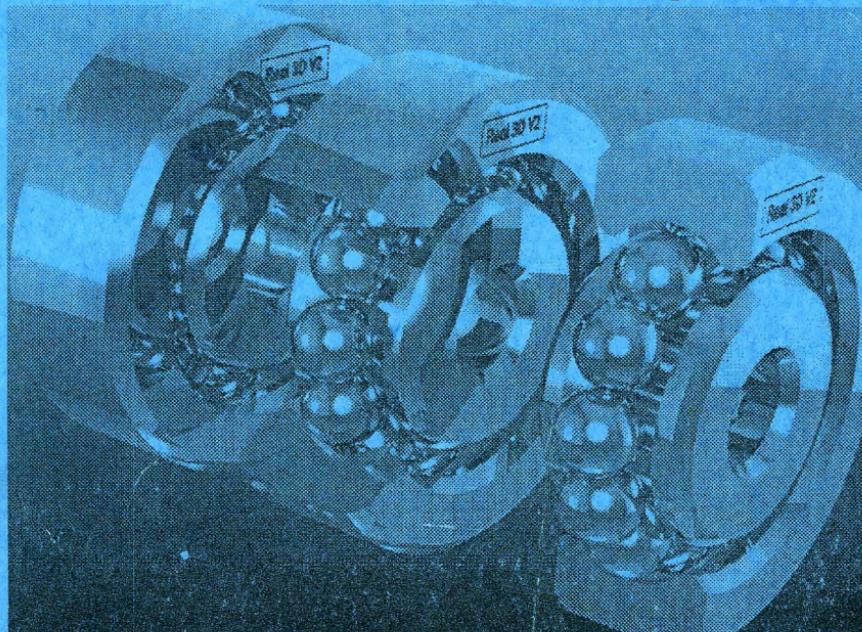


А.В. КОРОЛЕВ А.М. ЧИСТЯКОВ
О.Ю. ДАВИДЕНКО А.А. КОРОЛЕВ

НОВЫЕ ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Часть 2

Теоретические основы
многобрускового формообразующего
суперфиниширования с локализацией контакта
инструмента и обрабатываемой поверхности



Министерство общего и профессионального образования
Российской Федерации

Саратовский государственный технический университет

**А.В. КОРОЛЕВ А.М. ЧИСТЯКОВ
О.Ю. ДАВИДЕНКО А.А. КОРОЛЕВ**

**НОВЫЕ ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО
ПРОИЗВОДСТВА**

Часть 2

**Теоретические основы
многобрускового формообразующего
суперфиниширования с локализацией контакта
инструмента и обрабатываемой поверхности**

Саратов 1997

К66 Королев А.В., Чистяков А.М., Давиденко О.Ю.,
 Королев А.А. **НОВЫЕ ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
 МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА. Часть 2.**
 Теоретические основы многобрускового формообразующего
 суперфиниширования с локализацией контакта инструмента
 и обрабатываемой поверхности. - Саратов: Сарат. гос. техн.
 ун-т, 1997. -216 с.
 ISBN 5-7433-0342-8

Книга продолжает серию публикаций в области новых прогрессивных технологий машиностроительного производства, созданных научной школой технологов-машиностроителей СГТУ в творческом содружестве со специалистами Саратовского подшипникового завода. Изложены основы формирования профиля деталей типа колец подшипников качения на операции многобрускового суперфиниширования, основанного на локализации контакта инструмента и обрабатываемой поверхности. Приводятся стохастическая модель процесса съема металла на различных участках профиля заготовки, результаты исследования рациональных условий суперфиниширования, описывается созданное при участии авторов технологическое оборудование и даются рекомендации для практического использования предложенной технологии.

Для широкого круга разработчиков новой техники, инженерно-технических работников машиностроительных заводов, преподавателей и студентов технических вузов.

Табл. 16. Ил. 84. Библиогр.: 169 назв.

Рецензенты:

доктор технических наук профессор Б.М. Бржозовский
 (Саратовский государственный технический университет);

доктор технических наук профессор В.А. Бербер
 (директор Научно-исследовательского технологического института)

К $\frac{2704000000 - 10}{С97(03) - 97}$

© А.В. Королев
 А.М. Чистяков
 О.Ю. Давиденко
 А.А. Королев, 1997

ВВЕДЕНИЕ

Опоры качения находят все более широкое применение в различных отраслях промышленности: станкостроении, автомобильном и железнодорожном транспорте, авиации и космонавтике, энергетике и приборостроении и т.д. Повышение их эксплуатационных характеристик позволяет увеличивать надежность и ресурс машин и механизмов, конкурентоспособность оборудования на мировом рынке, а значит, является проблемой первостепенной важности.

Как показывает анализ, для обеспечения конкурентоспособного уровня качества отечественным производителям подшипников качения необходимо за счет комплексного решения задач по всем направлениям увеличить надежность и долговечность опор качения в 1,5-2 раза.

Увеличение ресурса работы опор качения можно обеспечить путем применения для их изготовления высококачественных сталей и сплавов, различных покрытий, механического упрочнения рабочих поверхностей деталей, специальных смазок и т.д. Это требует введения дополнительных операций в технологический процесс изготовления, что приводит к значительному увеличению трудоемкости производства, стоимости продукции и делает невозможным ее массовое использование.

Одним из наиболее перспективных направлений повышения эксплуатационных характеристик опор качения, не требующим значительных дополнительных затрат на изготовление, является совершенствование их конструкции путем оптимизации внутренней геометрии за счет обеспечения модифицированного контакта рабочих поверхностей деталей и повышения их точностных и качественных показателей.

