - 3,01x_2x_3 + 1,52x_1x_2x_3$      |
| $Ra$ , мкм   | $1,46 - 0,25x_1 + 0,30x_2 + 0,30x_3 - 0,17x_1x_2 - 0,20x_1x_3$                      |

$c_1(x_1)$  – твёрдость шлифовального круга, определяемая звуковым методом по приведённой скорости распространения акустических волн, м/с (ГОСТ Р 52710) – от 4500 м/с (K) до 4900 м/с (L);  $S_p(x_2)$  – радиальная подача, мм/х– от 0,01 до 0,02 мм/х;  $v_s(x_3)$  – скорость подачи стола, м/мин – от 10 до 20 м/мин.

Параметры  $x_1, x_2, x_3$ , указанные в скобках, являются условными обозначениями кодированных значений факторов (см. таблицу 5.1). Зернистость шлифовального круга F70 (ГОСТ Р 52381-2005).

В результате специально проведенных исследований установлено, что шлифовочные прижоги образуются при  $p_z > 6$  Н/мм.

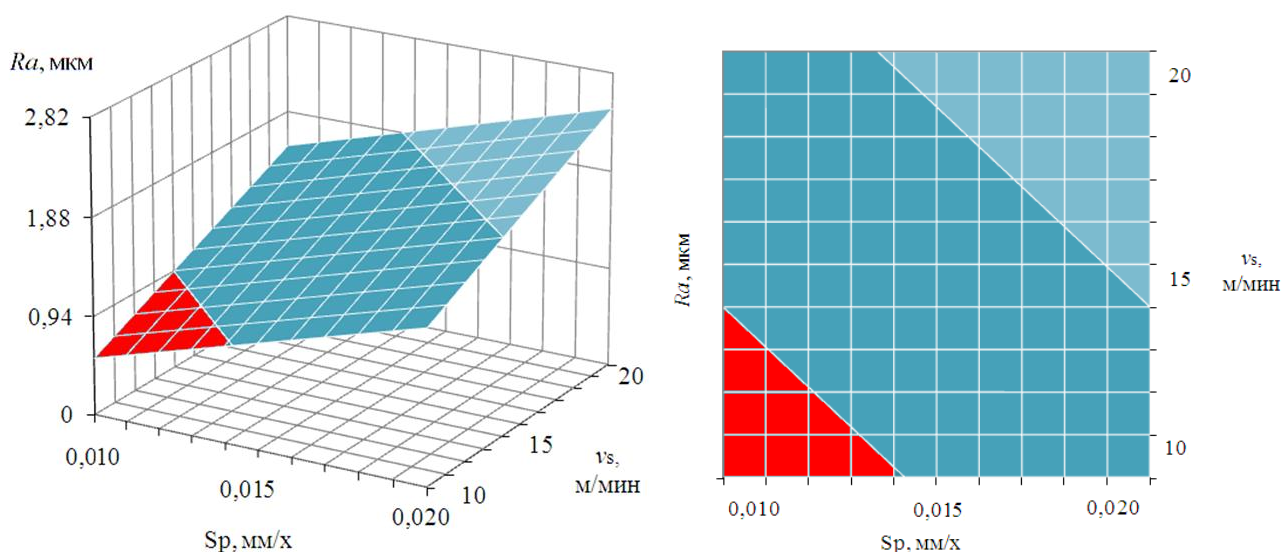


Рисунок 5.3 - Область допускаемых значений режимных параметров, обеспечивающих требуемый параметр шероховатости поверхности  $Ra$  (выделена красным цветом).

Зернистость круга – F70, твердость – K:  $c_1$  – 4500 м/с

Для заготовок из стали 20Х определена область значений входных факторов, обеспечивающих допустимые значения с учётом запаса точности  $[Ra] \leq 1,25 \times 0,75 = 0,94$  мкм и  $[p_z] \leq 6 \times 0,75 = 4,5$  Н/мм:

$$p_z = 7,78 + 1,58 x_1 + 0,88x_3 - 0,59x_1x_2 + 0,54x_1x_3 - 0,64 x_2x_3 + 0,92x_1x_2x_3 \leq 4,5 \text{ Н/мм}; (5.1)$$

$$Ra = 1,46 - 0,25x_1 + 0,30x_2 + 0,30x_3 - 0,17x_1x_2 - 0,20x_1x_3 \leq 0,94 \text{ мкм} \quad (5.2)$$

Ограничения по прижогам (5.1), шероховатости (5.2) обеспечиваются только для круга нижнего диапазона твердости 1 с  $c_1 = 4500 \text{ м/с}$  (рисунки 5.3, 5.4).

Область допустимых значений параметров характеристики абразивного инструмента и режимов, обеспечивающих выполнение требований к качеству обработанной поверхности:  $c_1 = 4500 \text{ м/с}$ ;  $v_s \leq 12 \text{ м/мин}$ ;  $S_p \leq 0,012 \text{ мм/х}$ .

Математические модели выходных факторов в этом случае при  $x_1 = -1$ :

$$p_z = 6,2 + 0,34x_3 + 0,59x_2 - 1,56 x_2x_3; \quad (5.3)$$

$$Ra = 1,71 + 0,47x_2 + 0,50x_3. \quad (5.4)$$

При переводе кодированных значений факторов в натуральные использованы зависимости:

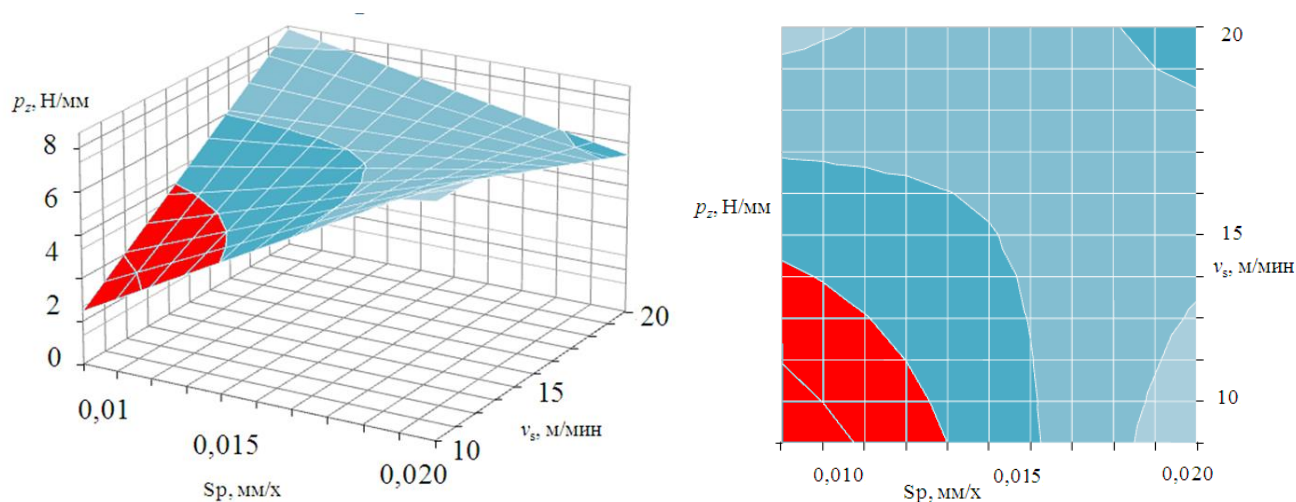


Рисунок 5.4 - Область допускаемых значений режимных параметров, обеспечивающих безприжоговое шлифование поверхности (выделена красным цветом).

Зернистость круга – F70, твердость – K:  $c_1 = 4500 \text{ м/с}$

$$x_2 = \frac{Sp - 0,015}{0,005}, \quad x_3 = \frac{v_s - 15}{5}.$$

При подстановке натуральных значений факторов в (5.3) и (5.4) получим:

$$p_z = 1054S_p + 1,004 v_s - 62,4 S_p v_s - 10,63;$$

$$Ra = 94 S_p + 0,1 v_s - 1,2.$$

Область допустимых значений параметров процесса шлифования определяется ограничениями:

$$\begin{cases} 1054S_p + 1,004v_s - 62,4S_p v_s - 10,63 \leq 4,5; \\ 94S_p + 0,1v_s - 1,2 \leq 0,94; \\ 0,001 \leq S_p \leq 0,002; \\ 10 \leq v_s \leq 20. \end{cases}$$

На рис. 5.3, 5.4 видим, что ограничения по отсутствию прижогов и шероховатости одновременно выполняются ниже границы области по шероховатости:

$$Ra = 94 S_p + 0,1 v_s - 1,2 \leq 0,94.$$

Уравнение линии границы области:

$$v_s = 21,4 - 940S_p. \quad (5.5)$$

Окончательное выражение целевой функции приведённой производительности  $Q$  через варьируемые параметры:  $Q = v_s \cdot S_p \cdot 10^3$ , мм<sup>2</sup>/мин.

На границе (5.5):

$$Q = (21,4 - 940S_p) \cdot S_p \cdot 10^3. \quad (5.6)$$

Приравниваем к нулю производную функции (5.6) по  $S_p$ , найдем значение оптимальной радиальной подачи:

$$Q'(S_p) = 0 \Rightarrow S_{\text{порт}} = \frac{21,4}{2 \cdot 940} = 0,0114 \text{ мм/ход.}$$

Подставив  $S_{\text{порт}}$  в (5.5), найдем оптимальное значение скорости подачи заготовки:  $v_{\text{сопт}} = 10,7$  м/мин.

При шлифовании на оптимальных режимах:

$$Q_{\text{max}} = 10^3 \cdot 10,7 \cdot 0,0114 = 122 \text{ мм}^2/\text{мин.}$$

На рисунке 5.6 точка  $A$  соответствует оптимальному режиму.

Округляя численные значения подач, получим:  $S_{\text{порт}} = 0,011$  мм/х;  $v_{\text{сопт}} = 11$  м/мин;  $Q_{\text{max}} = 121$  мм<sup>2</sup>/мин.

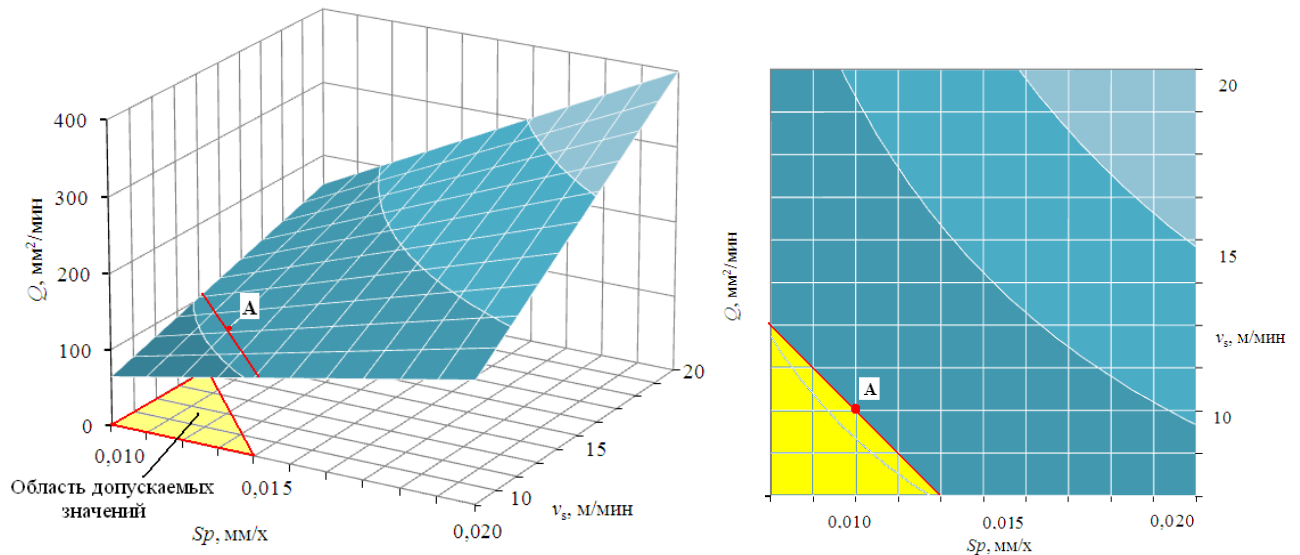


Рисунок 5.5 - Целевая функция приведенной производительности процесса  $Q(v_s, S_p)$

Приведенные значения составляющих силы резания на данных режимах шлифования:  $p_y = 17,8$  Н/мм,  $p_z = 4,45$  Н/мм, для круга, находящегося в середине диапазона рекомендуемой твердости  $K$  (измеряемой скоростью звука  $c_1 = 4\,500$  м/с).

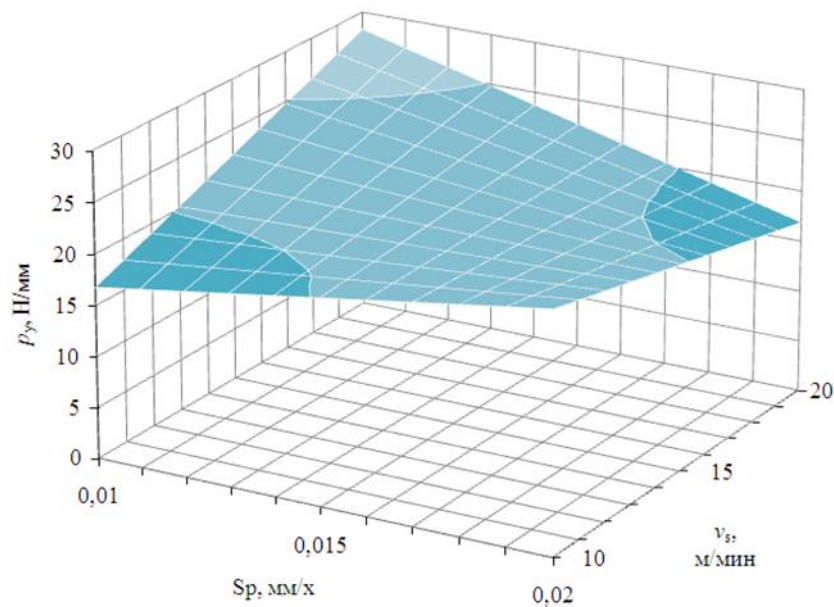


Рисунок 5.6 - Зависимость радиальной составляющей силы от скорости подачи и радиальной подачи. Зернистость круга –  $F70$ , твердость –  $K$ :  $c_1 = 4500$  м/с

Определяем для исследуемой направляющей минимально допускаемые удельные силы притяжения магнитного поля стола  $[p_1]$  из условия сдвига заготов-

ки:  $[p_1] = 0,15$  МПа. Величины силы резания берем для оптимальных режимов шлифования (режим 1):  $p_{yopt} = 17,8$  Н/мм;  $p_{zopt} = 4,45$  Н/мм.

По алгоритму выбора оптимальных условий плоского шлифования определены условия шлифования заготовки по режиму 1 с удельным усилием притяжения магнитного поля стола станка  $p = [p_1] = 0,15$  МПа и двумя парами компенсаторов. Результаты расчётов для шлифования узкой и широкой грани заготовки по алгоритмам управления упругим деформированием заготовки при закреплении и обработке представлены в разделе 4.5.

По этим рекомендациям обрабатываются по одной из двух пар узких и широких граней, при обработке второй противоположной грани упругие деформации уже не будут превышать допусковых величин, поэтому шлифование ведётся без компенсаторов с параметрами режима 1. Оптимальные параметры режима 1, обеспечивающие наибольшую приведенную режущую способность (производительность)  $Q_{max} = 121$  мм<sup>2</sup>/мин:  $S_{popt} = 0,01$  мм/ход;  $v_{sopt} = 11$  м/мин.

Проведенная оптимизация режимов плоского шлифования боковых граней призматических направляющих линейного подшипника ЛРХ 6/350 и исключение дополнительных переходов позволило сократить основное время на операции шлифования направляющей на 30% (с 44 до 31 минуты).

### 5.3. Выводы

1. По алгоритму, полученному в главе 3, проведена оптимизация режимов плоского шлифования боковых граней призматических направляющих линейного подшипника ЛРХ 6/350. Определено, что шлифование должно вестись с установкой двух пар с параметрами режима 1, обеспечивающими наибольшую приведенную режущую способность (производительность)  $Q_{max} = 121$  мм<sup>2</sup>/мин:  $S_{popt} = 0,01$  мм/ход;  $v_{sopt} = 11$  м/мин. Проведенная оптимизация позволила сократить основное время на операции шлифования направляющей на 30% (с 44 до 31 минуты).

2. Разработана и передана филиалу ОАО «ЕПК Самара» в г. Волжский утверждённая методика выбора оптимальных условий плоского шлифования, обеспечивающих достижение требуемого качества, в том числе, допуска плос-



костности обработанной поверхности боковых граней призматических направляющих линейных подшипников малой жёсткости при наибольшей производительности процесса с учетом упругого деформирования заготовки при закреплении и обработке

### **Заключение. Общие выводы**

В результате выполнения работы решена актуальная научно-производственная задача обеспечения требуемого качества обработанной поверхности призматических направляющих малой жёсткости линейных подшипников при наибольшей производительности процесса путем определения условий обработки, ограничивающих величины максимальных упругих деформаций с учетом сил резания и закрепления, изменения жесткости заготовки.

1. Разработана математическая модель максимальной упругой деформации призматической заготовки малой жесткости, основанная на теории изгиба балок, учитывающая: совокупность силовых факторов (силу резания, силу притяжения магнитного поля стола станка, собственный вес заготовки); количество опорных контактов соприкасающихся поверхностей заготовки и стола станка; форму поперечного сечения заготовки; увеличение изгибной жесткости заготовки при использовании компенсаторов; контактную деформацию поверхностей.