Модификация профиля дорожек и тел качения позволяет создавать более равномерное распределение напряжений по площадке контакта и снижать уровень их максимальных значений [1-6]. А так как долговечность подшипников в 9-й степени зависит от максимальных контактных напряжений, то даже незначительное их снижение дает возможность получить существенное увеличение работоспособности [6].

Отечественными и зарубежными учеными накоплен значительный опыт в вопросах разработки оптимальных конструкций профилей поверхностей качения деталей подшипников. Выполненные исследования говорят о высокой эффективности рационального профилирования и свидетельствуют о необходимости дальнейшего совершенствования форм контактирующих поверхностей и методов их формообразования.

Как показали исследования специалистов Института машиноведения АН РФ и других ученых, рациональное профилирование дорожек и тел качения подшипников кривыми переменного радиуса может обеспечить повышение надежности и долговечности опор в 6 и более раз.

подавляющее большинство работ в области конструирования опор качения направлено на исследование сравнительно простой модификации, связанной с профилированием рабочих поверхностей деталей подшипников сочетанием круговых и прямых линий [5, 6]. Подобные меры, в силу определенной эффективности и простоты в технологическом осуществлении, получили широкое признание и распространение, однако их возможности на данном этапе в значительной степени исчерпаны.

Другая часть работ посвящена решению чисто конструктивных задач, связанных с расчетами и испытанием новых профилей, как правило, имеющих сложную геометрическую форму [7,8]. При этом, чаще всего, уровень технологических возможностей современного

оборудования не обеспечивает получения требуемых параметров такого профиля на заключительных стадиях технологического процесса обработки. Формирование внутренней геометрии подшипников окончательно осуществляется на операциях брусковой доводки рабочих поверхностей их деталей.

Однако технологические возможности традиционных методов весьма ограничены. Эти методы мало производительны, обладают пониженными формообразующими возможностями, имеют низкий уровень универсальности и технологической гибкости, трудно автоматизируемы, что, с одной стороны, существенно ограничивает их использование в производстве, особенно в условиях гибких производственных систем, с другой — сдерживает внедрение в промышленность высокоэффективных конструкций опор качения повышенной надежности и долговечности.

Изысканию возможности устранения указанных выше недостатков и совершенствованию технологии суперфинишной обработки и посвящена настоящая монография.

1. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

1.1. Рациональная геометрическая форма рабочих поверхностей опор качения

Наиболее ответственными и достаточно типичными „представителями” деталей прецизионных узлов механизмов и машин являются детали опор качения. В настоящее время отечественными и зарубежными учеными разработано множество разновидностей опор качения, различающихся по форме профиля рабочих поверхностей колец и тел качения. Среди них особое место занимают радиальные шариковые и роликовые подшипники.

Широкое применение в узлах повышенной точности и жесткости (шпиндельные узлы) имеют стандартные роликовые подшипники с прямолинейной образующей рабочих поверхностей дорожек и тел качения. Эти подшипники обладают высокой жесткостью и точностью вращения, но требуют полного отсутствия перекосов при монтаже и эксплуатации, что практически недостижимо. Поэтому при изготовлении этих подшипников предъявляются повышенные требования к качеству обработки рабочих поверхностей их деталей.

Наличие даже минимальной несоосности колец приводит к резкому снижению долговечности и грузоподъемности роликоподшипников [6,7]. Это связано с тем, что при перекосах усугубляются краевые эффекты, изменяется распределение нагрузок по телам качения и по длине площадок контакта, повышается уровень вибрации и шума, часто появляется заедание. Наибольшая концентрация напряжений приходится на небольшую зону вблизи края области контакта, что приводит к снижению долговечности в результате более интенсивного износа и образования усталостных повреждений [6-11]. Величина напряжений по краям площадки контакта в несколько раз

превышает напряжения в ее середине, а участок наиболее резкого увеличения контактных деформаций и напряжений занимает всего 0,07-0,166 длины ролика. При перекосе напряжения могут увеличиваться в 2-3 раза по сравнению с напряжениями, рассчитанными по формулам Герца-Беляева, снижая долговечность подшипника на порядок и выше [9].

Более устойчивы к отрицательному влиянию монтажных и эксплуатационных перекосов шариковые подшипники. Рабочие поверхности колец стандартных шарикоподшипников выполняются с дуговым профилем. Однако, как показывают исследования многих авторов [1-3 и др.], такая конструкция профиля не является оптимальной. Более рациональные условия контактирования можно обеспечить путем изменения формы профиля дорожек качения, а у роликовых подшипников - и роликов.

В настоящее время широкое распространение из-за относительной простоты изготовления получили тела или дорожки качения с образующей в виде дуги окружности большого радиуса (бомбины) [5,8,12]. При изготовлении роликоподшипников чаще всего бомбинируют ролики, а не дорожки качения, так как бомбину на ролике технологически проще получить. Однако, как указывается в работе [6], введение бомбины на внутренних кольцах цилиндрических роликоподшипников позволяет повысить их долговечность в три раза.

Создание бомбины круговой формы на поверхности роликов не исчерпывает резервов повышения работоспособности роликовых подшипников. Это связано с тем, что с увеличением радиуса бомбины величина допустимого перекоса колец, хотя и возрастает, снижая опасность появления краевого эффекта, но в точках начального контакта ролика с дорожкой качения возникают повышенные контактные напряжения, что снижает работоспособность и

грузоподъемность подшипника. Поиск путей устранения этого противоречия [6,13-18] привел к созданию множества конструкций роликов, профиль которых очерчен различными сочетаниями круговых и прямых линий (рис.1.1). Однако эти конструкции нашли в промышленности ограниченное применение из-за сложности изготовления.

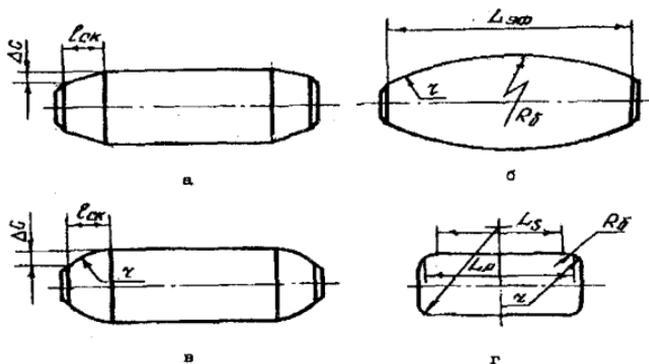


Рис.1.1. Ролики с модифицированной образующей:

- а) с прямыми скосами, $L_{ск}$ - длина скоса, ΔC - высота скоса; б) с круговыми скосами и бомбиной, r - радиус скоса, $R_б$ - радиус бомбины, $L_{эф}$ - эффективная длина ролика; в) с круговыми скосами; г) со сложной формой профиля, $L_з$ - длина прямолинейного участка, $R_с$ - радиус скруглений, r - радиус скруглений, L_p - длина рабочей части

Особый интерес представляют конструкции роликов [9,19,20] с полыми поверхностями (рис.1.2) и конструкции колец с выточками. Так, оригинальную конструкцию радиального цилиндрического роликоподшипника предлагает фирма SKF (ФРГ) [21]. Как видно из рис.1.3, отличительными особенностями этого подшипника являются проточки на посадочных поверхностях наружного и внутреннего колец, а также глубокие выточки на торцах роликов.

При приложении к подшипнику радиальной нагрузки происходит упругий прогиб внутреннего кольца 1 в зоне проточки и деформация краев ролика 2, увеличивающаяся при приближении к центральной перемычке в его внутренней полости.

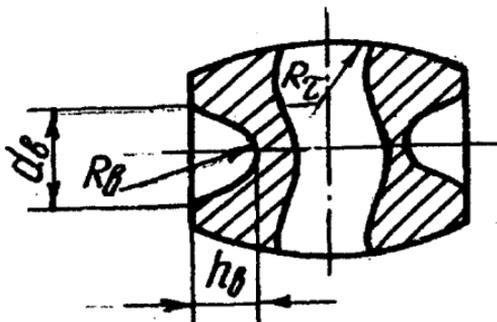


Рис. 1.2. Бомбинированный ролик с конусными выточками на торцах

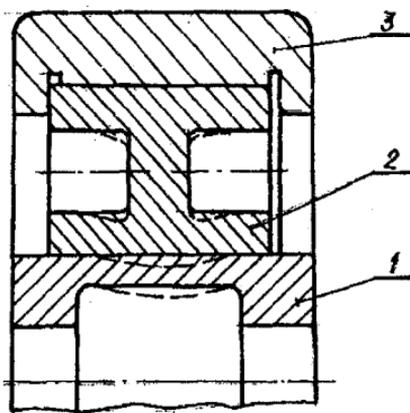


Рис. 1.3. Схема роликоподшипника облегченной конструкции: 1 - внутреннее кольцо; 2 - ролик; 3 - наружное кольцо

Значительное внимание модификации контактных поверхностей подшипников качения уделено в работах А.В. Орлова [3,22,23 и др.]. Некоторые недостатки современных конструкций роликовых подшипников, как считает автор, можно устранить применением конусного бомбинирования роликов (рис.1.4, а) или дорожки качения одного из колец (рис.1.4, б), что позволяет уменьшить вероятность ошибок при сборке. Однако изготовление таких подшипников сопряжено с определенными трудностями как технологического, так и организационного характера.

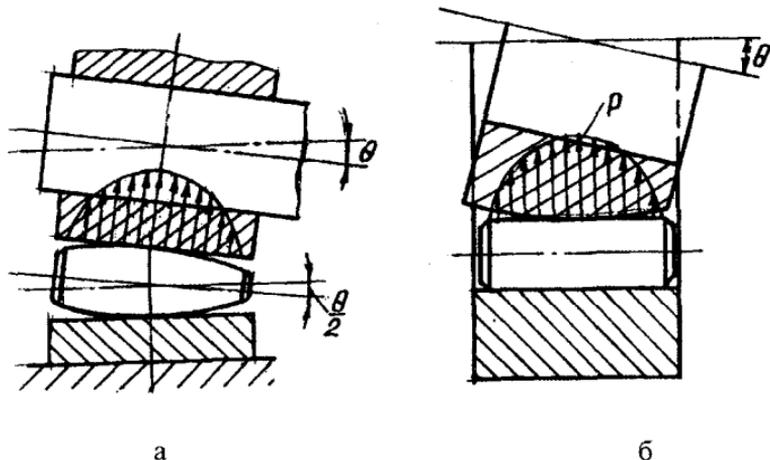


Рис.1.4. Конусное бомбинирование деталей роликоподшипника:
 а - бомбинирование ролика; б - бомбинирование дорожек качения

В связи с этим автор [23] предлагает технологически более простую модификацию формы рабочих поверхностей деталей роликоподшипников, которая заключается в придании ролику или дорожке качения (рис.1.5) конусности, угол которой равен максимальному углу Q перекоса осей колец подшипника.