2. Разработан алгоритм выбора оптимальных условий плоского шлифования, обеспечивающих достижение требуемого качества, в том числе, допуска плоскостности обработанной поверхности боковых граней призматических направляющих линейных подшипников малой жёсткости при наибольшей производительности процесса плоского шлифования.

3. Разработана и передана филиалу ОАО «ЕПК Самара» в г. Волжский утверждённая методика выбора оптимальных условий плоского шлифования, обеспечивающих достижение требуемого качества, в том числе, допуска плоскостности обработанной поверхности боковых граней призматических направляющих линейных подшипников малой жёсткости при наибольшей производительности процесса. Результаты работы внедрены в учебный процесс по направлению 15.03.05 – Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительного производства при преподавании дисциплин «Технология шлифования» в Волжском политехническом институте (филиале) ВолгГТУ.

### Список сокращений и условных обозначений

$q_c$  – интенсивность равномерно распределённой нагрузки от действия усилия притяжения магнитного поля стола станка, Н/мм;

$q_m$  – интенсивность равномерно распределённой нагрузки от действия собственного веса заготовки, Н/мм

$w_{\max}$  – максимальное упругое перемещение при изгибе заготовки под действием силы резания, усилия притяжения магнитного поля стола станка и собственного веса заготовки, мкм;

$w_{p\max}$  – максимальное упругое перемещение при изгибе заготовки под действие силы резания и собственного веса заготовки, мкм;

$w_{q\max}$  – максимальное упругое перемещение при изгибе заготовки под действием усилия притяжения магнитного поля стола станка и собственного веса заготовки, мкм;

$y_n$  – зазор между поверхностями заготовки и стола, мкм;

$x_{\max}$  – координаты максимальных прогибов, мм;

$S$  – площадь поверхности заготовки контактирующей с поверхностью стола станка, мм<sup>2</sup>;

$k$  – число пар компенсаторов;

$[\Delta]$  – допускаемая максимальная упругая деформация заготовки;

$\lambda$  – коэффициент точности при проектировании;

$\Delta$  – допуск плоскостности поверхности на операции шлифования;

$\Delta_t$  – достижимое отклонение от плоскостности поверхности при шлифовании жёсткой заготовки;

$E$  – модуль продольной упругости материала заготовки, Мпа;

$I_z$  – осевой момент инерции поперечного сечения заготовки относительно центральной оси  $z$ , расположенной перпендикулярно плоскости изгиба, мм<sup>4</sup>;

$w_k$  – контактная деформация, мкм;

$w_{k1}$  – контактная деформация (сближение) за счёт деформации микронеровностей, мкм;

$w_{к2}$  - контактная деформация за счёт деформации волнистости, мкм;

$w_{к3}$  - контактная деформация (сближение) за счёт деформации макронеровностей, мкм;

$p_c$  - контурное давление в контакте, МПа;

$p_r$  - среднее фактическое давление, МПа;

$p_a$  - номинальное давление, МПа;

$v$  - параметр опорной кривой профиля шероховатости;

$t_m$  - относительная опорная длина профиля по средней линии, %;

$R_a$  - среднее арифметическое отклонение профиля, мкм;

$R_p$  - высота наибольшего выступа профиля, мкм;

$W_{max}$  - наибольшая высота волн, мкм;

$r_w$  - радиус кривизны выступов волнистости, мкм;

$q_k$  - распределённая по длине линии контакта нагрузка в Н/мм;

$p$  - удельная сила притяжения магнитного поля стола станка, МПа;

$[p_1]$  - минимально допускаемая удельная сила притяжения из условий отсутствия сдвига, проворота, опрокидывания заготовки, МПа;

$T_o$  - основное время шлифования, мин;

$T_{omin}$  - основное время шлифования без выхаживания при максимальной производительности обработки, мин;

$p_y$  - приведенное значение радиальной составляющей силы резания, Н/мм;

$p_z$  - приведенное значение тангенциальной силы резания, Н/мм;

$K_{ш}$  - коэффициента шлифования;

$c_1$  - твёрдость шлифовального круга, определяемая звуковым методом по приведённой скорости распространения акустических волн, м/с (ГОСТ Р 52710-2007);

$S_p$  - радиальная подача, мм/х;

$v_s$  - скорость подачи стола, м/мин;

$Q(v_s, S_p)$  - целевая функция приведенной производительности процесса, мм<sup>2</sup>/мин.

### Список литературы

1. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента. – М.: Издательство «Металлургия», 1969. – 155 с.
2. Алгоритм выбора оптимальных режимов плоского шлифования нежестких заготовок / Носенко В.А., Тышкевич В.Н., Саразов А.В., Орлов С.В.// Системы. Методы. Технологии. – 2017. - №1 (33). – С. 34-38.
3. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-х т. Т.1. – 9-е изд., перераб. и доп./ под ред. Жестовой.- М.: Машиностроение, 2006. – 928 с.
4. Басовский, Л. Е. Управление качеством: Учебник/ Л. Е. Басовский, В. Б. Протасов – М.: ИНФРА-М, 2005. – 212 с.
5. Балашов А.В., Жидецкая А.С., Потапов И.С., Светлова Т.Г. Технологическое обеспечение точности фрезерования нежестких деталей // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. – 2015. – №2(19). – С. 18-22.
6. Васильевых Л.С., Васильевых С.Л., Саитов В.Е. Исследование средств оснастки для снижения деформаций нежестких валов: монография. – Saarbrücken: LAP LAMBERTAcademic Publishing, 2013. – 152 с.
7. Васильевых Л.С., Васильевых С.Л., Саитов В.Е. Исследование формообразования нежестких валов за пределом упругости: монография. – Saarbrücken: LAP LAMBERTAcademic Publishing, 2013. – 172 с.
8. Васильевых С.Л., Саитов В.Е. Исследование виброустойчивости продольного течения нежестких валов: монография. – Saarbrücken: LAP LAMBERTAcademic Publishing, 2012. – 96 с.
9. Васильевых С.Л., Саитов В.Е. Формообразование деталей малой жесткости за пределом упругости // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – №5. – С. 9-10.
10. Влияние осевых деформаций на отклонение от плоскостности торцевой поверхности кольца подшипника при шлифовании / В.А. Носенко, В.Н. Тышкевич, С.В. Орлов, А.В. Саразов // Известия вузов. Машиностроение. - 2015. - № 9. - С. 68-74.

11. Влияние упругих деформаций на погрешность формы при закреплении и обработке колец подшипников / А.А. Копецкий, В.А. Носенко, В.Н. Тышкевич, С.В. Орлов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии- 2012. - № 2/3 (292) - С. 103-107.
12. Воронов С.А., Киселев И.А., Ма В., Ширшов А.А. Имитационная динамическая модель процесса шлифования сложнопрофильных деталей. Развитие методов моделирования // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2015. –№5. – С. 40-58.
13. Выбор оптимальных условий плоского шлифования стальных заготовок / В.А. Носенко, В.Н. Тышкевич, С.В. Орлов, А.В. Саразов, Е.А. Сукочева // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. - 2016. - № 6. - С. 73-81.
14. ГОСТ 21022-75. Сталь хромистая для прецизионных подшипников. Технические условия. - Введ. 1977-01-01. - М.: Изд-во стандартов, 1977. Переиздание 2000 - 17 с.
15. Гуле, Ж. Сопротивление материалов: справочное пособие: пер. с фр. / Ж. Гуле. – М.: Высшая школа, 1985 . – 192 с.
16. Дёмкин, Н. Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н. Б. Дёмкин, Э. В. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1981. – 244 с.
17. Дёмкин, Н. Б. Теория контакта реальных поверхностей и трибология/Н.Б. Дёмкин//Трение и износ.- 1995. № 6.- С. 1003-1024
18. Долотов А.М., Шестаков А.В. Динамика обработки деталей малой жесткости лезвийным инструментом // Механики XXI века. – 2005. – №4. – С. 252-253.
19. Драчев О.И. Управление технологической наследственностью деталей малой жесткости: монография. – Научно-производственный кооператив «Объединение научных инженерных коммерческих структур», 2011. – 192 с.
20. Зубарев Ю.М. Математическое описание процесса шлифования // Инструмент и технологии. – 2004. – №17–18. – С. 55 – 65.
21. Зубарев Ю.М. Теория и практика повышения эффективности шлифования материалов / Ю.М. Зубарев, А.В. Приемышев. – СПб.: Лань, 2010. – 304 с.
22. Исследование нежесткой технологической системы при торцовом фрезерова-

- нии инструментом с переменным шагом зубьев/Свинин В.М., Самородов П.А., Лобанов Д.В., Скиба В.Ю.//Системы. Методы. Технологии. 2016. № 4 (32). С. 39-44.
23. Исследование процессов шлифования внутренних и наружных конусов деталей класса колец: монография / Б. И. Коротков, С. Б. Коротков, В. Н. Тышкевич, С. В. Орлов. – Волгоград: РПК "Политехник", 2007. – 133 с.
24. Исследование упругих деформаций колец подшипников при механической обработке в кулачковом патроне / В.А. Носенко, В.Н. Тышкевич, А.В. Саразов, С.В. Орлов // Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. - Волгоград, 2016. - № 14 (193). - С. 25-29.
25. Колев К.С., Горчинов Л.М. Точность обработки и режимы резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 145 с.63
26. Копецкий, А.А. Исследование упругих деформаций колец подшипников при закреплении в кулачковом патроне / Копецкий А.А., Носенко В.А., Тышкевич В.Н.//Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки.-2013.-Вып.5.-С. 159-166.
- 27.Корсаков, В. С. Точность механической обработки/ В. С. Корсаков - М.: ГНТИМЛ, 1961.- 376 с.
28. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
29. Кремень З.И. Юрьев В.Г., Бабошкин А.Ф. Технология шлифования в машиностроении / под. ред. З.И.Кремня. – СПб.: Политехника, 2007. – 425 с.
30. Лобанов А.А. Исследование процесса фрезерования закаленной стали: дис. ... кан. техн. наук / ОАО «ЭНИМС». – Москва, 2006. – 139 с.
31. Лоладзе, Т. Н. Силы резания при шлифовании металлов. / Т. Н. Лоладзе //Металлообработка. - 2002. № 1. - С. 3-8.
32. Лурье Г.Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования. – М.: Машиностроение, 1984. – 103 с.
33. Лурье, Г. Б. Шлифование металлов / Г. Б. Лурье. – М.: Машиностроение, 1989. – 172 с.
34. Марочник сталей и сплавов. 2-е изд. доп. и испр./А.С. Зубченко, М.М. Колос-

ков, Ю.В. Каширский и др. Под общей редакцией А.С. Зубченко - М.: Машиностроение, 2003. - 784 с.

35. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.

36. Математическая модель корректировки режимов резания для обеспечения точности токарной обработки нежестких валов из коррозионностойких сталей на станках с ЧПУ / А.А. Жданов, А.Л. Плотников, Ю.Л. Чигиринский, И.В. Фирсов // Проблемы и инновации в области механизации и технологий в строительных и дорожных отраслях : сб. науч. тр. по матер. междунар. науч. конф. Вып. 2 / Саратовский ГТУ им. Гагарина Ю.А., ООО «СПЕЦДОРТЕХНИКА», Белорусско-Российский ун-т (Респ. Беларусь). - Иваново, 2016. - С. 36-40.

37. Матлин, М. М. Механика контактного взаимодействия твердых тел при начальном касании по линии / М.М. Матлин, А.В. Бабаков А.В. // Mechanika. – Kaunas University of Technology, 2000. - № 3. - С. 5.

38. Металлорежущие станки: учебник. В 2 т./Т.М. Авраамова, В.В. Бушуев, Л.Я. Гиловой и др.; под ред. В.В. Бушуева. Т.1. – М.: Машиностроение, 2011. - 608 с.

39. Мишнаевский, Л. Л. Износ шлифовальных кругов / Л. Л. Мишнаевский.– Киев: Наукова думка, 1982. – 192 с.

40. Моделирование осевых упругих деформаций при шлифовании торцов колец крупногабаритных подшипников / В.А. Носенко, В.Н. Тышкевич, А.В. Саразов, С.В. Орлов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2016. - № 5 (319). - С. 41-48.

41. Моделирование процесса стохастического взаимодействия инструмента и заготовки на операциях шлифования / Братан С.М., Богущкий В.Б., Новоселов Ю.К., Рощупкин С.И.//Научные технологии в машиностроении. 2017. № 5 (71). С. 9-18.

42. Нгуен, В. К. Многопараметрическая оптимизация плоского шлифования инструментов из быстрорежущих сталей: дисс. ... кан. техн. наук / В. К. Нгуен. - Ирк. нац. исс. тех. ун-т. – Иркутск, 2017. – 216 с.

43. Нгуен, В. Л. Обеспечение требуемого качества поверхностей при плоском



шлифовании закаленных стальных деталей различной жесткости: дисс... кан. техн. наук / В. Л. Нгуен.- Ирк. нац. исс. тех. ун-т. – Иркутск, 2017. – 224 с.

44. Нгуен, М.Т. Повышение качества плоского шлифования деталей из высокопрочных коррозионностойких сталей высокопористыми нитридборовыми кругами: дисс. ... кан. техн. наук / М. Т. Нгуен - Ирк. нац. исс. тех. ун-т. – Иркутск, 2017. – 176 с.

45. Носенко В.А. Математическая модель формирования рабочей поверхности круга при шлифовании / В.А. Носенко, Е.В. Федотов, М.В. Даниленко // Инструмент и технологии. – 2006. – Вып.1. – №24–25. – С. 151 – 154.

46. Носенко В.А. Носенко С.В. Технология шлифования металлов / В.А. Носенко, С.В. Носенко. – Старый Оскол: ТНТ, 2013. – 616 с.

47. Носенко, В. А. Определение допускаемых значений вертикальной составляющей силы плоского шлифования подшипниковых колец малой осевой жесткости / В. А. Носенко, В. Н. Тышкевич, С. В. Орлов // Справочник. Инженерный журнал. – 2008. – №4. – С. 24-32.

48. Носенко, В. А. Влияние наработки, твёрдости круга и режимов на радиальную и тангенциальную составляющие силы шлифования / В. А. Носенко, С. В. Орлов, А. А. Крутикова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии – Технология – 2011 : сб. науч. тр. XIV междунар. науч.-техн. конф. (г. Орел, 5-7 окт. 2011 г.). / Технологический институт им. Н.Н. Поликарпова ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК». – Орел, 2011. – С. 56-58.

49. Носенко, В. А. Влияние режимов обработки и твёрдости круга на составляющие силы шлифования подшипниковой стали / В. А. Носенко, С. В. Орлов, А. А. Крутикова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии / - 2011. - № 4/3 (288) - С. 94-99.

50. Носенко, В. А. Исследование влияния характеристик абразивного инструмента и режимов обработки на силу шлифования  $P_y$  / В. А. Носенко, С. В. Орлов, А. А. Крутикова // Научный потенциал XXI века: матер. V междунар. науч. конф. Т. I. Естественные и технические науки / ГОУ ВПО Сев.-Кав гос. техн. ун-т, Ком. Ставропольского края по делам молодёжи. - Ставрополь, 2011. - С. 249-251.

51. Носенко, В. А. Исследование влияния характеристик круга и режимов обработки на радиальную составляющую силы шлифования / В. А. Носенко, С. В. Орлов, А. А. Крутикова // Инновационные технологии в обучении и производстве: матер. VII всерос. науч. - практ. конф., г. Камышин, 22-23 дек. 2010 г. В 5 т. Т. 2 / ГОУ ВПО ВолгГТУ, КТИ (филиал) ВолгГТУ. - Волгоград, 2011. - С. 41-43.
52. Носенко, С. В. Лабораторный практикум по дисциплине «Методы и средства измерений, испытаний и контроля»: учеб. пособие / С. В. Носенко, А. В. Морозов, А.И. Катаржин, В.А. Носенко; ВПИ (филиал) ВолгГТУ. – Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ, 2012. – 126 с.
53. Носенко, В. А. Определение осевых перемещений при шлифовании торцов подшипниковых колец / В.А. Носенко, В.Н. Тышкевич, С.В. Орлов, В.Б. Светличная // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2010. – № 2. – С. 70 –74.
54. Носенко, В. А. Разработка регрессионных математических моделей составляющих силы шлифования стали ШХ15 / В. А. Носенко, С. В. Орлов, А. А. Крутикова // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. тр. XVIII междунар. науч. - техн. конф. (г. Севастополь, 12-17 сент. 2011 г.). В 4 т. Т. 2 / Донецкий нац. техн. ун-т [и др.]. – Донецк, 2011. – С. 255-259.
55. Носенко, В.А. Исследование влияния твердости инструмента и режимов обработки на радиальную и тангенциальную составляющие силы шлифования / В. А. Носенко, С. В. Орлов, А. А. Крутикова // Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства: труды III Международной науч. - техн. конф. (Резниковские чтения) / под ред. Л. А. Резникова [и др.]. – Тольятти: ТГУ, 2011. – С. 128 – 134.
56. Носенко, В.А. Обеспечение требуемого качества торцовых поверхностей колец подшипников шлифованием / В.А. Носенко, В.Н. Тышкевич, С.В. Орлов // Сборка в машиностроении, приборостроении. - 2015. - № 3. - С. 31-35.
57. Носенко, В.А. Повышение эффективности плоского шлифования нежестких заготовок путём управления упругими деформациями / В. А. Носенко, В. Н. Тышкевич, А. В. Саразов // Вестник Рыбинского гос. авиационной технологической академии им. П.А. Соловьёва. - 2017. - № 2 (41). - С. 342-348.