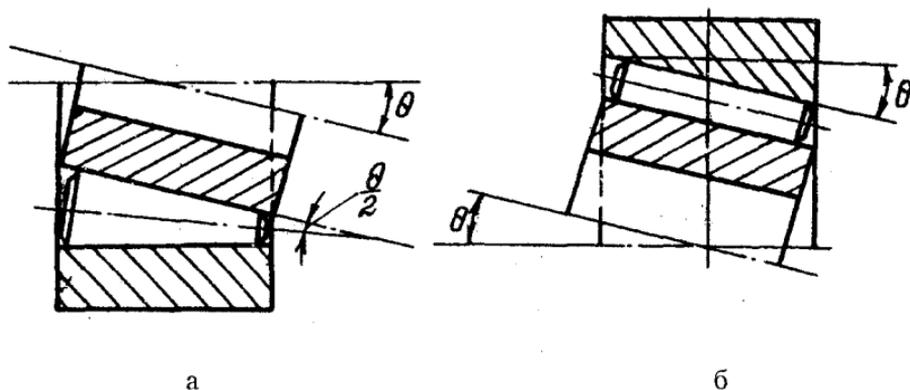


Рис.1.5. Конусная модификация деталей роликоподшипника:
 а - модификация ролика; б - модификация дорожки качения

Благодаря этому при максимальной нагрузке будет получена предельно возможная для прямолинейной образующей равномерность распределения давления по длине роликов. Приведенные автором результаты испытаний таких подшипников показывают высокую эффективность описанного метода оптимизации. Но такие подшипники могут изготавливаться в ограниченном количестве, как подшипники специального назначения.

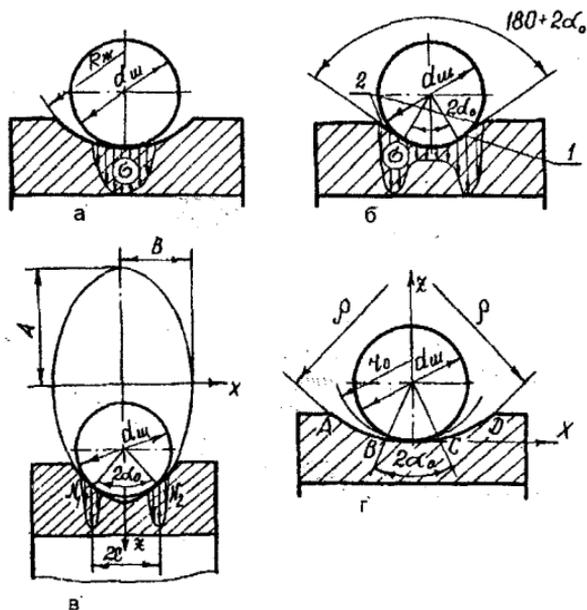


Рис. 1.6. Аналоги предлагаемой конструкции подшипника качения

Некоторые из конструктивных решений, направленных на повышение эксплуатационных характеристик шариковых подшипников, представлены на рис. 1.6. Здесь показаны шарикоподшипники с эллиптическим, гиперболическим и комбинированным профилем дорожки качения. Комбинированный профиль выполнен в виде трех сопряженных дуг окружностей различного радиуса.

Выбор соответствующих соотношений этих радиусов обеспечивает возможность перераспределения контактных напряжений на площадке контакта (рис. 1.7). Испытания показали, что подшипники данной конструкции обеспечивают повышение долговечности в 2-2,5 раза по сравнению со стандартными конструкциями.

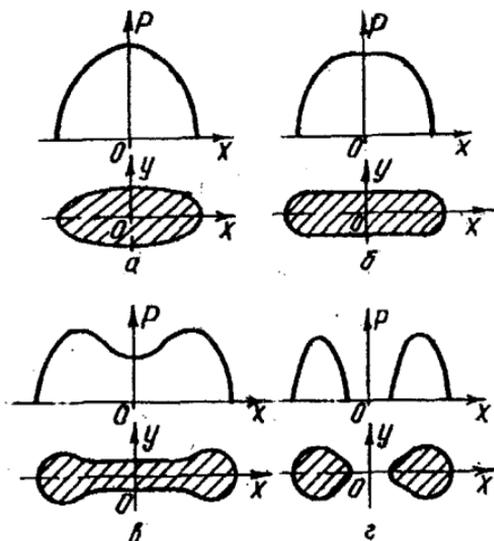


Рис. 1.7. Площадки контакта между шариком и желобом и эпюры давлений: а) $D/R_0=0,515$; б) $D/R_0=0,505$; в) $D/R_0=0,495$; г) $D/R_0=0,485$

Однако эти подшипники имеют ряд существенных недостатков, основные из которых следующие:

1. В точках перегиба возникают пики контактных напряжений, что ограничивает диапазон допустимых внешних нагрузок и обеспечивает применение данных подшипников только по спецназначению;

2. Подшипники указанной конструкции очень чувствительны к изменению величины осевого зазора, что также ограничивает область их применения;

3. Весьма трудоемка механическая обработка желобов, особенно их чистовая и окончательная обработка.

Устранить указанные недостатки позволяют конструкции подшипников качения, предложенные Саратовской научной школой [24,25]. В данных конструкциях профиль дорожек качения предлагается выполнять плавным в виде степенной кривой с показателем степени от 2 до 6. Это дает возможность при использовании простых технологических средств повысить долговечность опор в 3-6 раз.

1.2. Технологии формообразования рабочих поверхностей деталей опор качения

Окончательное формирование точностных и качественных характеристик деталей подшипников осуществляется на заключительных стадиях технологического процесса. В качестве окончательной обработки рабочих поверхностей колец и роликов в настоящее время широко используют суперфиниширование. Этот процесс должен обеспечивать повышенную точность в продольном и поперечном сечениях заготовки, низкую шероховатость обрабатываемой поверхности и удаление с нее дефектных слоев металла, оставшихся после предшествующей обработки.

В работах [26,27] показано, что наибольшая долговечность шарикоподшипников достигается при шероховатости желобов колец в пределах $R_a = 0,08-0,05$ мкм и амплитуде волнистости, не превышающей 0,2 мкм. Отдельные шлифовочные риски на дорожках качения не допускаются [26]. Снятие припуска от 10 до 20 мкм на диаметр, как считает автор, устраняет отдельные шлифовочные риски, исходную волнистость и отклонения от круглости [27].

Несущая способность подшипников качения зависит от погрешностей геометрической формы дорожек качения колец [1]. Образование волнистости всегда сопровождается неравномерностью распределения шероховатости и микротвердости на вершинах и

впадинах волн [28], что составляет дополнительный источник разрушения поверхности, особенно при циклических нагрузках [29].

Окончательную обработку рабочих поверхностей одно- и двухбортовых колец роликоподшипников осуществляют суперфинишными абразивными брусками, совершающими осциллирующие движения вдоль образующей дорожки качения. Применяются абразивные бруски, либо сплошные, но тонкие (рис. 1.8), либо с вырезами на рабочей поверхности (рис. 1.9).

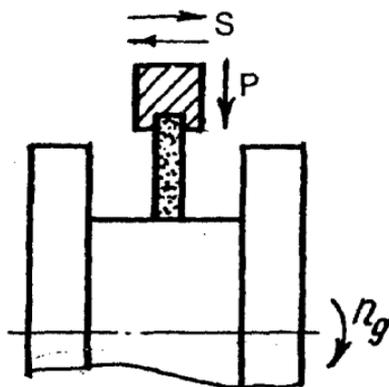


Рис. 1.8. Схема процесса суперфиниширования сплошным тонким бруском

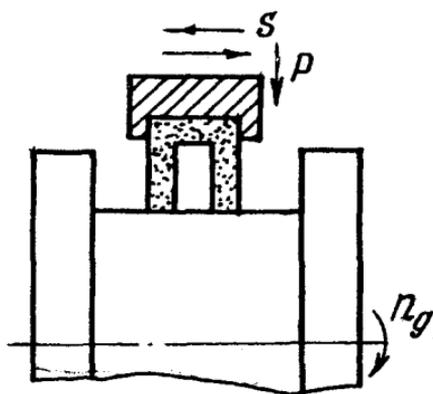


Рис. 1.9. Схема процесса суперфиниширования профильным бруском

Из-за простоты осуществления этот способ нашел широкое применение на подшипниковых заводах. Однако он не обеспечивает стабильной точности обрабатываемого профиля и допускает образование вогнутости и конусности на дорожках качения. Ярким подтверждением тому являются результаты исследований точности суперфинишной обработки дорожек качения, проведенных авторами данной монографии в цехах ОАО СПЗ.

Результаты исследований показали, что от 10 до 70% колец имели недопустимые искажения профиля дорожки качения и подвергались доработке. Присутствие вогнутости на дорожках качения колец роликоподшипников, как наиболее часто встречающейся погрешности обработки, приводит к резкому уменьшению длины площадки контакта, а также способствует значительной концентрации напряжений в малых по площади областях. Это способствует увеличению уровня контактных напряжений и, как следствие этого, снижению долговечности и грузоподъемности опор.

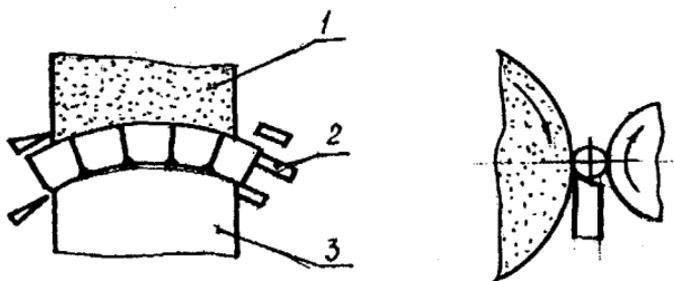
Рабочие поверхности цилиндрических роликов и безбортовых колец с прямолинейной образующей окончательно обрабатывают напроход абразивными брусками на бесцентровых суперфинишных станках.

На Саратовском подшипниковом заводе разработана технология изготовления роликовых подшипников с приставными бортами. На первых стадиях технологического процесса обрабатываются кольца без бортов. Это дает возможность вести обработку напроход, что обеспечивает более высокую точность формы прямолинейной образующей дорожки качения. На завершающем этапе технологического процесса производят механическое крепление направляющих бортов к дорожке качения.

Повышение точности формообразования роликовой дорожки увеличивает эксплуатационные показатели подшипника.

Механическое крепление направляющих бортов в большинстве случаев не оказывает существенного отрицательного влияния на работоспособность роликоподшипников.

Однако в тяжелых условиях эксплуатации подшипники данной конструкции практически не применимы. Получение выпуклого профиля на роликах, чаще всего, осуществляют на шлифовальных операциях при обработке на бесцентрово-шлифовальных станках. Ролики диаметром от 1 до 50 мм с небольшими кривизнами образующих шлифуют с продольной подачей напроход (рис.1.10). Их обрабатывают фасонными кругами, правку которых выполняют по копирам. Ролики больших размеров шлифуют методом врезания до упора.



*Рис. 1.10. Схема шлифования напроход бомбинированных роликов:
1 - шлифовальный круг; 2 - нож; 3 - ведущий круг*

Более эффективно необходимый профиль образующей роликов получать на стадии доводки. Так, на Самарском подшипниковом заводе бомбину на роликах стали формировать на операции суперфиниширования с использованием станка мод. СЦАСЛ 50х50 и транспортирующих валков специальной конструкции (рис.1.11).

Несколько раньше работы по теоретическим и экспериментальным исследованиям возможности бомбинирования роликов на стадии бесцентрового суперфиниширования были

выполнены на кафедре "Технология машиностроения" Саратовского политехнического института под руководством профессора С.Г.Редько [33 и др.]. Результаты этих работ с успехом внедрены в производство и дали весомый экономический эффект.