58. Определение контактных деформаций при плоском шлифовании торцов колец крупногабаритных подшипников / В.А. Носенко, В.Н. Тышкевич, А.В. Саразов, С.В. Орлов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2016. - № 6 (320). - С. 50-54.
59. Оптимальные условия шлифования торцевых поверхностей колец крупногабаритных подшипников/ В. А. Носенко, В. Н. Тышкевич, С. В. Орлов, А. В. Саразов // Вестник машиностроения. 2015. - № 4. - С. 60 –66.
60. Орлов С.В. Повышение эффективности шлифования торцов колец крупногабаритных подшипников путем управления осевой упругой деформацией: дисс... канд. техн. наук (05.02.7). Волгоград: ВолгГТУ, 2014. – 142 с.
61. Оробинский, В. М. Абразивные методы обработки и их оптимизация / В. М. Оробинский. - Волгоград: ВолгГТУ, 2000. - 314 с.
62. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1981. – 144 с.
63. Панчук, В. Г. Информационно-измерительная система сбора данных при силовых исследованиях процесса резания / В. Г. Панчук. – Киев, Украина, - 2008.
64. Пат. 2647724 Российская Федерация, МПК В24В1/00, В24В7/04, В24В7/16 Способ шлифования на станках с круглым магнитным столом торцов детали в виде кольца / В.Н. Тышкевич, В.А. Носенко, А.В. Саразов, С.В. Орлов; ВолгГТУ. - 2018.
65. Патент (РФ) №2107604. Способ устранения изогнутости торцов колец шлифованием и компенсатор / Коротков Б. И. и др. Опублик. в БИ 1998, № 9.
66. Плоское шлифование торцов колец крупногабаритных подшипников с требуемым качеством поверхности/ Носенко В.А., Тышкевич В.Н., Орлов С.В., Саразов А.В. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2014. - Т. 14. - № 4. - С. 67-78.
67. Повышение точности токарной обработки нежестких деталей из конструкционных сталей на станках с ЧПУ / А.А. Жданов, А.Л. Плотников, Ю.Л. Чигиринский, И.В. Фирсов // Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. - Волгоград, 2016. - № 5 (184). - С. 11-14.

68. Подпоркин, В.Г. Обработка нежестких деталей/В.Г.Подпоркин. – М.; Л.: Машгиз, 1959. –208 с.
69. Полянчиков, Ю. Н. Анализ и оптимизация операции шлифования: Монография / Ю. Н. Полянчиков, А. Н. Воронцова, Н. А. Чернышев и др. – М.: Машиностроение, 2003.- 270 с.
70. Пономарев, В. Б. Математическое моделирование технологических процессов: курс лекций / В. Б. Пономарев, А. Б. Лошкарев. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2006. - 129 с.
71. Профильные рельсовые направляющие серии LLT SKF. - SKF Group 2010 - MT/P1 07061/2 RU – 46 с.
72. Процессы теплообразования при шлифовании металлов / под. ред. С.Г. Редько. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1962. – 299 с.
73. РД 37.001-87. Нормативы времени на обработку деталей и сборку крупногабаритных подшипников. - М.: НПО ВНИПП, 1987.
74. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1981. – 280 с.
75. Резницкий Л.М. Механическая обработка закаленных сталей. – М.:Машгиз, 1958. – 393 с.
76. Реклейтис Г. Оптимизация в технике / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел. – М.: Мир, 1986. – 347 с.
77. Реченко Д. С. Факторы, влияющие на параметры шлифования / Д. С. Реченко, А. Ю. Попов // Технология машиностроения. – 2010. – № 11. – С. 24-28.
78. Решетов Д.Н. Детали машин: Учебник для студентов машиностроительных и механических специальностей вузов. 4-еизд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 496 с.
79. Рывкин, Б.М. О параметрах, влияющих на жесткость роликовых направляющих модульного типа/ Б.М.Рывкин, В.В.Молодцов // Актуальные проблемы в машиностроении. 2014. № 1. С. 223-228.
80. Рыжов Э.В. Оптимизация технологических процессов механической обработки / Э.В. Рыжов, В.И. Аверченков. – Киев: Наука. Думка, 1989. – 192 с.

81. Саитов, А.В. Интенсификация токарной обработки нежестких валов/А.В.Саитов, С.Л.Васильевых, В.Е.Саитов//Современные наукоемкие технологии № 7, 2015 – С. 71-73.
82. Сидняев, Н. И. Теория вероятности и математическая статистика / Н. И. Сидняев. М.: Юрайт, 2011.- 221 с.
83. Сидняев, Н.И.Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных/ Н. И. Сидняев. М.: Юрайт, 2013.- 495 с.
84. Соболев И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И.М. Соболев, Р.Б. Статников. – М.: Дрофа, 2006. – 175 с.
85. Соколовский А.П. Жесткость в технологии машиностроения. – М.: Машгиз, 1956. – 207 с.
86. Солер Я.И., Гайсин С.Н., Казимиров Д.Ю. Статистические модели микрогеометрии поверхности при плоском шлифовании абразивными высокопористыми кругами деталей переменной жесткости из стали 12Х18Н10Т // Металлообработка. – 2005. – №3. – С. 12-16.
87. Солер Я.И., Казимиров Д.Ю., Стрелков А.Б. Разработка информационной базы для управления точностью формы шлифованных плоских деталей из ВНС-2 при нелинейной параметризации их жёсткости // Вестник ИрГТУ. Серия технология машиностроения. – 2006. – № 4(28). – С. 79-87.
88. Солер Я.И., Казимиров Д.Ю., Стрелков А.Б. Статистическая механика формирования шлифованных поверхностей абразивными кругами высокой пористости при нелинейной параметризации жёсткости плоских деталей из стали 13Х15Н4АМЗ // Механики-XXI века: Сб. докл. VI ВНТК. – Братск: ГОУ ВПО БрГУ. – 2007. – С. 301-309.
89. Солер Я.И., Стрелков А.Б. Поиск стохастических моделей шлифования высокопористыми кругами для изучения погрешности формы плоских поверхностей деталей из стали ВНС-2 при нелинейной параметризации их жёсткости //Высокие технологии в машиностроении. – Самара: СамГТУ. – 2006. – С. 551-556.
90. Солер Я.И., Стрелков А.Б. Статистические методы оценки средних шагов неровностей профиля при плоском шлифовании высокопористым абразивным ин-

струментом деталей из стали 08X15H5Д2Т с нелинейной параметризацией жёсткости // Материалы и технологии XXI века: Сб. ст. V МНТК. – Пенза: АНОО «ПДЗ». – 2007. – С. 87-89.

91. Солер, Я. И. Моделирование и прогнозирование отклонений от плоскостности при плоском шлифовании деталей из закаленной стали 30ХГСА / Я.И. Солер, Ван Ле Нгуен // Вестник ИрГТУ. – 2016. – № 4(111). – С. 54-65.

92. Солер, Я. И. Моделирование прижогов при шлифовании закаленных деталей из стали 30ХГСА / Я.И. Солер, Ван Ле Нгуен, Д.Ю. Казимиров // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2016. – №4(673). – С. 71-81.

93. Солер, Я. И. Оптимизация производительности процесса плоского шлифования и качества закаленных деталей из стали 30ХГСА с различной податливостью / Я.И. Солер, Ван Ле Нгуен // Вестник ИрГТУ. – 2017. Т. 21. – № 2. – С. 32–43.

94. Солер, Я. И. Оценка режущих способностей нитридборовых высокопористых кругов при плоском шлифовании деталей из стали 13Х15Н5АМЗ по макрогеометрии поверхности с использованием искусственного интеллекта / Я. И. Солер, Мань Тием Нгуен, Динь Ши Май // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2016. – № 12 [681]. – С. 66–78.

95. Солер, Я. И. Поиск моделей дисперсионного анализа для прогнозирования шероховатости с учетом режима шлифования деталей из стали 06Х14Н6Д2МВТ-Ш высокопористыми нитридборовыми кругами / Я. И. Солер, Мань Тием Нгуен // Вестник ИрГТУ, 2017. – Vol. 21. – № 1(120). – С. 40.

96. Солер, Я. И. Прогнозирование микрогеометрии при маятниковом шлифовании плоских деталей из стали 13Х15Н4АМЗ высокопористыми инструментами / Я.И. Солер, Ван Ле Нгуен, И.А. Гуцол // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – №2(63). – С. 21-30.

97. Солер, Я. И. Статистические подходы к микрорельефу плоских деталей из закаленной стали 08Х15Н5Д2Т при маятниковом шлифовании высокопористыми кругами из кубического нитрида бора и синтеркорунда / Я.И. Солер, Ван Ле Нгуен, И.А. Гуцол // Вестник ИрГТУ. – 2014. – №4(87). – С. 33-40.

98. Солер, Я. И. Стратегия плоского шлифования деталей переменной жёсткости/

Я. И. Солер, Д. Ю. Казимиров // Металлообработка. - 2006. № 1. С. 2 - 7.

99. Солер, Я.И. Прогнозирование чистового режима шлифования быстрорежущих пластин переменной податливости при многопараметрической оптимизации шероховатости / Я.И. Солер, В.К. Нгуен, Н.А. Хоанг // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2017. – № 4. – С. 35 – 46.

100. Солер, Я.И. Выбор схемы задания поперечной подачи при шлифовании пластин Р9М4К8 кругом *Norton Vitrium* по прижогам и микротвердости / Я.И. Солер, В.К. Нгуен // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2017. – № 3. – С. 13 – 21.

101. Солер, Я.И. Управление шероховатостью при плоском шлифовании пластин Р9М4К8 переменной податливости высокопористыми нитридоборовыми кругами / Я.И., Солер, А.И.Шустов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 9 (128).- С. 27-36.

102. Соппротивление материалов/ Г.С. Писаренко и др. – Киев.: Виша школа, 1984. – 704 с.

103. Спиридонов, А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

104. Способы регулирования точности при обработке нежестких валов на токарных станках с ЧПУ / А. Л. Плотников, Ю. Л. Чигиринский, А. А. Шмаров, Д. С. Ключиков // Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. - Волгоград, 2012. - № 13 (100). - С. 39 -43.

105. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 1/ Под ред. А.М. Дальского, А.Г.Косиловой, Р.К.Мещерякова, А.Г.Суслова. - Москва, Машиностроение-1, 2001. 912 с.

106. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т.Т. 2 / под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – 656 с.

107. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2/ Под редакцией А.М. Дальского и др. – 5-е изд., исправл. – М.: Машиностроение – 1 т., 2003. – 944 с.

108. Станочные приспособления: Справочник в 2-х т./ Под ред. Б. Н. Вардашки-

- на, В. В. Данилевского. М.: Машиностроение, 1984. Т.1. 592 с., с. 495-513.
109. Старков В.К. Физика и оптимизация резания материалов. – М.: Машиностроение, 2009. – 640 с.
110. Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами. – М.: Машиностроение, 2007. – 688 с.
111. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 317 с.
112. Суслов А.Г. Табличные способы назначения параметров шероховатости поверхностей деталей машин / А.Г. Суслов, И.М. Корсокова // Справочник. Инженерный журнал. – 2008. – №4. – С. 9 – 15.
113. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя детали. – М.: Машиностроение, 1987. – 206 с.
114. Суслов А.Г., Безъязычный В.Ф., Панфилов Ю.В. [и др.] Инженерия поверхности деталей. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
115. Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2-х кн./Под ред. И.В. Крагельского, В. В. Алисина. – М.: Машиностроение, 1978 – Кн. 1. 1978. 400 с.
116. Тышкевич, В.Н. Повышение эффективности плоского шлифования торцов призматических заготовок малой жёсткости / В.Н. Тышкевич, В.А. Носенко, А.В. Саразов // Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. - Волгоград, 2017. - № 9 (204). - С. 105-108.
117. Тышкевич, В.Н. Optimization of conditions for small-rigid prismatic workpieces flat grinding by elastic deformations controlling / В.Н. Тышкевич, В.А. Носенко, А.В. Саразов // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 709: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2019 (ICMTME 2019) (Sevastopol, 9-13 September, 2019). – [IOP Publishing], 2020. – 8 p. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/709/3/033055/pdf>.
118. Унянин, А.Н. Повышение точности маложестких деталей за счет компенсации упругих деформаций заготовок в процессе обработки/ А.Н.Унянин //Вестник современных технологий – 2016.-№2. – С. 72-79.



119. Управление осевыми упругими деформациями нежёстких колец подшипников при плоском шлифовании торцов / В.А. Носенко, В.Н. Тышкевич, А.В. Саразов, С.В. Орлов // Известия вузов. Машиностроение. - 2017. - № 1 (682). - С. 63-70.
120. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование. – М.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1979. – 248 с.
121. Филимонов Л.Н. Плоское шлифование / Под ред. Муцянка. 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1985. – 109 с.
122. Фокин В.Г. Расчет методом конечных элементов температурного поля при плоском шлифовании // Сборник материалов всероссийской научно-технической интернет-конференции «Высокие технологии в машиностроении». – 2014. – С. 126-128.
123. Худобин Л. В. Шлифование заготовок из коррозионностойких сталей с применением СОЖ / Л.В. Худобин, М.А. Белов. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1989. – 148 с.
124. Чигиринский, Ю.Л. К вопросу управления точностью продольного профиля деталей типа нежёсткий вал / Ю.Л. Чигиринский, П.С. Нестеренко // Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. - Волгоград, 2017. - № 5 (200). - С. 43-45.
125. Чигиринский, Ю.Л. Influence of Finishing Methods of Treatment on Condition of Steel 36NiCrMo16 Part Surface Layer [Электронный ресурс] / Ю.Л. Чигиринский, И.В. Фирсов, П.С. Нестеренко // Procedia Engineering. Vol. 206 : International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2017) (Saint-Petersburg, Russian Federation, May 16-19, 2017) / ed by A.A. Radionov ; Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, South Ural State University (national research university), Platov South-Russian State Polytechnic University and Far Eastern Federal University. – [Published by Elsevier Ltd.], 2017. – P. 1252–1257. – URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817353122>.
126. Чичинадзе, А. В. Трение, износ и смазка (трилогия и триботехника) / А. В. Чичинадзе, Э. М. Берлинер, Э. Д. Браун и др.; под общ. ред. А. В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.

127. Шелихов, Е.С. Исследование факторов, влияющих на значение бочкообразности при токарной обработке нежестких заготовок / Е.С. Шелихов, А.М.Черноусова, О.С. Ануфриенко //Фундаментальные исследования. 2015. № 7-4. - С. 788-792.
128. Эльянов В.Д., Куликов В.Н. Прижоги при шлифовании. – М.: НИИ-МАШ,1974. – 63 с.
129. Якимов А.В. Оптимизация процессов шлифования. – М.: Машиностроение, 1975. – 176 с.
130. Якимов А.В. Управление процессом шлифования / А.В. Якимов, А.Н. Паршаков, В.И. Свирщев и др. – К.: Теніка, 1983. – 184 с.
131. Ящерицын П.И. Прогрессивные методы плоского шлифования периферией круга / П.И. Ящерицын, Б.П. Купцов. – Минск: Институт научно-технической информации и пропаганды при госплане БССР, 1967. – 56 с.
132. Ящерицын П.И. Шлифование металлов / П.И. Ящерицын, Е.А. Жалнерович. – Минск: Беларусь, 1970. – 464 с.
133. Aoyama T., Kakinuma Y. Development of fixture devices for thin and compliant workpieces // Annals of the CIRP. – 2005. – Vol. 54(1). – Pp. 325-328.
134. Asokan, P. Optimization of surface grinding operations using particle swarm optimization technique / AsokanP., BaskarN., BabuK., PrabhaharanG., SaravananR. (National Institute of Technology, Trichy, India). – Trans. ASME. J. Manuf. Sci. and Eng.. 2005. 127, N 4, P. 885-892.
135. Ali Y.M., Zhang L.C. Surface roughness prediction of ground components using a fuzzy logic approach // Journal of Materials Processing Technology. – 1999. – Vol. 89-90. – Pp. 561–568.
136. Bratan, S.M. Influence of the tool working surface state on evaluation of the forming filter parameters/Bratan, S.M. //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Volume 709, Issue 2, 3 January 2020, Номер статьи 022009 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2019, ICMTME 2019; Sevastopol; Russian Federation; 9 September 2019 до 13 September 2019

137. Bratan, S. Flat grinding model, considering internal dynamics of the process/Bratan, S., Vladetskaya, E. //MATEC Web of Conferences Volume 224, 30 October 2018, Номер статьи 01002 2018 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2018; Sevastopol; Russian Federation; 10 September 2018 до 14 September 2018
138. Brinksmeier E., Aurich J.C., Govekar E. et al. Advances in modeling and simulation of grinding processes // Annals of the CIRP. – 2006. – Vol. 55. – Pp. 667-696.
139. Chomienn V., Valiorgue F., Rech J., Verdu C. Influence of part's stiffness on surface integrity induced by a finish turning operation of a 15-5PH stainless steel // Science Direct 3rd CIRP Conference on Surface Integrity (CIRP CSI). -2016. –Pp. 19-22.
140. Czenkusch C. Technologische Untersuchungen und Prozessmodel zum Rundschleifen. Dissertation. University of Hannover, 2000.
141. Faran Baig and et al. Design and simulation of fuzzy logic based elid grinding control system // International journal of advanced technology & engineering research (IJATER). – 2013. – Vol. 3. – Pp. 79-88.
142. Haykin S. Neural Networks: A Comprehensive Foundation. 2nd. ed. Prentice Hall. Upper Saddle River. NJ, 1998. – 842 p.
143. Inasaki I. Grinding process simulation based on the Wheel topography Measurement// Annals of the CIRP. – 1996. – Vol. 45/1. – Pp. 347-350.
144. Jermolajev S., Epp J., Heinzl C., Brinksmeier E. Material Modifications Caused by Thermal and Mechanical Load During Grinding // 3rd CIRP Cjnference on Surface Integrity / Procedia CIRP 45.- 2016. – Pp. 43-46.
145. Jiao Y., Lei S., Pei Z.J., Lee E.S. Fuzzy adaptive networks in machining process modeling surface roughness prediction for turning operations // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2004. – Vol. 44. – Pp. 1643-1651.
146. Klocke F., Brinksmeier E., Weinert K.. Capability profile of hard cutting and grinding processes // CIRP Annals - Manufacturing Technology. – 2005. – No. 54(2). – Pp. 22-45.
147. Kopetskii, A.A. Influence of Shift of Clamping Forces on Elastic Deformations of the Bearing Ring in a Jaw Gripper / A.A. Kopetskii, V.A. Nosenko, V.N. Tyshkevich //

- Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2014, Volume 43, No. 1, pp. 55-59.
148. Kruszynski B.W., Midera S. Forces in Generating Gear Grinding-Theoretical and Experimental Approach // Annals of the CIRP. – 1998. – Vol. 47/1. – Pp. 287-290.
  149. Law S.S., Wu S.M. Simulation Study of the Grinding Process // Transactions of the ASME Journal of Engineering for Industry. – (November) 1973. – Pp. 972-978.
  150. Lipiński D., Bałasz B., Rypina L. Modelling of surface roughness and grinding forces using artificial neural networks with assessment of the ability to data generalization // International Journal of Advanced Manufacturing Technology/ - 2017/Volume:94, Issue:1, pp 1335-1347.
  151. Maity S.R., Chakraborty S. Grinding wheel abrasive material selection using fuzzy TOPSIS method // Materials and manufacturing processes. – 2013. – Vol. 28. – Pp. 408-417.
  152. Pahlitzsch A. Selbstangeregte Schwingungen als Ursache des Ratterns beim Schleifen / A. Pahlitzsch, E. O. Cuntze // Klepzig – Fachberichte. – 1964. – № 4. – P. 35 – 36.
  153. Peklenik J. Ermittlung von geometrischen und physikalischen Kenngrößen für die Grundlagenforschung des Schleifens. – Dissertation, TH. Aachen, 1957. – 250 p.
  154. Peng B., Bergs T., Schraknepper D., Klocke F., Döbbeler B. A hybrid approach using machine learning to predict the cutting forces under consideration of the tool wear // 17th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations Procedia / CIRP 82. – 2019.- Pp.302–307.
  155. Ratchev S., Liu S., Huang W., Becker A.A. A flexible force model for endmilling of low-rigidity parts. Journal of Materials Processing Technology // Proceedings of the International Conference in Advances in Materials and Processing Technologies. – 2004. – Vol. 153-154. – Pp. 134-138.
  156. Rowe W.B. Application of artificial intelligence in grinding / W.B. Rowe, I. Yan, I. Inasaki et al. // CIRP Annals – manufacturing Technology. – 1994. – №43 (2). – P. 521 – 525.
  157. Sawicki J., Kruszyński B., Wójcik R. The influence of grinding conditions on the distribution of residual stress in the surface layer of 17CRNi6-6 steel after carburizing //

Advances in Science and Technology Research Journal Volume 11, Issue 2, June 2017.  
- Pp. 17–22.

158. Soler Ya.I., Classification of flat instrumental plates by topography of ground surface using cluster analysis / Ya.I. Soler, V.C. Nguyen, D.Yu. Kazimirov // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. Vol. 11.Issue 21.P. 12715 – 12723.

159. Soler, Ya. I. Selection of Highly Porous CBN Wheels in the Multiparametric Modeling of Topography for the Grinding of Stainless Steel Parts Using Fuzzy Logic / Ya. I. Soler, Nguyen Manh Tiem // Russian Engineering Research, 2016, -Vol. 36.– № 11. – P. 965–973.

160. Soler, Ya.I. Microhardness of High-Speed P12Φ3K10M3 Steel Plates in Pendulum Grinding by the Periphery of Abrasive Wheels / Ya.I. Soler, V.C. Nguyen // Russian engineering research. 2015. Vol. 35. Issue 10. P. 785 – 791.

161. Surface quality in cutting process as the result of reflection of dynamic characteristics of an elastic system / Sabirov F.S., Lukashina Y.A., Yakhutlov M.M.// В сборнике: Proceedings of the 2018 International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies", IT and QM and IS 2018 2018. P. 469-470.

162. Świć A., Taranenko W. Adaptive control of machining accuracy of axialsymmetrical low-rigidity parts in elastic-deformable state // Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability. – 2012. – Vol. 14 (3). – Pp. 215-221.

163. Taylor F. W. On the art of cutting Metal // ASME Journal. – 1906. – Vol. 28. –Pp. 70.

164. The determination of axial displacements during bearing end face grinding / V.A. Nosenko, V.N. Tyszkiewicz, S.V. Orlov, V.B. Svetlichnaya // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. - 2010. - Vol. 39, No 2. - P. 157-160.

165. Tönshoff H.K., Czenkusch C., Brinksmeier E., Heinzl C. Modelling of grinding processes with fuzzy and neural nets compared to multiple regression // Conference proceeding: EUFIT 97, 5th Europ. Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing. – 1997. – No. 3. – Pp. 2064-2068.

166. Yoshikawa H., Peklenik J. Three dimensional simulation techniques of the grind-

ing process – II, Effects of grinding conditions and wear on the statistical distribution of geometrical chip parameters // Annals of the CRP. – 1970. – Vol. 18/1. – Pp. 361-366.

167. Zadeh L. Fuzzy sets // Information and Control. – 1965. – Vol. 8. – Pp. 338– 353.

168. <http://www.bergab.ru/lmlineargides.shtml>

169. <http://www.mostechprom.ru/linear/linear.html#use>

## Акт внедрения в производство

«Утверждаю»

Зам. директора по тех. части

филиала ОАО «ЕПК Самара»

Силантьев М.В.

2018 г.



## А К Т

внедрения методики выбора оптимальных режимов плоского шлифования боковых граней призматических направляющих линейных подшипников малой жёсткости с управлением их упругим деформированием при закреплении и обработке

В 2016–2018 гг. Волжским филиалом ОАО «ЕПК Самара» с Тышкевичем В. Н. и Саразовым А. В. были проведены совместные расчетно-экспериментальные исследования процесса обеспечения точности плоского шлифования боковых граней призматических направляющих линейных подшипников малой жёсткости.

На основании проведенных исследований были внедрены в производство следующие результаты диссертационных работ Тышкевича В. Н. и Саразова А.В.:

1) методика выбора оптимальных режимов плоского шлифования боковых граней призматических направляющих линейных подшипников малой жёсткости с управлением их упругим деформированием при закреплении и обработке;

2) рекомендации по определению условий, обеспечивающих возможность устранения отклонений от плоскостности боковых граней призматических направляющих линейных подшипников малой жёсткости шлифованием.

Серия производственных испытаний, проведенных на Волжском филиале ОАО «ЕПК Самара» в 2018 г., показала, что рекомендованные условия шлифования обеспечивают заданные параметры качества обработанной поверхности призматических направляющих линейных подшипников малой жёсткости при повышении производительности процесса в среднем на 35%.

Считать результаты диссертационных работ Тышкевича В.Н. и Саразова А. В. внедренными. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения результатов составляет 300 тыс. руб.

Настоящий акт не является поводом для финансовых взаиморасчетов.

Начальник технического отдела Филиала  
ОАО «ЕПК Самара»

Панкратова Я. В.



## Акт внедрения в учебный процесс

УТВЕРЖДАЮ

Директор Волжского политехнического  
института (филиала) ФГБОУ  
«Волгоградский государственный  
технический университет»,  
**А. В. Фетисов**  
« 22 » 2018 года

## АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящий акт составлен в том, что в Волжском политехническом институте на кафедре «Технология и оборудование машиностроительных производств» в учебный процесс внедрено учебно-методическое пособие «Лабораторный практикум по дисциплине «Технология шлифования»» (авторы - В. А. Носенко, Р. А. Белухин, А. А. Крутикова, А. А. Александров, А. В. Саразов. - Волжский, 2018. – 104 с. - 10,06 МБ. — [Режим доступа: <http://lib.volpi.ru>])

В учебно-методическом пособии приведены методические указания и теоретический материал к одиннадцати лабораторным работам по технологии шлифования. Работы построены так, что каждая из них является базой для понимания последующего излагаемого материала.

В первой работе приведены основные виды абразивных материалов, раскрыты основные характеристики абразивного инструмента и рекомендуемые области его применения. Студенты осваивают методику определения основных размеров шлифовальных кругов.

Вторая и третья лабораторные работы знакомят студентов с понятием импрегнирование, дают возможность определить влияние различных импрегнирующих составов на такие параметры, как твердость и неуравновешенность шлифовальных кругов. Раскрыты методики определения степени твердости и класса неуравновешенности.

На точность технологической операции кроме точности оборудования влияет и его жесткость. Для установления и назначения поправок при обработке необходимо знать силы, действующие в зоне резания. Поэтому в четвертой лабораторной работе приведена методика определения составляющих силы шлифования. Рассмотрено плоское шлифование. Также даны определения основным кинематическим элементам и характеристикам шлифования.

Абразивный инструмент, как и любой другой режущий инструмент, в процессе работы теряет свою форму и режущую способность. Пятая лабораторная работа раскрывает процессы, происходящие на рабочей поверхности абразивного инструмента. Здесь же показаны методы определения режущей способности и коэффициента шлифования кругов при плоском шлифовании и различные варианты восстановления (обновления) рабочей поверхности инструмента в результате его правки.

При обработке материалов различными видами абразивных инструментов скорость резания достигает десятков метров в секунду, что в сочетании с силовой нагрузкой и возможным ударным взаимодействием (при обработке прерывистой рабочей поверхности, или при работе сборными шлифовальными кругами) может привести к разрушению шлифовального круга или отрыву его частей. Поэтому изучение теоретического материала и выполнение практической части шестой лабораторной работы «Испытание кругов на безопасность работы» рассматривается как обязательная составляющая при подготовке специалистов в области технологии машиностроения.

В седьмой лабораторной работе изучаются технологические возможности глубокого шлифования. Показана необходимость в применении при данном виде обработки специального оборудования, инструмента и схем шлифования.



В восьмой лабораторной работе студенты знакомятся с основными параметрами, характеризующими качество обработанной поверхности и методами получения математических моделей формирования указанных параметров под действием режимных факторов.

Целью девятой лабораторной работы является ознакомление студентов с устройством и методикой проведения испытаний на экспресс установке. Последняя позволяет производить исследования по правильному подбору смазочно-охлаждающей жидкости, оценивая её эксплуатационно-технологические свойства.

Десятая лабораторная работа знакомит студентов с методикой экспериментального исследования размеров и формы зерен шлифовальных порошков на оптическом микроскопе. Знание геометрических параметров зерен необходимо технологу, так как они влияют на качество обработанной поверхности, силу резания, температуру в зоне контакта.

В одиннадцатой лабораторной работе изучается методика тарировки усилия притяжения магнитного поля стола шлифовального станка.

Все лабораторные работы дополнены вопросами для самопроверки и контроля изучения теоретического материала.

Носенко, В. А. Лабораторный практикум по дисциплине "Технология шлифования" [Электронный ресурс] учебно-методическое пособие. / В. А. Носенко, Р. А. Белухин, А. А. Крутикова, А. А. Александров, А. В. Саразов. - Волжский, 2018. - 104с. - 10,06 МБ. — [Режим доступа: <http://lib.volpi.ru>]

На учебно-методическое пособие получены положительные отзывы от **рецензентов**:

- зав. кафедрой технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», д. т. н., профессора Веткасова Н.И.;

- доктора физико-математических наук, профессора кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника» филиала ФГБОУ ВО НИУ МЭИ Кулькова В. Г.

**Заключение:** учебно-методическое пособие Лабораторный практикум по дисциплине "Технология шлифования" используется в учебном процессе по направлению подготовки 15.03.05 "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств" при изучении разделов дисциплин «Технология машиностроения», «Технология шлифования».

Зав. кафедрой «Технология и оборудование машиностроительных производств»  
ВПИ (филиал) ВолгГТУ, д.т.н., профессор

В. А. Носенко

**СОГЛАСОВАНО**

Зам. директора по тех. части  
филиала ОАО «ЕПК Самара»  
Силантьев М. В.

« 17 » \_\_\_\_\_ 2018 г.


**УТВЕРЖДАЮ**

Директор  
Волжского политехнического института  
(филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский госу-  
дарственный технический университет»  
Фетисов А. В.

« 17 » \_\_\_\_\_ 2018 г.


**МЕТОДИКА**

**ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ПЛОСКОГО ШЛИФОВАНИЯ БОКОВЫХ  
ГРАНЕЙ ПРИЗМАТИЧЕСКИХ НАПРАВЛЯЮЩИХ ЛИНЕЙНЫХ ПОДШИПНИКОВ  
МАЛОЙ ЖЁСТКОСТИ С УПРАВЛЕНИЕМ ИХ УПРУГИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ  
ПРИ ЗАКРЕПЛЕНИИ И ОБРАБОТКЕ**

Волжский

2018

## ВВЕДЕНИЕ

При шлифовании боковых поверхностей заготовок призматических направляющих линейных подшипников малой жёсткости упругие деформации заготовки усложняют обеспечение требуемого качества, в частности, заданного допуска плоскостности обработанной поверхности.

При закреплении магнитным полем стола и шлифовании заготовка малой жёсткости получает упругую деформацию. После завершения шлифования и снятия магнитного поля в результате упругой деформации определенные отклонения от плоскостности боковой поверхности заготовки возвращаются.

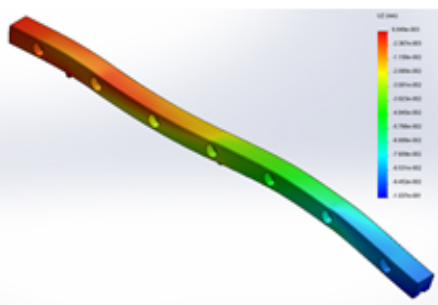
Деформации заготовки, в свою очередь, обусловлены наличием изогнутости и начальных отклонений от плоскостности поверхности заготовки, соприкасающейся с поверхностью стола, после термообработки и предшествующей механической обработки.

Технологические способы устранения возникающих погрешностей формы значительно увеличивают время обработки и стоимость операции.

Ограничение величины упругой деформации при закреплении и шлифовании заготовки направляющей малой жёсткости позволит уменьшить время и стоимость операции при гарантированном обеспечении геометрической точности детали.

### 1. Определение деформации заготовки

Разработанная математическая модель максимальных упругих деформаций заготовок основана на теории изгиба балок, поэтому геометрические параметры заготовок должны удовлетворять следующим ограничениям:  $\alpha = l_3/h > 10$  (отношение длины заготовки  $l_3$  к наибольшему размеру поперечного сечения  $h$ ).



В результате исследований установлено, что определяющим фактором возникновения начальных отклонений от плоскостности боковых граней призматических заготовок, является деформация заготовки в процессе её термообработки и предшествующих шлифованию операций механической обработки. Вследствие чего заготовка получает изогнутость поверхности с выраженными регулярными волнами макроотклонений. (рисунок 1).

Рисунок 1 – 3D модель исследуемой заготовки направляющей с увеличением в 100 раз макроотклонений от плоскостности

Величина максимальной деформации при закреплении заготовки магнитным полем стола и шлифовании будет равна:

$$w_{\max} = w_q + w_p + w_k, \quad (1)$$

где  $w_q$ ,  $w_p$  – максимальная упругая деформации заготовки при изгибе, соответственно под действием массы заготовки и усилия притяжения магнитного поля стола станка, радиальной составляющей силы резания;  $w_k$  – суммарная контактная деформация:  $w_k = w_{sq} + w_{kp}$ , где  $w_{kp}$  – контактная деформация поверхности заготовки с плоскостью стола при действии силы резания;  $w_{sq}$  – контактная деформация торцевой поверхности заготовки с плоскостью стола при действии массы заготовки и усилия притяжения магнитного поля стола станка.

Определённая часть контактной деформации в рабочих условиях может быть и пластической. Величина пластической контактной деформации учитывается в уменьшении зазора между соприкасающимися поверхностями стола и заготовки.

Исследование упругих деформаций, возникающих при закреплении и шлифовании заготовки, производили на направляющей роликового однорядного подшипника ЛРХ 6/350, изготавливаемой на ОАО «ЕПК Самара» (рисунок 2). Направляющую подшипника, изготовленную



из стали 20Х (ГОСТ 4543 – 71), подвергают цементации с получением цементированного слоя глубиной 1,6 – 1,8 мм. До операции плоского шлифования в заготовке сверлятся поперечные и продольные отверстия, обрабатываются продольные пазы (см. рисунок 2).