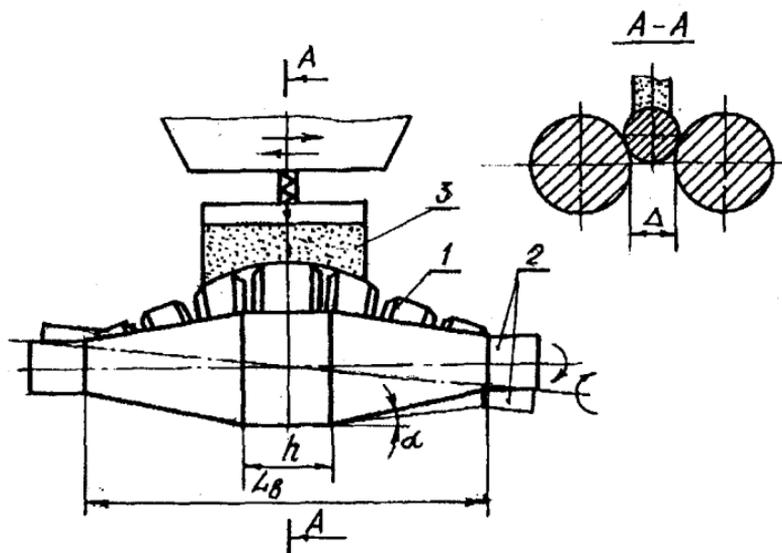


Рис.1.11. Схема бомбинирования поверхности цилиндрических роликов:
1 - заготовка; 2 - транспортирующие валики; 3 - абразивный брусок

В настоящее время разработан ряд способов формирования выпуклого профиля обрабатываемой поверхности на стадии ее доводки осциллирующим абразивным бруском [34,35]. Так, известен способ хонингования цилиндрических поверхностей заготовок, при котором брусок прижимается к вращающейся детали с постоянной силой и перемещается по обрабатываемому профилю с переменной скоростью [35].

Этот способ позволяет частично исправлять форму профиля обрабатываемой поверхности. Однако производительность его низка, так как бруски прижимаются к обрабатываемой поверхности всей

своей рабочей поверхностью и быстро затупляются, точность профиля обрабатываемой поверхности получается невысокой, так как сьем материала заготовки усредняется на всей длине площадки контакта бруска с изделием.

Известен способ доводки дорожек качения подшипников абразивным бруском [36], при котором последнему сообщают движение поперек дорожки качения с траекторией в виде дуги окружности, смещенной от аксиальной плоскости кольца (рис.1.12).

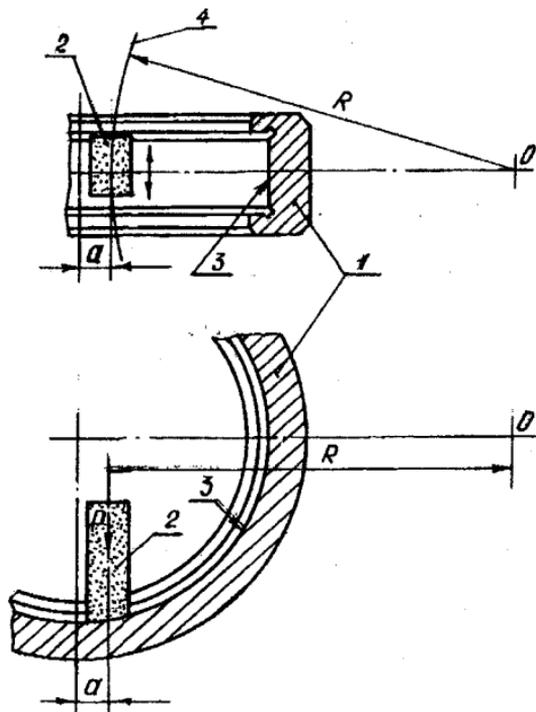


Рис.1.12. Способ абразивной обработки с дуговой траекторией перемещения инструмента: 1 - заготовка; 2 - абразивный брусок; 3 - обрабатываемая поверхность; 4 - траектория перемещения бруска

Данному способу присущи недостатки предыдущего метода, кроме того, он не позволяет обрабатывать наружные поверхности, что ограничивает его применение в подшипниковой промышленности.

Некоторое повышение режущей способности брусков при доводке наблюдается при обеспечении прерывистого контакта их рабочей поверхности с поверхностью обработки. При этом улучшаются условия очистки зоны контакта от продуктов резания. Способы обработки, основанные на этом принципе, предусматривают, кроме обычного возвратно-поступательного движения брусков вдоль обрабатываемого профиля, еще и колебательное движение либо по нормали к обрабатываемой поверхности, либо в каком-нибудь другом направлении [30-32].

Эти способы позволяют, в некоторой степени, повысить точность геометрической формы обрабатываемого профиля, однако исправлению подлежат лишь погрешности с шагом, не превышающим длину бруска. Кроме того, им свойственна сложность и высокая трудоемкость осуществления, что часто делает их экономически нерациональными в применении.

Наиболее распространенным способом суперфиниширования желобов колец шарикоподшипников [37-40] является доводка с ротационной проосцилляцией бруска (рис. 1.13), при которой абразивный брусок колеблется вокруг оси, проходящей через центр симметрии обрабатываемого профиля. Обработка осуществляется мелкозернистым инструментом, а основными видами взаимодействия зерен с металлом являются микрорезание со снятием тончайших слоев (0,1-0,5 мкм) стружек и трение с пластическим оттеснением металла. Оптимизацией условий суперфиниширования можно обеспечить непрерывное резание в течение определенного времени, при этом скорость съема металла достигает 1-1,5 мкм/с, происходит незначительное исправление геометрической формы детали и удаление дефектного слоя, оставшегося от предшествующей обработки [40].