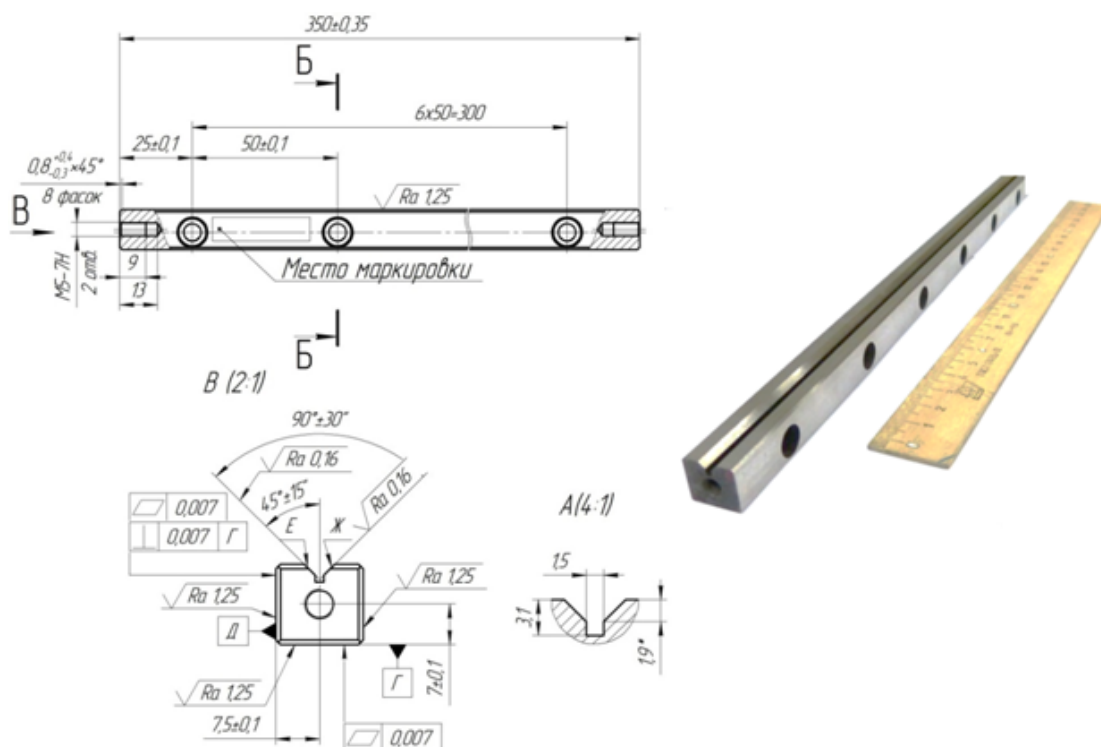


Рисунок 2 - Исследуемая направляющая подшипника ЛРХ 6/350

Для рассматриваемых заготовок  $\alpha = l_3/h = 350/15 = 23,3 > 10$ . Выполнение данного условия позволяет использовать для определения максимальных упругих перемещений при изгибе заготовки теорию изгиба балок.

Измерения отклонений от плоскостности поверхностей боковых граней заготовки производились индикаторной головкой при продольном перемещении стола с заготовкой (рисунок 3). Измерение отклонений производилось на 5 заготовках с шагом 25 мм при движении слева направо и отступом от края заготовки 2 мм для поверхности грани А (рисунок 3, б), которая в дальнейшем используется в качестве базовой. Каждое измерение производилось 3 раза. Сравнение дисперсий по критерию Кохрена показали, что во всех случаях дисперсии отличаются незначимо.

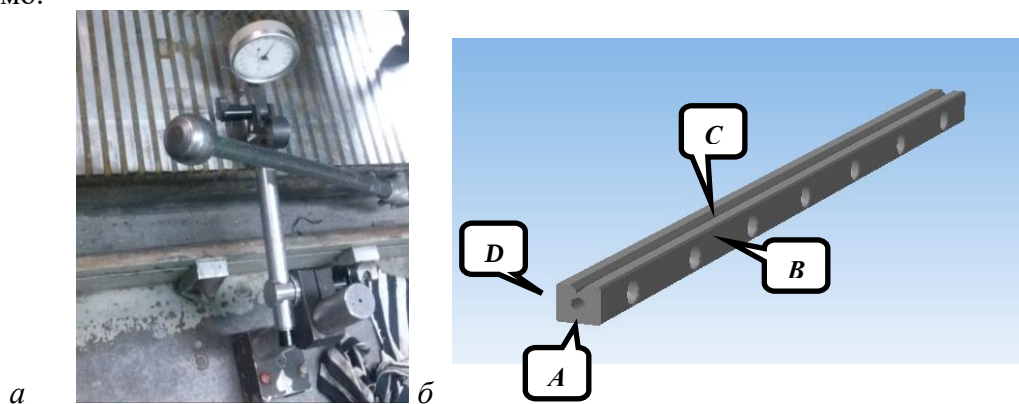


Рисунок 3 – Измерительная головка (а) и исследуемые грани направляющей (б)

На рисунке 4 представлены результаты измерения отклонений от плоскостности грани А усредненной направляющей.

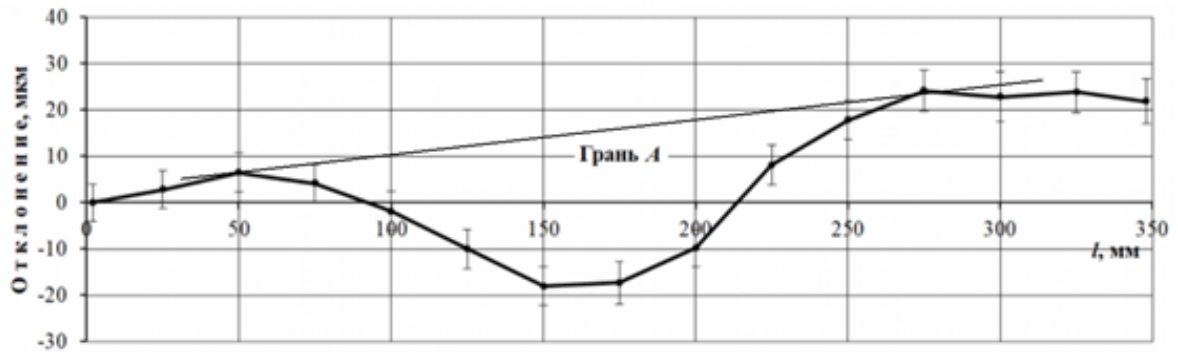


Рисунок 4 - Отклонения от плоскостности боковых граней усредненной заготовки

Макроотклонение поверхности заготовки, соприкасающейся с гладкой поверхностью стола моделируется цилиндрической поверхностью с образующей в виде синусоиды с характерной длиной волны  $l$  (рисунок 5).

Длина  $l$  зависит от конструктивных особенностей заготовки, её изгибной жёсткости, предшествующей шлифованию механической и термической обработки. Удвоенная амплитуда синусоиды  $y_a$  (см. рисунок 5) принимается равной максимальной высоте волн макроотклонений.

При закреплении заготовки магнитным полем стола на заготовку действует равномерно распределённая нагрузка интенсивностью:  $q = q_c + q_m$ , где  $q_c$  – интенсивность равномерно распределённой нагрузки от действия усилия притяжения магнитного поля стола станка;  $q_m$  – интенсивность равномерно распределённой нагрузки от действия собственного веса заготовки (см. рисунок 5).

Максимальный прогиб от действия усилия притяжения магнитного поля стола станка и собственного веса заготовки  $w_{q1}$  и координата максимального прогиба  $x_{max1}$  будут равны:

$$w_{q1} = 13 \times 10^{-3} \frac{ql^4}{EI_z}; \quad x_{max1} = 0,5l. \quad (2)$$

Расстояние (зазор) между точками касания соприкасающихся поверхностей заготовки и стола  $y_1 = y_a$  (см. рисунок 5).

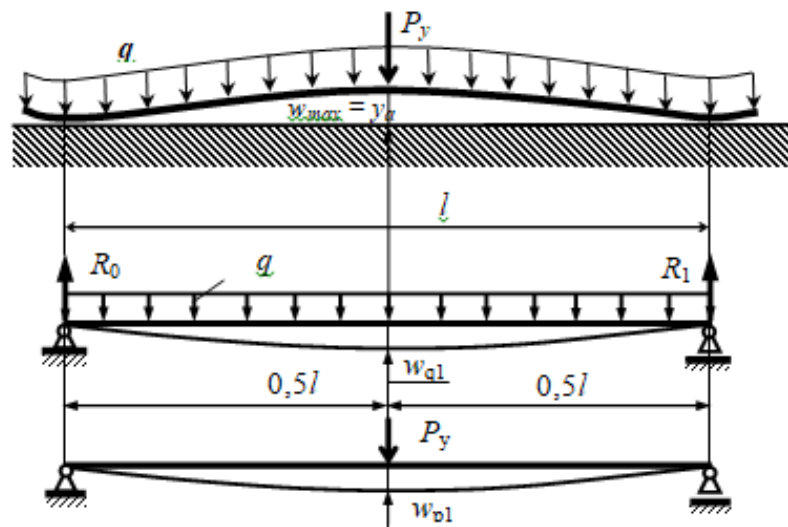


Рисунок 5 - Расчетная схема заготовки для определения максимального прогиба  $w_{max}$  (в данном случае начальное отклонение от плоскостности  $y$ )

Для повышения изгибной жёсткости заготовок при закреплении магнитным полем стола станка рекомендуется использовать компенсаторы. Компенсатор изготавливается из круглой

немагнитной стали с двумя рабочими гранями – опорной - плоской, для взаимодействия с поверхностью магнитного стола, и радиусной, для взаимодействия с торцом заготовки. Уклон радиусной поверхности к опорной составляет 1:200. Компенсаторы вводятся попарно с обеих сторон заготовки (рисунок 6).

При установке компенсаторов заготовка моделируется неразрезной балкой. Пары компенсаторов устанавливаются с разбиением характерной длины волны  $l$  на равные части  $l/2$ ,  $l/3$ .

При установке одной пары компенсаторов получаем расчётную схему двух пролётной балки (рисунок 7).

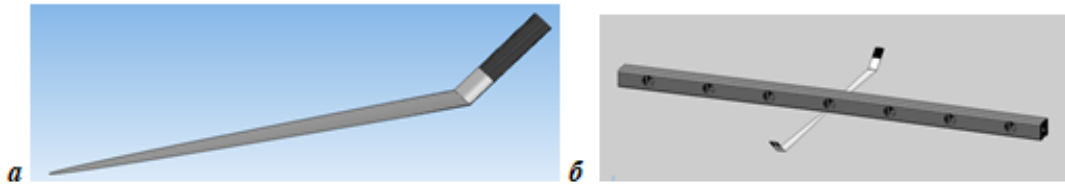


Рисунок 6 – Компенсатор (а) и установка компенсаторов (б)

При  $n > 1$  балка будет статически неопределимой и максимальные прогибы  $w_{q2}$  и координаты максимальных прогибов  $x_{\max n}$  определяем методом начальных параметров, интегрируя дифференциальное уравнение упругой линии балки в первом пролёте (см. рисунок 7):

Максимальный прогиб при  $x = x_{\max 2} = 0,211l$ :

$$w_{q2} = 0,339 \times 10^{-3} \frac{ql^4}{EI_z}. \quad (3)$$

Начальное отклонение от плоскостности поверхности боковой грани заготовки перед операцией шлифования определяется величиной удвоенной амплитуды синусоиды  $y_a$  (см. рисунок 5). Касание поверхностей заготовки и стола станка при изгибе заготовки под действием усилия притяжения магнитного поля стола и собственного веса происходит в сечениях максимального прогиба с координатой  $x_{\max n}$ . Расстояние между точками касания поверхностей  $y_n$  (см. рисунки 5, 7) определяется уравнением:

$$y_n = 0,5y_a \left[ 1 - \cos \left( 2\pi \cdot \frac{x_{\max n}}{l} \right) \right] - w_{\text{кн}}. \quad (4)$$

$y_1 = y_a$  при  $x_{\max 1} = 0,5l$ ;  $y_2 = 0,379y_a - w_{\text{кн}}$  при  $x_{\max 2} = 0,211l$ .

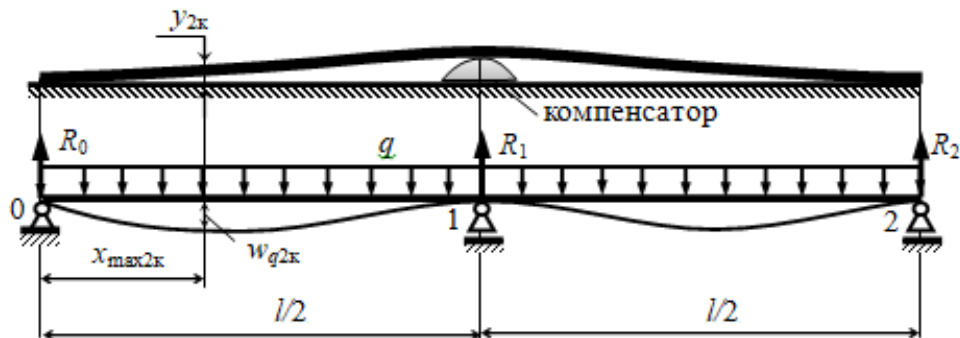


Рисунок 7 – Расчётная схема заготовки при закреплении магнитным полем стола станка с одной парой компенсаторов

При использовании двух пар компенсаторов закрытие зазора между поверхностями заготовки и стола станка (касание поверхностей при деформации изгиба) будет происходить последовательно от первого пролёта к среднему (см. рисунки 8). Если величина максимального прогиба в первом пролёте балки будет равна зазору между поверхностями (точками касания) заго-

товки и стола  $w_{q3k} = y_{3k}$ , а величина зазора будет меньше или равна допускаемому отклонению от плоскостности  $[\Delta]$ :  $y_{3k} \leq [\Delta]$ , то дальнейшие расчёты величины максимального прогиба необходимо продолжать в среднем пролёте балки.

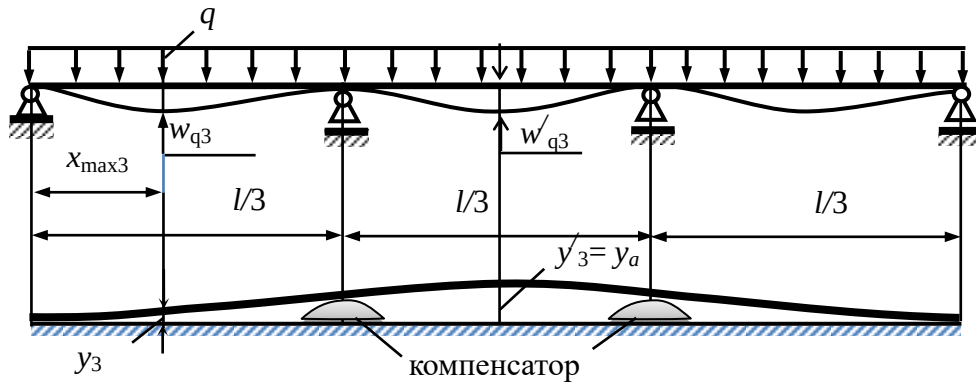


Рисунок 8 – Расчётная схема заготовки при закреплении магнитным полем стола станка с двумя парами компенсаторов

Математическая модель максимальных прогибов от действия усилия притяжения магнитного поля стола станка и собственного веса заготовки имеет вид:

- в первом пролёте:  $w_{qn} = a_{qn} q l^4 \times 10^{-3} / (EI_z)$ ;
- в среднем пролёте:  $w_{qn} = a'_{qn} q l^4 \times 10^{-3} / (EI_z)$ .

Величины коэффициентов  $a_n$ , координаты максимальных прогибов  $x_{\max n}$ , расстояний между точками касания поверхностей заготовки и стола станка  $y_n$  в зависимости от числа пролётов  $n$  приведены в таблице 1.

При шлифовании величина упругого перемещения (отжатия) заготовки от действия радиальной составляющей силы резания  $P_y$  будет зависеть от соотношения жесткостей технологической системы (шпиндель станка – узлы крепления шпинделя станка) -  $j_c$  и заготовки -  $j_{3n}$ :  $c_n = j_c / (j_{3n} + j_c)$ . При этом жёсткость заготовки  $j_{3n}$  будет зависеть от числа пролётов моделируемой неразрезной балки  $n$ . Жёсткость станков плоскошлифовальных с крестовым столом и горизонтальным шпинделем определяется в соответствии с ГОСТ 273-90, плоскошлифовальных станков с прямоугольным столом - ГОСТ 13135-90.

Таблица 1. Расчётные параметры математических моделей максимальных прогибов при закреплении заготовки магнитным полем стола

| Число пролётов, $n$ | $a_{qn}$         | $x_{\max n} \times l$ | $y_n \times y_a$ | $a'_{qn}$         | $x'_{\max n} \times l$ | $y'_n \times y_a$ |
|---------------------|------------------|-----------------------|------------------|-------------------|------------------------|-------------------|
|                     | в первом пролёте |                       |                  | в среднем пролёте |                        |                   |
| $n = 1$             | 13,00            | 0,500                 | 1,000            | -                 | -                      | -                 |
| $n = 2$             | 0,339            | 0,211                 | 0,379            | -                 | -                      | -                 |
| $n = 3$             | 0,0863           | 0,150                 | 0,206            | 0,0064            | 0,500                  | 1,000             |

Заготовка моделируется неразрезной балкой, лежащей на опорах.

При  $n = 1$  имеем однопролётную балку с двумя опорами (см. рисунок 5). Максимальный прогиб при действии радиальной составляющей силы резания  $w_{p1}$  и координата максимального прогиба  $x_{\max 1}$  будут равны :

$$w_{p1} = 20,8 \times 10^{-3} \frac{P_y l^3}{EI_z} \times c_1; \quad x_{\max 1} = 0,5l. \quad (5)$$

Расстояние (зазор) между точками касания соприкасающихся поверхностей заготовки и стола  $y_1 = y_a$  (см. рисунок 5).

При числе пролетов более одного ( $n > 1$ ) балка будет статически неопределимой и максимальные прогибы  $w_{pn}$  и координаты максимальных прогибов  $x_{\max n}$  определяем методом начальных параметров, интегрируя дифференциальное уравнение упругой линии балки в первом пролёте (рисунок 9). Расчетная схема заготовки при шлифовании с закреплении заготов-



ки магнитным полем стола станка с одним компенсатором показана на рисунке 9.

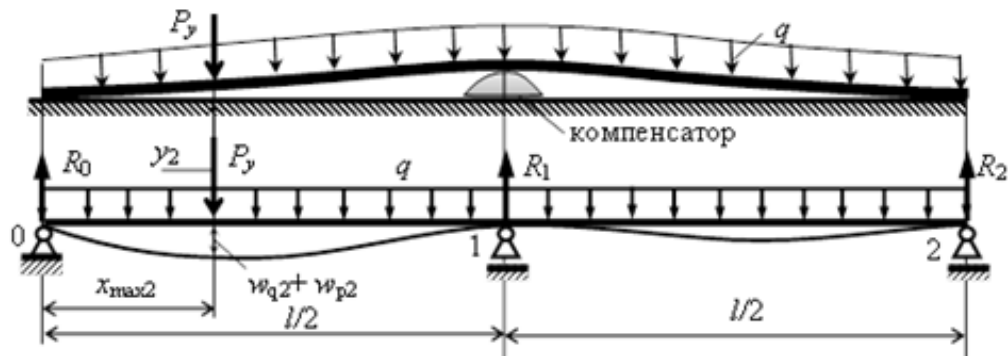


Рисунок 9 – Расчётная схема заготовки при шлифовании с закреплением заготовки магнитным полем стола с одним компенсатором

Для получения дифференциального уравнения упругой линии балки необходимо раскрыть статическую неопределенность и определить реакцию нулевой опоры  $R_0 = X_1$ . Положение силы  $P_y$ , соответствующее максимальному прогибу  $b$ , будем определять из условия экстремума прогиба в первом пролёте.

Максимальный прогиб от действия радиальной составляющей силы резания представлен в виде:

$$w_{pn} = b_n c_n P_y \beta \times 10^{-3} / (EI_2).$$

Величины коэффициентов  $b_n$ , координаты  $x_{maxn}$  и расстояний между точками касания поверхностей заготовки и стола  $y_n$  в зависимости от числа пролётов  $n$  приведены в таблице 2.

При использовании двух пар компенсаторов закрытие зазора между поверхностями заготовки и стола станка (касание поверхностей при деформации изгиба) будет происходить последовательно от первого пролёта к среднему. Если величина максимального прогиба в первом пролёте балки будет равна зазору между поверхностями (точками касания) заготовки и стола  $w_{q3} + w_{p3} = y_3$ , а величина зазора будет меньше или равна допускаемому отклонению от плоскостности  $[\Delta]$ :  $y_3 \leq [\Delta]$ , то дальнейшие расчёты величины максимального прогиба необходимо продолжать в среднем пролёте балки.

При установке двух компенсаторов получим расчётную схему трёх пролётной балки с нагружением силой в середине второго пролёта (рисунок 10).

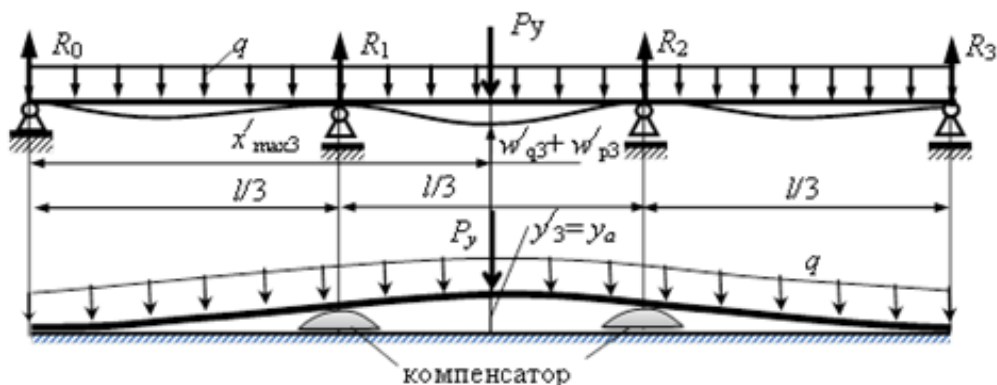


Рисунок 10 – Расчётная схема заготовки при закреплении магнитным полем стола станка с двумя компенсаторами при нагружении силой резания в среднем пролёте

Максимальный прогиб будет в среднем пролёте при  $x'_{max3} = 0,5l$ . Расстояние между точками касания поверхностей заготовки и стола  $y'_3$  определяется по уравнению:  $y'_3 = y_a - w_{k3}$  (см. рисунок 10).

При шлифовании на заготовку совместно действуют усилие резания, усилия притяжения магнитного поля станка, собственного веса заготовки.



Математическая модель максимального прогиба при шлифовании с закреплением заготовки магнитным полем стола представлена суммой деформаций в виде:

- в первом пролёте  $w_{qn} + w_{pn} = (a_n q l^4 + b_n c_n P_y l^3) \times 10^{-3} / (EI_z)$ .
- в среднем пролёте  $w'_{qn} + w'_{pn} = (a'_n q l^4 + b'_n c_n P_y l^3) \times 10^{-3} / (EI_z)$ ,

где  $w_{qn}$ ,  $w'_{qn}$  – прогибы от действия усилия притяжения магнитного поля стола станка и собственного веса заготовки в сечении, в котором возникает максимальный прогиб от действия радиальной составляющей усилия резания.

Величины расчётных параметров математической модели максимальных прогибов при шлифовании заготовки с закреплением магнитным полем стола:

коэффициентов  $a_n$ ,  $a'_n$ ,  $b_n$ ,  $b'_n$ ; координат максимального прогиба  $x_{\max n}$  и расстояний между точками касания поверхностей заготовки и стола  $y_n$  в сечении максимального прогиба в зависимости от числа пролётов  $n$  приведены в таблице 2.

**Таблица 2. Расчётные параметры математических моделей максимальных прогибов при шлифовании заготовки с закреплением магнитным полем стола**

| Число пролётов, $n$ | $a_n$                   | $b_n$  | $x_{\max n} \times l$ | $y_n \times y_a$ | $b'_n$                   | $a'_n$  | $x'_{\max n} \times l$ | $y'_n \times y_a$ |
|---------------------|-------------------------|--------|-----------------------|------------------|--------------------------|---------|------------------------|-------------------|
|                     | <b>в первом пролёте</b> |        |                       |                  | <b>в среднем пролёте</b> |         |                        |                   |
| $n = 1$             | 13,000                  | 20,800 | 0,500                 | 1,000            | -                        | -       | -                      | -                 |
| $n = 2$             | 0,334                   | 1,890  | 0,235                 | 0,451            | -                        | -       | -                      | -                 |
| $n = 3$             | 0,084                   | 0,630  | 0,160                 | 0,233            | 0,428                    | 0,00643 | 0,500                  | 1,000             |

Контактную деформацию гладкой поверхности стола и шероховатой волнистой торцевой поверхности заготовки кольца, имеющей макроотклонения в виде изогнутости, определяли методом Н. Б. Дёмкина.

Реальная боковая поверхность заготовки направляющей имеет продольную и поперечную волнистость и шероховатость. Шероховатость поверхности определяется с помощью профилографа-профилометра «СЕЙТРОНИК ПШ8-4 С.С.». Волнистость поверхности образца измеряется с помощью профилографа *FORM TALYSURF INTRA*.

Для исследуемой заготовки направляющей параметры волнистости и шероховатости боковой поверхности определены экспериментально перед операцией шлифования и приведены в таблицах 3 и 4. В таблицах 3, 4 определены расчётные (приведённые) радиусы кривизны выступов волнистости и шероховатости, соответственно:  $r_w = (r_{wп} \cdot r_{wпр})^{0,5}$ ,  $r_{ш} = (r_{п} \cdot r_{пр})^{0,5}$ . Поверхность стола станка в рабочей части имеет шероховатость с  $Ra = 0,16$  мкм этот параметр на порядок меньше, чем у поверхности заготовки ( $Ra = 1,25$  мкм), что позволяет при определении контактных деформаций считать стол гладким.

**Таблица 3 – Параметры волнистости боковой поверхности заготовки направляющей**

| Продольная                                 |                                  |                                                  | Поперечная                                |                                 |                                                 | Расчётный (приведённый) радиус кривизны $r_w$ , мм |
|--------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| наибольшая высота волн $W_{\max пр}$ , мкм | средний шаг волн $S_{w пр}$ , мм | средний радиус кривизны выступов $r_{w пр}$ , мм | наибольшая высота волн $W_{\max п}$ , мкм | средний шаг волн $S_{w п}$ , мм | средний радиус кривизны выступов $r_{w п}$ , мм |                                                    |
| 4,1                                        | 3                                | 50                                               | 4,2                                       | 1                               | 20                                              | 31,6                                               |

**Таблица 4 – Параметры шероховатости боковой поверхности заготовки направляющей**

| Наибольшая высота профиля $R_{max}$ , мкм | Среднеарифметическое отклонение профиля $Ra$ , мкм | Высота наибольшего выступа профиля $R_p$ , мкм | Относительная опорная длина профиля по средней линии $t_m$ , % | Средний радиус кривизны выступов (поперечных) $r_{п}$ , мкм | Средний радиус кривизны выступов (продольных) $r_{пр}$ , мкм | Расчётный (приведённый) радиус кривизны выступа $r_{ш}$ , мкм |
|-------------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 10                                        | 1,6                                                | 5,33                                           | 0,51                                                           | 8,0                                                         | 280                                                          | 47,3                                                          |

Контактная деформация (сближение) складывается из трёх составляющих:  $w_{\text{кп}} = w_{\text{кп1}} + w_{\text{кп2}} + w_{\text{кп3}}$ , где  $w_{\text{кп1}}$  - контактная деформация (сближение) за счёт деформации микронеровностей,  $w_{\text{кп2}}$  - контактная деформация (сближение) за счёт деформации волн,  $w_{\text{кп3}}$  - контактная деформация (сближение) за счёт деформации макроотклонений.

Для приближенной оценки характера контактной деформации используем критерий [Чичинадзе, А. В. Трение, износ и смазка (трилогия и триботехника) / А. В. Чичинадзе, Э. М. Берлинер, Э. Д. Браун и др.; под общ. ред. А. В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.]:

$$Q_p = \frac{E}{HB} \cdot \sqrt{\frac{Rp}{r_{\text{ш}}}} = \frac{200000}{2290} \cdot \sqrt{\frac{5,33}{47,3}} = 29,3.$$

$Q_p > 3$ , значит контакт пластический.

При расчёте учитываем механические свойства более мягкого тела, а шероховатость более твёрдого из контактирующих тел. Твёрдость материала стола  $HB = 2290$  МПа; твёрдость поверхности заготовки  $HB = 6200$  МПа. Модули нормальной упругости материала стола  $E = 200\,000$  МПа; материала заготовки -  $E = 216\,000$  МПа.

При пластической деформации контактную деформацию (сближение) за счёт деформации микронеровностей  $w_{\text{кп1}}$  определяем по формуле [Качество поверхности и контакт деталей машин / Н. Б. Дёмкин, Э. В. Рыжов. М.: Машиностроение, 1981. 244 с.]:

$$w_{\text{кп1}} = Rp \cdot \left( \frac{p_c}{p_r t_m} \right)^{1/\nu} = 5,33 \cdot \left( \frac{p_c}{2290 \cdot 0,51} \right)^{1/2,4},$$

где, принимаем среднее фактическое давление равным твёрдости материала стола  $p_r = HB = 2290$  МПа, параметр опорной кривой профиля шероховатости  $\nu$  равен:

$$\nu = 2 t_m \left( \frac{Rp}{Ra} \right) - 1 = 2 \cdot 0,51 \left( \frac{5,33}{1,6} \right) - 1 = 2,4.$$

Контурное давление  $p_c$  в контакте определяем по модели контакта сферической шероховатой волны с плоской поверхностью:

$$p_c = \frac{1}{1,8 K_w} \left( \frac{W_{\text{max}}}{2 r_w} \cdot \left( \frac{E}{1 - \mu^2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2 + \delta_w}} \cdot p_a^{\frac{\delta_w}{2 + \delta_w}}.$$

В этих формулах приняты значения коэффициентов  $K_w = 1,65$ ;  $\delta_w = 3,7$  при  $E/[HB(1 - \mu^2)] = 200000/[2290(1 - 0,3^2)] = 96$ ,  $R_{\text{max}}/W_{\text{max}} = 10/4,2 = 2,38$ .

Номинальное давление  $p_a$  определяем для наибольшей номинальной нагрузки в контакте.

Начальное макроотклонение от плоскостности моделируется цилиндрической поверхностью с направляющей в виде волны синусоиды характерной длиной  $l = 0,7 l_z$ , где  $l_z$  - длина заготовки (см. рисунок 4). Радиус выступа макроотклонений определяется, как для волнистости, по формуле:

$$R = \frac{5 S_w^2}{32 W_p} = \frac{5 \cdot 123^2}{32 \cdot 0,015} = 157,6 \cdot 10^3 \text{ мм} = 157,6 \text{ м},$$

где  $S_w = 123$  мм – среднее расстояние между точками пересечения профилограммы со средней линией;  $W_p = 15$  мкм – расстояние от вершины наиболее высокой волны макроотклонений до средней линии профилограммы.

Считаем, что первоначальный номинальный контакт заготовки с поверхностью стола осуществляется по двум наиболее выступающим вершинам макроотклонений, радиусы цилиндрических поверхностей которых определены. Номинальный контакт поверхности заготовки с плоскостью стола будет линейным.

Нагрузка в контакте с учётом действия магнитного поля  $P_q$ , массы и радиальной составляющей силы резания при двух опорном контакте будет равна:  $P_2 = (P_{qc} + mg + P_y)/2$ .

Величины  $P_{qc}$  и  $P_y$  определяем в соответствии с параметрами оптимальных режимов шлифования, приведенных ниже.

При использовании далее компенсаторов величина нагрузки будет уменьшаться в соответствии с числом дополнительных опор.

Номинальная площадь контакта цилиндрической поверхности с плоскостью стола:  $A_a = bc$ , где  $b$  – ширина торца заготовки,  $c$  – ширина площадки контакта, определяемая по формуле:  $c = 2\sqrt{R \cdot 1,16 \cdot 10^{-5} q}$ , где  $q = P_2/b$  – распределённая по длине линии контакта нагрузка. Номинальное давление будет равно:  $p_a = P_2/A_a$ .

Контактная деформация (сближение) за счет деформации волн  $w_{k2}$  определяем для контакта волнистой поверхности с плоской по формуле [Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2-х кн./Под ред. И.В. Крагельского, В. В. Алинина. – М.: Машиностроение, 1978 – Кн. 1. 1978. 400 с.]:

$$w_{kn2} = 3,83 \cdot W_{\max}^{0,8} \cdot r_w^{0,2} \cdot [p_a \cdot (1-\mu^2)/E]^{0,4}.$$

Контактная деформация (сближение) за счет деформации макроотклонений  $w_{k3}$  для контактирующей стальной цилиндрической поверхности заготовки радиусом  $R$  со стальной плоскостью стола станка определяется по формуле [Механика контактного взаимодействия твердых тел при начальном касании по линии М.М. Матлин, А.В. Бабаков А.В.// Mechanika. – Kaunas University of Technology, 2000. № 3. С. 5.]:  $w_{kn3} = 1,16 \cdot 10^{-5} \cdot q$ , где  $q = P_2/b$  – распределённая по длине линии контакта нагрузка в Н/мм, а  $w_{kn3}$  вычисляется в мм. Результаты расчётов для двух граней заготовки при нагрузках оптимального режима шлифования (см. ниже) приведены в таблице 5.

**Таблица 5 - Параметры заготовки для определения контактных деформаций и суммарная контактная деформация (сближение)**

| Параметры                                                                                                                                                                                                                                                                   | Заготовка направляющей                                                |                                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                             | узкая грань                                                           | широкая грань                                                        |
| Радиус выступа макроотклонений, $R$ , м                                                                                                                                                                                                                                     | 157,6                                                                 | 181,8                                                                |
| Ширина торца заготовки $b$ , мм                                                                                                                                                                                                                                             | 13,9                                                                  | 15,0                                                                 |
| Суммарная нагрузка на заготовку:<br>при закреплении магнитным полем стола $P = P_q + mg$ , Н<br>при шлифовании заготовки с закреплением магнитным полем стола $P = P_q + mg + P_y$ , Н<br>при шлифовании заготовки без закрепления магнитным полем стола $P = mg + P_y$ , Н | 729,8 + 4,9 = 734,7<br>729,8 + 4,9 + 247 = 981,7<br>4,9 + 247 = 251,9 | 787,5 + 4,9 = 792,4<br>787,5 + 4,9 + 267 = 1059<br>4,9 + 267 = 271,9 |
| Суммарная контактная деформация (сближение) при закреплении заготовки от действия магнитного поля стола и собственного веса за счет микронеровностей $w_{kq1}$ , деформации волн $w_{kq2}$ и деформации макроотклонений $w_{kq3}$                                           |                                                                       |                                                                      |
| при однопролётном двух опорном контакте:<br>$w_{kq1} = w_{kq11} + w_{kq21} + w_{kq31}$ , МКМ                                                                                                                                                                                | 0,77 + 0,90 + 0,31 = 1,98                                             | 0,75 + 0,88 + 0,31 = 1,94                                            |
| при двух пролётах и трёх опорном контакте:<br>$w_{kq2} = w_{kq12} + w_{kq22} + w_{kq32}$ , МКМ                                                                                                                                                                              | 0,73 + 0,83 + 0,20 = 1,76                                             | 0,71 + 0,81 + 0,20 = 1,72                                            |
| при трёх пролётах и четырёх опорном контакте:<br>$w_{kq3} = w_{kq13} + w_{kq23} + w_{kq33}$ , МКМ                                                                                                                                                                           | 0,70 + 0,79 + 0,15 = 1,64                                             | 0,69 + 0,77 + 0,15 = 1,61                                            |
| Суммарная контактная деформация (сближение) при шлифовании заготовки от действия магнитного поля стола, собственного веса и усилия резания за счет микронеровностей $w_{k1}$ , деформации волн $w_{k2}$ и деформации макроотклонений $w_{k3}$                               |                                                                       |                                                                      |
| при двух опорном контакте:<br>$w_{k1} = w_{k11} + w_{k21} + w_{k31}$ , МКМ                                                                                                                                                                                                  | 0,80 + 0,96 + 0,41 = 2,16                                             | 0,78 + 0,93 + 0,41 = 2,12                                            |
| при трёх опорном контакте:<br>$w_{k2} = w_{k12} + w_{k22} + w_{k32}$ , МКМ                                                                                                                                                                                                  | 0,76 + 0,88 + 0,27 = 1,91                                             | 0,74 + 0,86 + 0,27 = 1,87                                            |
| при четырёх опорном контакте:<br>$w_{k3} = w_{k13} + w_{k23} + w_{k33}$ , МКМ                                                                                                                                                                                               | 0,73 + 0,83 + 0,21 = 1,77                                             | 0,71 + 0,81 + 0,21 = 1,73                                            |

продолжение таблицы 5

| Параметры                                                                                          | Заготовка направляющей    |                          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|--------------------------|
|                                                                                                    | узкая грань               | широкая грань            |
| Радиус выступа макроотклонений, $R, \text{м}$                                                      | 157,6                     | 181,8                    |
| Ширина торца заготовки $b, \text{мм}$                                                              | 13,9                      | 15,0                     |
| Суммарная нагрузка на заготовку:<br>при закреплении магнитным полем стола $P = P_q + mg, \text{Н}$ | 729,8 + 4,9 = 734,7       | 787,5 + 4,9 = 792,4      |
| при шлифовании заготовки с закреплением магнитным полем стола<br>$P = P_q + mg + P_y, \text{Н}$    | 729,8 + 4,9 + 247 = 981,7 | 787,5 + 4,9 + 267 = 1059 |
| при шлифовании заготовки без закреплении магнитным полем стола<br>$P = mg + P_y, \text{Н}$         | 4,9 + 247 = 251,9         | 4,9 + 267 = 271,9        |

Интенсивность равномерно распределённой нагрузки от усилия притяжения магнитного поля стола  $q_c = [p_1] \cdot b$ . При шлифовании узкой грани -  $q_c = 2,1 \text{ Н/мм}$ , результирующая сила  $P_c = 729,8 \text{ Н}$ . При шлифовании широкой грани -  $q_c = 2,25 \text{ Н/мм}$ , результирующая сила  $P_c = 787,5 \text{ Н}$ .