В конце обработки процесс переходит в режим граничного трения, при котором брусок выглаживает и полирует обрабатываемую поверхность, придавая ей зеркальный блеск [37].

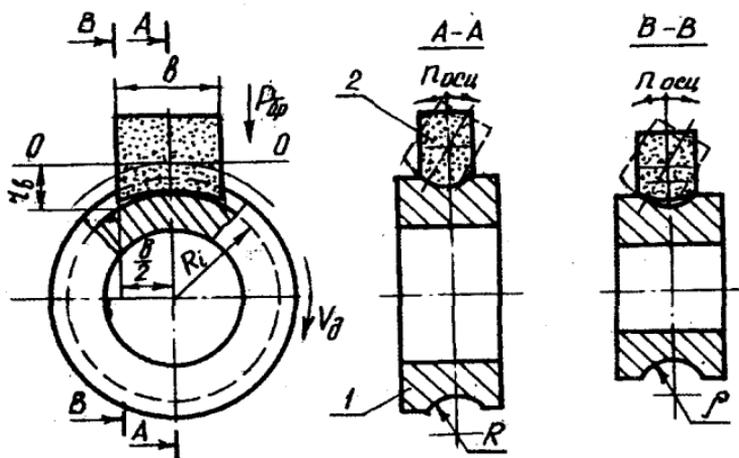


Рис. 1.13. Схема суперфиниширования желобов колец шарикоподшипников

При традиционном суперфинишировании прижим бруска к изделию осуществляется через упругие кинематические звенья [38]. Процесс резания носит затухающий характер и после устранения неровностей исходной шероховатости прекращается. В связи с этим съём металла ограничен и не превышает 0,005-0,01 мм на диаметр, при этом шероховатость обработанной поверхности обеспечивается в пределах $R_a = 0,040-0,025$ мкм, волнистость - в пределах от 0,05 до 0,2 мкм [38].

В случае жесткого прижима бруска к изделию обеспечивается непрерывность съема металла во времени и удаление дефектного слоя, оставшегося от предшествующей обработки. Максимальный съём металла находится в пределах от 0,03 до 0,05 мм на диаметр, волнистость обработанной поверхности снижается до 0,005 мкм, а шероховатость - до $R_a = 0,025$ мкм [38].

Производительность брусковой обработки зависит от глубины внедрения абразивного зерна в металл, его площади поперечного сечения и количества абразивных зерен, одновременно участвующих в работе.

При увеличении размера зерна увеличивается площадь поперечного сечения среза, но количество этих срезов уменьшается [41]. Следовательно, для повышения производительности съема припуска необходимо интенсифицировать режимы обработки, повысить давление на брусок и увеличить количество активных режущих зерен.

На шероховатость обработанной поверхности наибольшее влияние оказывает глубина внедрения зерен абразивного инструмента в металл [39,42]. Увеличение зернистости инструмента, а также его давления на обрабатываемую поверхность приводит к увеличению шероховатости [37,41,42].

Увеличение скорости скольжения зерен повышает температуру в зоне резания [43]. При этом уменьшается угол скрещивания рисок на обрабатываемой поверхности, увеличивается длина стружек, а следовательно, и вероятность засаливания поверхности бруска, что ведет к снижению шероховатости обработанной поверхности [44-46].

Исследованиями [27] установлено, что на исправляющую способность брусковой обработки наибольшее влияние оказывает величина отношения длины абразивного бруска к длине окружности обрабатываемой поверхности изделия. При увеличении длины бруска он своей рабочей поверхностью перекрывает большее число волн неровностей и более эффективно устраняет их с обрабатываемой поверхности. Наилучшие результаты достигаются при поверхностном контакте бруска с изделием, например, при обработке цилиндрических поверхностей. В процессе доводки желобов колец шарикоподшипников, из-за непостоянства кривизны профиля и

несовпадения центра качания бруска с центром кривизны обрабатываемой поверхности, имеет место линейный контакт инструмента с заготовкой. При этом уменьшается длина контакта бруска с изделием и снижается возможность устранения неровностей низких номеров гармоник.

При осуществлении брусковой обработки в результате действия на брусок силы давления и других факторов в зоне резания возникают автоколебания, которые улучшают условия самозатачивания, увеличивая, однако, амплитуду волнистости на обрабатываемой поверхности [28].

Таким образом, интенсификация процесса резания, с одной стороны, обеспечивает увеличение производительности обработки и толщины снимаемого слоя, с другой стороны, приводит к искажению обрабатываемого профиля и увеличению высоты микронеровностей поверхности обработки [47]. Поэтому суперфиниширование криволинейных поверхностей чаще всего осуществляют в две операции: на первой - производят интенсивный сьем припуска, на второй - достигают требуемого уровня шероховатости обрабатываемой поверхности. Такая структура цикла обработки значительно снижает ее производительность и увеличивает себестоимость [48].

На основе выполненного анализа можно сформулировать основные недостатки классического способа суперфиниширования [38,39,49].

1. При суперфинишировании поверхностей с исходной шероховатостью $R_a = 1,25 - 0,8$ мкм 40% изделий имеют следы шлифовочных рисок и требуют повторной обработки.

2. Имеют место искажения обрабатываемого профиля.

3. Осуществление процесса в несколько переходов, если необходимо

обеспечить удаление больших припусков и получение низкой шероховатости.

4. Не обеспечивается исправление исходных погрешностей геометрической формы с низкими номерами гармоник (овальность, гранность).

5. Сложность наладки и необходимость периодической подналадки, что снижает уровень автоматизируемости процесса.