Интенсивность равномерно распределённой нагрузки от собственного веса  $q_m = 0,5 \cdot 9,81 / 350 = 0,014 \text{ Н/мм}$ . Радиальная составляющая усилия резания равна:  $P_y = 17,8 \cdot b$ . При шлифовании широкой грани -  $P_y = 267 \text{ Н}$ . При шлифовании узкой грани -  $P_y = 247 \text{ Н}$ .

Доля пластической деформации  $w_{kl}$  (контактная деформация (сближение) за счёт деформации микронеровностей) от суммарной контактной деформации  $w_k$  для исследуемых заготовок составляет 37...46 %.

## 2. Методика выбора оптимальных режимов плоского шлифования боковых граней призматических направляющих линейных подшипников малой жёсткости с управлением их упругим деформированием при закреплении и обработке. Определение условий, обеспечивающих возможность устранения отклонений от плоскостности поверхностей направляющих линейных подшипников малой жёсткости шлифованием

Предлагаемый алгоритм выбора оптимальных условий плоского шлифования боковых граней призматических заготовок малой жёсткости предполагает выделение двух этапов оптимизации процесса. На первом этапе (рисунок 11), заготовку рассматриваем, как абсолютно жёсткую и оптимизацию осуществляем из условия выполнения требований к параметрам качества обработанной поверхности: шероховатость, волнистость, отсутствие шлифовочных прижогов, трещин и др., кроме допуска плоскостности.

С использованием математических моделей составляющих силы резания, параметра шероховатости и т.д. определяются области допустимых значений параметров характеристики абразивного инструмента и режимов, обеспечивающих выполнение требований к качеству обработанной поверхности.

Дальнейшая оптимизация параметров в области допустимых значений производится по критерию наибольшей производительности процесса  $Q_{max}(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k)$ .

Эти оптимальные параметры определяют первый режим шлифования (режим 1).

Требуемый допуск плоскостности обеспечивается на втором этапе оптимизации режимов ограничением величины упругой деформации (см. рисунок 11). Варьируемыми параметрами являются сила притяжения магнитного поля стола станка и жёсткость заготовки при изгибе (увеличивается при установке компенсаторов).

По оптимальным параметрам режима 1 определяется оптимальная величина силы резания.

Условия обеспечения требуемого допуска плоскостности обработанной поверхности ограничивают максимальную упругую деформацию от действия магнитного поля, собственного веса заготовки, усилия резания  $w_{max}$  допускаемой величиной максимальной упругой деформации.

ции  $[\Delta]$ :  $w_{max} \leq [\Delta]$ , где  $[\Delta] = \lambda\Delta - \Delta t$ ,  $\lambda$  - коэффициент точности при проектировании, принимаемый равным 0,75;  $\Delta$  - допуск плоскостности поверхности на операции шлифования;  $\Delta t$  - достижимое отклонение от плоскостности обработанной поверхности при шлифовании жёсткой заготовки. Для определения величины максимальных упругих деформаций при закреплении и шлифовании заготовки необходима математическая модель, учитывающая контактные деформации поверхностей заготовки и стола, форму поперечного сечения и жёсткость заготовки при изгибе.

Условия обеспечения требуемого допуска плоскостности обработанной поверхности заготовки при режиме 1 (шлифование заготовки с наибольшей производительностью при оптимальных условиях для жёсткой заготовки):

$$y_a - w_{\kappa 1} \leq [\Delta]; w_{max1} \leq [\Delta], \quad (6)$$

реализуется шлифование на режиме 1 при максимальном удельном усилии притяжения магнитного поля стола  $p_{max}$ ;

$$[p] \geq [p_1], \quad (7)$$

реализуется шлифование на режиме 1 при допустимом удельном усилии притяжения магнитного поля стола  $[p]$ , определяемом из условия  $w_{max1} \leq [\Delta]$ ;

$$0,45y_a - w_{\kappa 2} \leq [\Delta]; w_{max2} \leq [\Delta], \text{ расчет при } [p_1], \quad (8)$$

реализуется шлифование на режиме 1 при минимально допустимом удельном усилии притяжения магнитного поля стола  $[p_1]$  с одной парой компенсаторов;

$$0,23y_a - w_{\kappa 3} \leq [\Delta]; w_{max3} \leq [\Delta]; w_{/max3} \leq [\Delta], \text{ расчет при } [p_1], \quad (9)$$

реализуется шлифование на режиме 1 при минимально допустимом удельном усилии притяжения магнитного поля стола  $[p_1]$  с двумя компенсаторами.

Если условия (9) не выполняются, реализуется режим 2 – шлифование с дополнительными переходами. Параметры процесса шлифования соответствуют режиму 1, но время шлифования возрастает в среднем на 40 %.

Минимально допускаемая удельная сила притяжения из условий отсутствия сдвига заготовки  $[p_1]$  -, определяется по справочным рекомендациям [Станочные приспособления: Справочник в 2-х т./ Под ред. Б. Н. Вардашкина, В. В. Данилевского. М.: Машиностроение, 1984. Т.1. 592 с., с. 495-513]:

$$k \cdot (P_y + mg + Q_c) \geq P_z,$$

где  $k = 0,1$  – коэффициент трения скольжения;  $P_y$  – радиальная составляющая силы резания;  $m$  – масса заготовки;  $g$  – ускорение свободного падения;  $P_z$  – касательная составляющая силы резания;

$Q_c = k_\phi [p_1] \cdot b \cdot l_3 / (K \cdot k_m \cdot k_h)$  – усилие притяжения магнитного поля стола;  $K$  – коэффициент запаса,  $K = 2$ ;  $k_\phi$ ,  $k_m$ ,  $k_h$  – коэффициенты влияния формы заготовки, магнитных свойств материала заготовки и толщины заготовки;  $k_\phi = k_m = k_h = 1$ ;  $l_3$  – длина заготовки;  $b$  – ширина грани заготовки, соприкасающейся со столом.

Получим расчётную формулу для  $[p_1]$ :

$$[p_1] = K k_m k_h (P_z / k - P_y - mg) / (k_\phi \cdot b \cdot l_3). \quad (10)$$

Величина радиальной составляющей силы резания  $P_y$  определена на первом этапе оптимизации процесса.



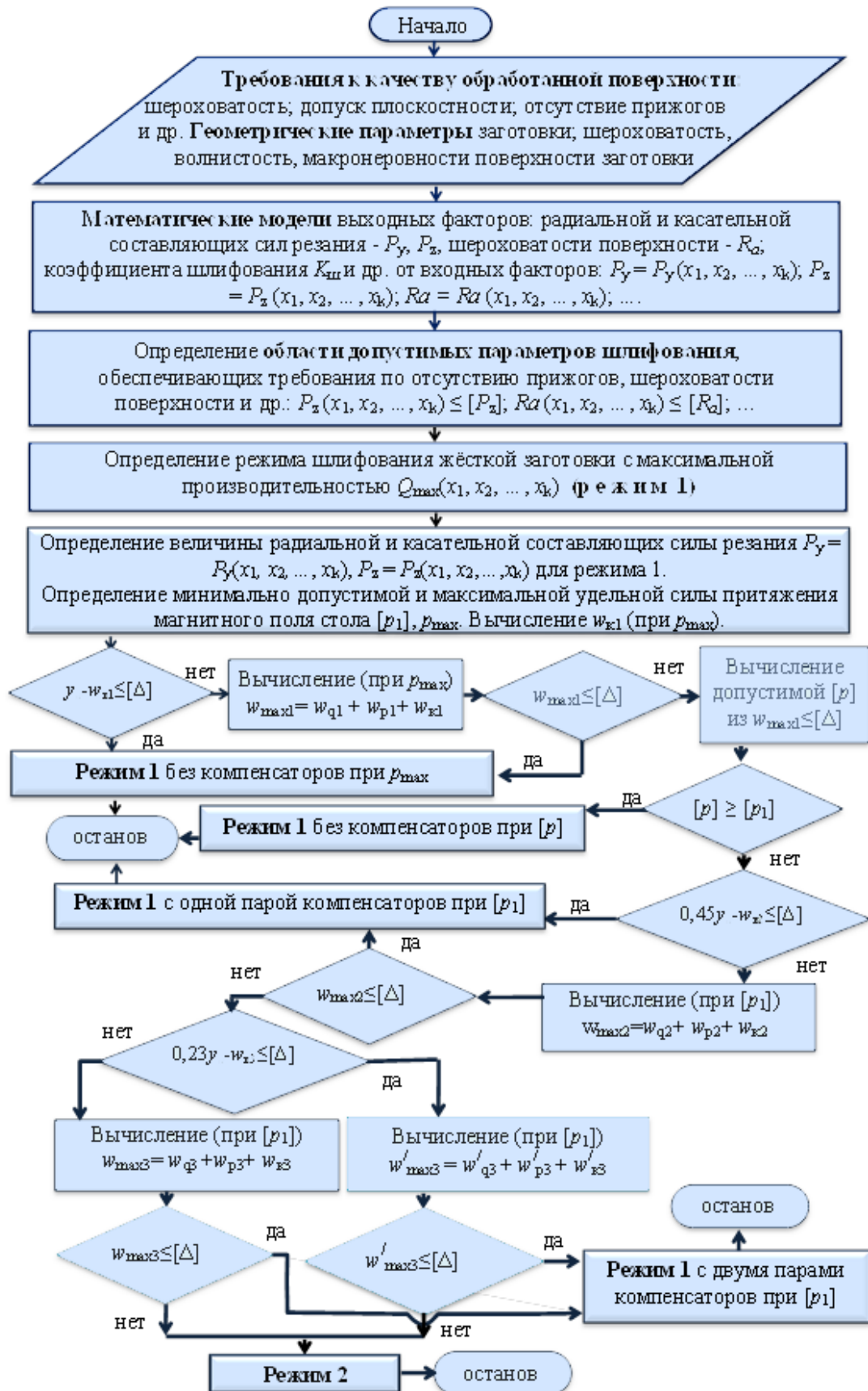


Рисунок 11 – Алгоритм выбора оптимальных условий плоского шлифования, обеспечивающих достижение требуемого качества, в том числе, допуска плоскостности обработанной поверхности

### 3. Пример практической реализации методики.

#### Рекомендации по определению условий, обеспечивающих возможность устранения шлифованием отклонений от плоскостности боковых граней призматических направляющих линейных подшипников малой жёсткости

Приведём пример практической реализации методики для направляющей роликового однорядного подшипника ЛРХ 6/350, изготавливаемой на ОАО «ЕПК Самара» (см. рисунок 2). Направляющую подшипника, изготовленную из стали 20Х (ГОСТ 4543 – 71), подвергают цементации с получением цементированного слоя глубиной 1,6 – 1,8 мм. До операции плоского шлифования в заготовке сверлятся поперечные и продольные отверстия, обрабатывается продольный паз.

Требования к качеству боковой поверхности на операции шлифования:

отсутствие шлифовочных прижогов;

шероховатость поверхности  $R_a = 1,25$  мкм;

допуск плоскостности  $\Delta = 7$  мкм.

Длина направляющей  $l_z = 350$  мм; ширина узкой грани 13,9 мм, широкой – 15 мм; характерная длина волны синусоиды образующей поверхности макроотклонений  $l = 0,7 \times l_z = 245$  мм. Момент инерции поперечного сечения при шлифовании широкой грани -  $I_z = 3357$  мм<sup>4</sup>, при шлифовании узкой грани -  $I_z = 3909$  мм<sup>4</sup>. Масса – 0,5 кг.

Допускаемая максимальная упругая деформация заготовки:

$$[\Delta] = \lambda \Delta - \Delta_r = 0,75 \cdot 7 - 3 = 2,25 \text{ мкм} \approx 2 \text{ мкм}.$$

Максимальное начальное отклонение от плоскостности  $y = 30$  мкм. Модуль продольной упругости для стали 20Х равен:  $E = 2,16 \times 10^5$  МПа.

На первом этапе, при выборе оптимальных условий шлифования (режим 1), заготовку рассматриваем как абсолютно жесткую и оптимизацию режимов осуществляем из условия выполнения требований к шероховатости и отсутствию шлифовочных прижогов (рисунок 13).



Рисунок 13 – Первый этап оптимизации режимов шлифования боковых граней заготовки исследованной направляющей малой жёсткости

С использованием математических моделей радиальной и касательной составляющих силы резания, параметра шероховатости и т. д. ( $P_y = P_y(x_1, x_2, x_3)$ ;  $P_z = P_z(x_1, x_2, x_3)$ ;  $Ra = Ra(x_1, x_2, x_3)$ ; ...) определяются области допустимых значений параметров характеристики абразивного инструмента и режимов  $x_1, x_2, x_3$ , обеспечивающих выполнение требований к качеству поверхности.

Дальнейшая оптимизация параметров в области допустимых значений производится по критерию максимальной производительности процесса  $Q_{\max}(x_1, x_2, x_3)$ .

Эти оптимальные параметры определяют первый режим шлифования (режим 1).

Математические модели приведённых к ширине образца составляющих силы резания ( $p_y, p_z$ ), и шероховатости обработанной поверхности (параметр  $Ra$ ) получены методом полного факторного эксперимента типа  $2^3$  на образцах из стали 20Х (таблица 6).

С учётом производственного опыта были выбраны следующие диапазоны варьирования

**Таблица 6. Математические модели показателей процесса шлифования стали 20Х**

|              |                                                                                                         |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $p_z$ , Н/мм | $7,78 + 1,58 x_1 + 0,88 x_3 + 0,54 x_1 x_3 - 0,64 x_2 x_3 - 0,59 x_1 x_2 + 0,92 x_1 x_2 x_3$            |
| $p_y$ , Н/мм | $22,1 + 1,35 x_1 - 2,29 x_2 + 1,21 x_3 - 3,01 x_2 x_3 - 1,12 x_1 x_2 - 1,09 x_1 x_3 + 1,52 x_1 x_2 x_3$ |
| $Ra$ , мкм   | $1,46 - 0,25 x_1 + 0,30 x_2 + 0,30 x_3 - 0,17 x_1 x_2 - 0,20 x_1 x_3$                                   |

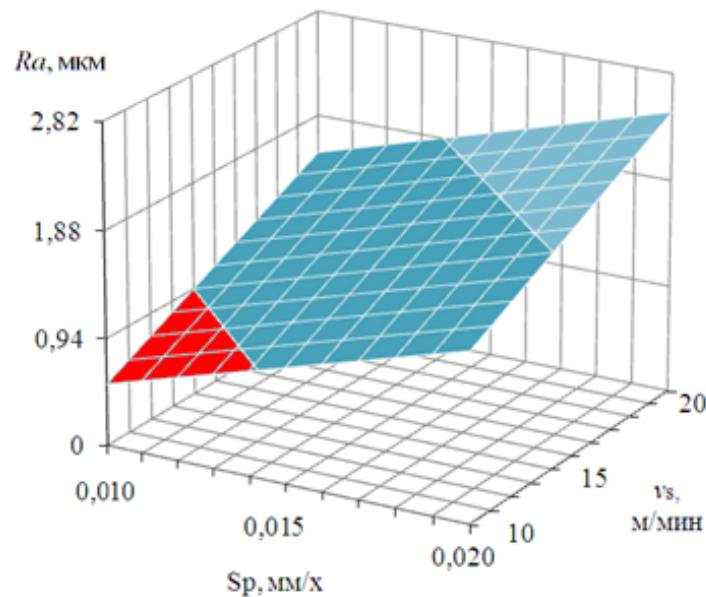
входных факторов:

$c_1(x_1)$  – твёрдость шлифовального круга, определяемая звуковым методом по приведённой скорости распространения акустических волн, м/с (ГОСТ Р 52710) – от 4500 м/с (K) до 4900 м/с (L);

$S_p(x_2)$  – радиальная подача, мм/х – от 0,01 до 0,02 мм/х;

$v_s(x_3)$  – скорость подачи стола, м/мин – от 10 до 20 м/мин.

Параметры  $x_1, x_2, x_3$ , указанные в скобках, являются условными обозначениями кодированных значений факторов (см. таблицу 6). Зернистость шлифовального круга F70 (ГОСТ Р 52381-2005).



**Рисунок 14 - Область допускаемых значений режимных параметров, обеспечивающих требуемый параметр шероховатости поверхности  $Ra$  (выделена красным цветом).**

Зернистость круга – F70, твердость – K: 1 – 4500 м/с

В результате специально проведенных исследований установлено, что шлифовочные прижоги образуются при  $p_z > 6$  Н/мм.

Для заготовок из стали 20Х определена область значений входных факторов, обеспечивающих допустимые значения  $[Ra] \leq 0,94$  мкм и  $[p_z] \leq 4,5$  Н/мм:



$$p_z = 7,78 + 1,58x_1 + 0,88x_3 + 0,54x_1x_3 - 0,64x_2x_3 - 0,59x_1x_2 + 0,92x_1x_2x_3 \leq 4,5 \text{ Н/мм}; \quad (11)$$

$$Ra = 1,46 - 0,250x_1 + 0,300x_2 - 0,170x_1x_2 - 0,200x_1x_3 + 0,300x_3 \leq 0,94 \text{ мкм} \quad (12)$$

Твердость шлифовального круга разбита на 3 равных диапазона с границами: 1 – 4500 м/с; 2 – 4600 м/с; 3 – 4700 м/с; 4 – 4800 м/с. Ограничения по прижогам (11), шероховатости (12) обеспечиваются только для круга нижнего диапазона твердости 1 с  $c_s = 4500$  м/с (рисунки 14, 15).

Область допустимых значений параметров характеристики абразивного инструмента и режимов, обеспечивающих выполнение требований к качеству обработанной поверхности:

$$c_s = 4500 \text{ м/с}; v_s \leq 12 \text{ м/мин}; S_p \leq 0,012 \text{ мм/х}.$$

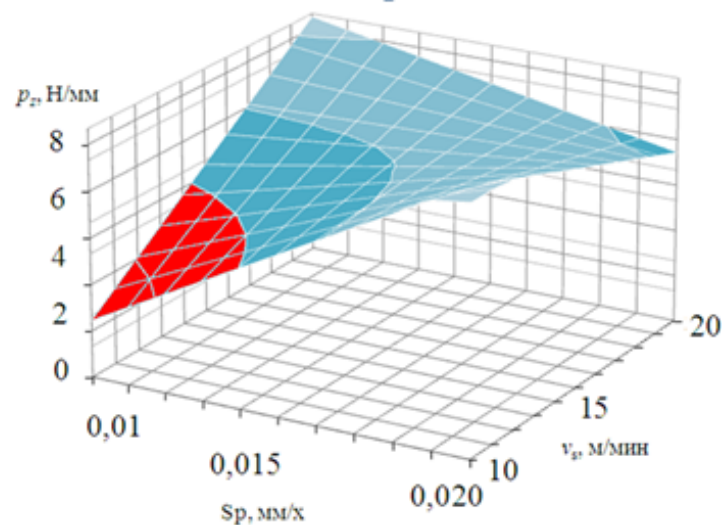
При переводе кодированных значений факторов в натуральные использованы зависимости:

$$x_2 = \frac{t - 0,015}{0,005}, x_3 = \frac{v_s - 15}{5}.$$

Окончательное выражение целевой функции приведенной производительности  $Q$  через варьируемые параметры:

$$Q = v_s \cdot S_p \cdot 10^3, \text{ мм}^2/\text{мин}.$$

Дальнейшая оптимизация параметров в области допустимых значений осуществляется из условия обеспечения максимальной производительности процесса (рисунок 16, точка А).



**Рисунок 15 - Область допускаемых значений режимных параметров, обеспечивающих безприжоговое шлифование поверхности (выделена красным цветом).  
Зернистость круга – F70, твердость – К: 1 – 4500 м/с**

С использованием целевой функции получены оптимальные режимы шлифования, обеспечивающие наибольшую приведенную режущую способность (производительность)

$$Q_{\max} = 121 \text{ мм}^2/\text{мин}; S_{p\text{опт}} = 0,01 \text{ мм/х}; v_{s\text{опт}} = 11 \text{ м/мин}.$$

Приведенные значения составляющих силы резания на данных режимах шлифования:

$$p_y = 17,8 \text{ Н/мм}, p_z = 4,45 \text{ Н/мм},$$

для круга, находящегося в середине диапазона рекомендуемой твердости  $K$  (измеряемой скоростью звука  $c = 4\,500$  м/с) (рисунок 17).

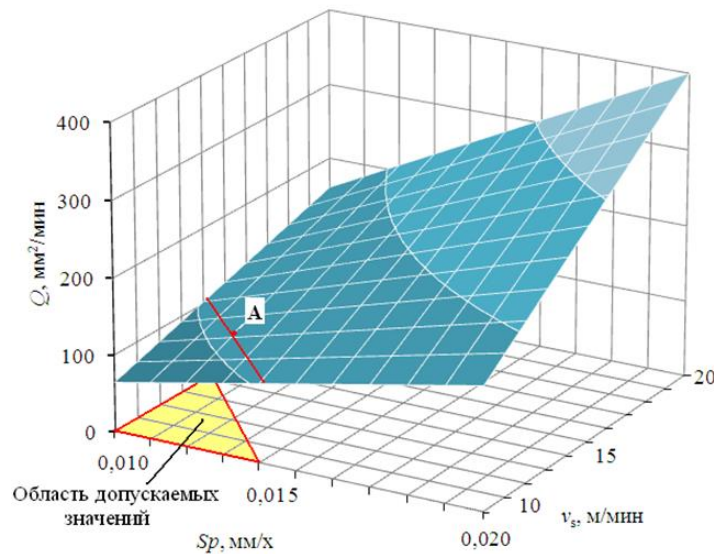


Рисунок 16 - Целевая функция приведенной производительности процесса  $Q(v_s, t)$

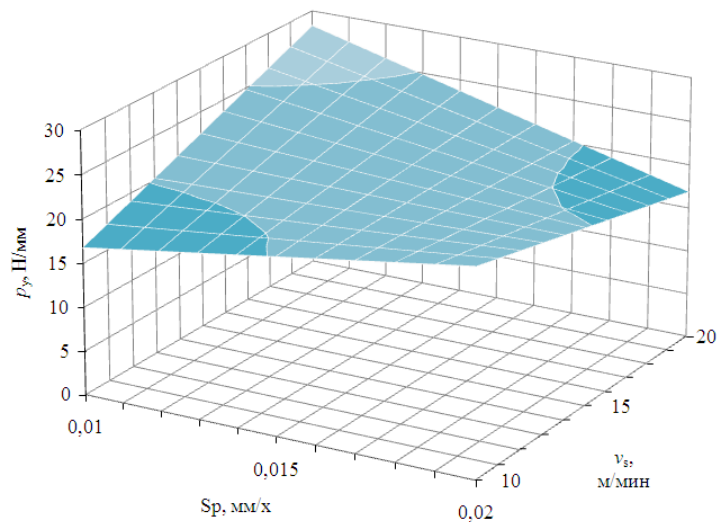


Рисунок 17 - Зависимость радиальной составляющей силы от скорости подачи и радиальной подачи. Зернистость круга – F70, твердость – K:  $c = 4500$  м/с

По оптимальным параметрам режима 1 определяются оптимальные величины радиальной и касательной составляющих силы резания.

Допускаемая максимальная упругая деформация заготовки  $[\Delta]$  принимается равной:  $[\Delta] = \lambda\Delta - \Delta_T = 0,75 \cdot 7 - 3 = 2,25 \approx 2$  мкм. Максимальное отклонение от плоскостности  $y_a = 30$  мкм.

$y_a = 30$  мкм  $> [\Delta] = 2$  мкм - условие не выполняется. Проверяем условие  $w_{max1} \leq [\Delta]$ , для этого определяем величину  $w_{max1}$  при максимальном удельном усилии притяжения магнитного поля стола  $p_{max} = 0,67$  МПа.

Длина направляющей  $l_s = 350$  мм, характерная длина волны синусоиды  $l = 245$  мм, ширина узкой грани 13,9 мм, широкой – 15 мм. Масса – 0,5 кг.

Модуль продольной упругости для стали 20Х равен:  $E = 2,16 \times 10^5$  МПа. Главный центральный момент инерции поперечного сечения при шлифовании широкой грани -  $I_z = 3357$  мм<sup>4</sup>, при шлифовании узкой грани -  $I_z = 3909$  мм<sup>4</sup>.

Интенсивность равномерно распределённой нагрузки от усилия притяжения магнитного

поля стола  $q_c = p_{max} \cdot b$ . При шлифовании узкой грани -  $q_c = 9,4$  Н/мм, результирующая сила  $P_c = 3260$  Н. При шлифовании широкой грани -  $q_c = 10,05$  Н/мм, результирующая сила  $P_c = 3517,7$  Н.

Интенсивность равномерно распределённой нагрузки от собственного веса  $q_m = 0,5 \cdot 9,81 / 350 = 0,014$  Н/мм.

Величины силы резания берем для оптимальных режимов шлифования определённых в главе 5:  $p_{yopt} = 17,8$  Н/мм;  $p_{zopt} = 4,45$  Н/мм.

Радиальная составляющая усилия резания равна:  $P_y = 17,8 \cdot b$ . При шлифовании широкой грани -  $P_y = 267$  Н. При шлифовании узкой грани -  $P_y = 247$  Н.

Вычисляем максимальные прогибы и контактные деформации для однопролётной балки от действия магнитного поля стола, собственного веса заготовки и радиальной составляющей силы резания.

По таблицам 3, 5 (контактная деформация только упругая, первое слагаемое, соответствующее пластической деформации не учитывается).

Жёсткость технологической системы:  $j_c = 247 / 0,040 = 6175$  Н/мм.

Для узкой грани:  $w_{max1} = w_{q1} + w_{p1} \cdot c_1 + w_{k1} = 523 + 97c_1 + 1,36 = 593$  мкм  $> [\Delta] = 2$  мкм.

Для узкой грани жёсткость заготовки  $j_{z1} = 247 / 0,097 = 2546$  Н/мм.  $c_1 = 0,706$ .

Для широкой грани:  $w_{max1} = w_{q1} + w_{p1} \cdot c_1 + w_{k1} = 652 + 113c_1 + 1,3 = 735$  мкм  $> [\Delta] = 2$  мкм.

Для широкой грани жёсткость заготовки  $j_{z1} = 267 / 0,113 = 2363$  Н/мм,  $c_1 = 0,723$ .

Условие  $w_{max1} \leq [\Delta]$  не выполняется, определим удельное усилие притяжения магнитного поля стола  $[p]$  из условия  $w_{max1} \leq [\Delta]$ .

Для узкой грани:  $w_{max1} = w_{q1} + w_{p1} \cdot c_1 + w_{k1} = 523 + 97c_1 + 1,36 = 2$  мкм, отсюда  $w_{q1} = -68$  мкм. Тогда удельное усилие притяжения магнитного поля стола  $[p] = -0,087$  МПа.

Для широкой грани:  $w_{max1} = w_{q1} + w_{p1} \cdot c_1 + w_{k1} = 652 + 113c_1 + 1,3 = 2$  мкм, отсюда  $w_{q1} = -81$  мкм. Тогда удельное усилие притяжения магнитного поля стола  $[p] = -0,083$  МПа.

Условие (7) не выполняется.

Для проверки условия (8) необходимо сначала определить минимально допускаемые удельные силы притяжения магнитного поля стола  $[p_1]$  для исследуемой направляющей из условия отсутствия сдвига заготовки. Определяем для исследуемой направляющей минимально допускаемые удельные силы притяжения магнитного поля стола  $[p_1]$  из условия сдвига заготовки (10):  $[p_1] = 0,15$  МПа.

Интенсивность равномерно распределённой нагрузки от усилия притяжения магнитного поля стола  $q_c = [p_1] \cdot b$ . При шлифовании узкой грани -  $q_c = 2,1$  Н/мм, результирующая сила  $P_c = 729,8$  Н. При шлифовании широкой грани -  $q_c = 2,25$  Н/мм, результирующая сила  $P_c = 787,5$  Н.

Проверяем условия 8 по алгоритму (см. рисунок 11):

$0,45y = 0,45 \times 30 = 13,5$  мкм  $> [\Delta] = 2$  мкм – не выполняется.

Вычисляем максимальные прогибы и контактные деформации для однопролётной балки от действия магнитного поля стола, собственного веса заготовки и радиальной составляющей силы резания при установке одной пары компенсаторов.

По формулам таблиц 3, 5 для узкой грани:  $w_{max1} = w_{q1} + w_{p1} \cdot c_1 + w_{k1} = 3,0 + 8,8c_1 + 1,2 = 5,8$  мкм  $> [\Delta] = 2$  мкм.

Для узкой грани жёсткость заготовки  $j_{z1} = 247 / 0,0088 = 28070$  Н/мм,  $c_1 = 0,18$ .

Для широкой грани:  $w_{max1} = w_{q1} + w_{p1} \cdot c_1 + w_{k2} = 3,8 + 10c_{11} + 1,16 = 6,9$  мкм  $> [\Delta] = 2$  мкм.

Для широкой грани жёсткость заготовки  $j_{z1} = 267 / 0,010 = 26700$  Н/мм,  $c_{11} = 0,19$ .

Условия (8) не выполняются, одной пары компенсаторов недостаточно для увеличения жёсткости заготовки.

Проверяем условия (9) по алгоритму рисунка 11:  $0,23y = 0,23 \times 30 = 6,9$  мкм  $> [\Delta] = 2$  мкм.

Вычисляем максимальные прогибы и контактные деформации для однопролётной балки от действия магнитного поля стола, собственного веса заготовки и радиальной составляющей усилия резания при установке двух пар компенсаторов по формулам таблиц 3, 5. Для узкой грани:  $w_{max2} = w_{q2} + w_{p2} \cdot c_2 + w_{k2} = 0,76 + 2,9c_{12} + 1,0 = 1,96$  мкм  $< [\Delta] = 2$  мкм.

Для узкой грани жёсткость заготовки  $j_{z1} = 247 / 0,0029 = 85200$  Н/мм,  $c_2 = 0,07$ .

Для широкой грани:  $w_{\max 2} = w_{q2} + w_{p2} + w_{k2} = 0,95 + 3,4 c_{12} + 1,0 = 1,99 \text{ мкм} < [\Delta] = 2 \text{ мкм}$ .  
 Для широкой грани жёсткость заготовки  $j_{31} = 267/0,0034 < 78530 \text{ Н/мм}$ ,  $c_{12} = 0,073$ .

Условия (9) выполняется.

Узкая и широкая грани заготовки шлифуются при режиме 1 при минимально допустимом удельном усилии притяжения магнитного поля стола  $[p_1]$  с двумя парами компенсаторов.

Проведенная оптимизация режимов плоского шлифования боковых граней призматических направляющих линейного подшипника ЛРХ 6/350, взятого в качестве примера позволяет предложить следующие рекомендации по снижению величины основного времени на операциях шлифования.

Норму основного времени при плоском врезном шлифовании определяем по формуле:

$$T_o = \frac{L \cdot h \cdot K}{1000 \cdot v_s \cdot S_p},$$

где  $L$ -длина заготовки, мм;  $h$ -припуск на обработку, мм;

$K$ - коэффициент, учитывающий врезание и перебег инструмента (принимаем  $K=1,4$ ).

Результаты оптимизации позволяют отказаться от дополнительных переходов в базовом техпроцессе на операциях 170-180, 195-210, 225-240, 255-270, 290, 305, 320, 335, 345.

Увеличить величину скорости подачи стола до оптимального значения  $v_{s\text{opt}} = 11 \text{ м/мин}$  на чистовых операциях. Увеличить величину радиальной подачи до ее оптимального значения  $S_{p\text{opt}} = 0,01 \text{ мм/ход}$  на операциях 285-300, 315-335. Указанные выше мероприятия позволяют сократить основное время на операциях шлифования направляющей на 30% (с 44 до 31 минуты).

По этим рекомендациям обрабатываются по одной из двух пар узких и широких граней, при обработке второй противоположной грани упругие деформации уже не будут превышать допускаемых величин, поэтому используется магнитное поле стола станка для закрепления заготовки и обработка ведётся без компенсаторов с параметрами режима 1. Оптимальные параметры режима 1, обеспечивающие наибольшую приведенную режущую способность (производительность)  $Q_{\max} = 121 \text{ мм}^2/\text{мин}$ ;  $t_{\text{opt}} = 0,011 \text{ мм/ход}$ ;  $v_{s\text{opt}} = 11 \text{ м/мин}$ .

От филиала ОАО «ЕПК Самара»

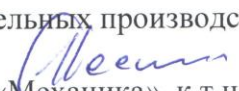
Начальник технического отдела

 Я.В. Панкратова

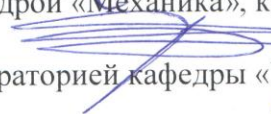
От Волжского политехнического института  
(филиал) ФГБОУ ВО

«Волгоградский государственный техниче-  
ский университет»

Зав. кафедрой «Технология и оборудование  
машиностроительных производств», д.т.н.,  
профессор

 В.А. Носенко

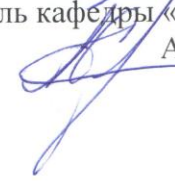
Зав. кафедрой «Механика», к.т.н., доцент

 В.Н. Тышкевич

Зав. лабораторией кафедры «Механика», к.т.н.

 С.В. Орлов

Старший преподаватель кафедры «Механика»

 А.В. Саразов