6. Низкий уровень универсальности, так как для обработки различных по форме профиля поверхностей требуется использование специального оборудования, различающегося по кинематике перемещения инструмента. Так, для доводки желобов колец шарикоподшипников необходимо обеспечить осциллирующее колебательное движение вокруг центра симметрии обрабатываемого профиля, при доводке поверхностей с прямолинейной образующей инструменту сообщают возвратно- поступательное движение вдоль обрабатываемого профиля, при обработке иных по форме поверхностей требуется другая кинематика перемещения инструмента.

В настоящее время известно множество работ, посвященных исследованию различных методов суперфинишной обработки поверхностей вращения, направленных на улучшение отдельных технологических показателей процесса [26-28, 41-96].

Исследованием абразивной доводки в той или иной степени занимались Асаэда, И.М. Брозголь, Д.Г. Евсеев, А.В. Королев, Клемм, С.Г. Редько, А.Н. Сальников, И.Е. Фрагин, Франк, Л.В. Худобин, П.И. Ящерицын и многие другие ученые, работы которых способствовали широкому распространению суперфиниширования во многих отраслях промышленности. Рассмотрим технологические возможности наиболее эффективных методов (рис. 1.14).

В Саратовском техническом университете разработан способ обработки криволинейных поверхностей с дополнительным

движением бруска [49-50], которому, помимо ротационной осцилляции, сообщают дополнительное возвратно- поступательное движение вдоль оси колебания, проходящей через центр кривизны профиля обрабатываемой поверхности, и прижимают к ней с постоянной силой (рис.1.14,а).

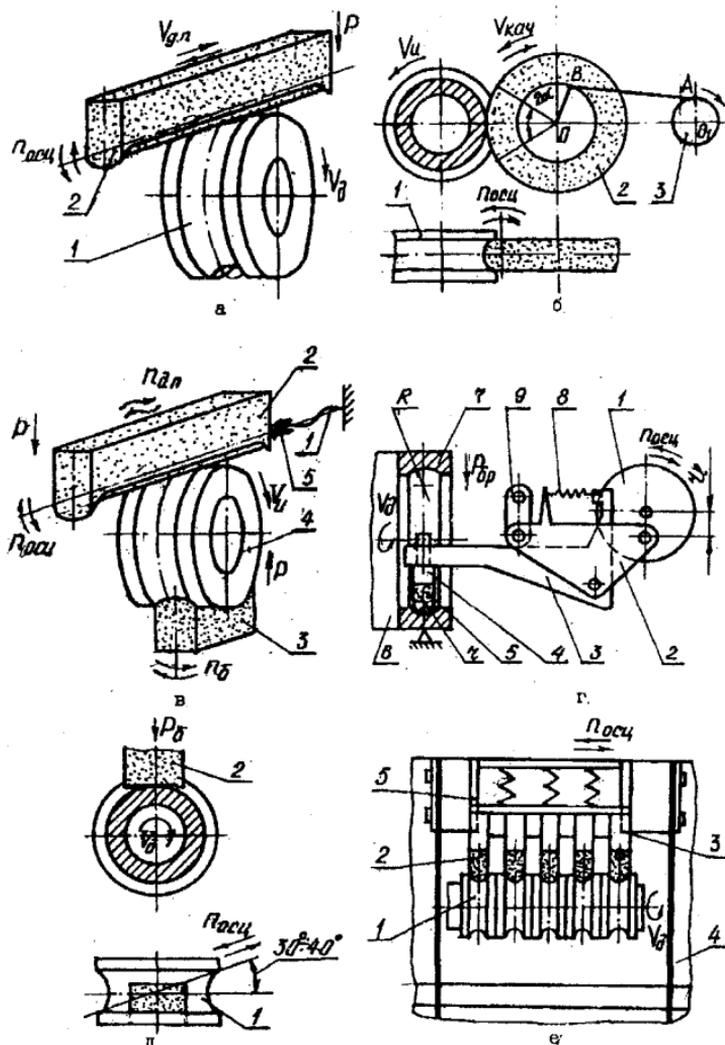


Рис.1.14. Схемы брусковой доводки желобов колец шарикоподшипников

Обработка производится в два перехода: на первом - осуществляется возвратно-поступательное движение бруска, на втором - возвратно-поступательное движение прекращается, а остальные движения сохраняются. Сообщение бруску дополнительного движения улучшает условия его очистки от продуктов резания и позволяет повысить производительность обработки.

Вторая разновидность этого метода (рис.1.14,в) заключается в том, что дополнительное движение бруска осуществляется по винтовой траектории и в обработке участвует второй брусок [52,52].

Несмотря на некоторое повышение производительности съема припуска, этому методу присущи недостатки, характерные для классического суперфиниширования.

Известно, что совмещение операций приводит к повышению производительности и точности обработки. На этом принципе основан метод шлифования-доводки качающимся кругом [53,54]. На начальном этапе осуществляется шлифование заготовки, потом круг затормаживается, перестает вращаться и приобретает качательные движения вокруг оси вращения. К недостаткам метода можно отнести необходимость использования в качестве инструмента шлифовальных кругов на вулканитовой связке, которые плохо сохраняют геометрическую форму своей режущей поверхности и вносят погрешности в обрабатываемый профиль.

Суперфиниширование способом поступательной круговой осцилляции [39,55] осуществляется абразивным бруском, которому сообщают поступательное движение по дуге окружности радиусом, равным разности радиусов профиля обрабатываемой поверхности и поверхности инструмента (рис. 1.14,г). При этом обеспечивается линейный контакт бруска с изделием на всей его длине, что позволяет значительно уменьшить амплитуду волнистости и некруглости с шагом в пределах осевого размера бруска. При обработке в течение 60 с и

давлении брусков на обрабатываемую поверхность в пределах 5 кг обеспечивается съем металла, равный 6 мкм на диаметр, волнистость - 0,1 мкм, некруглость - 0,6 мкм.

Для улучшения очистки и самозатачивания бруска предложена косоугольная доводка [58-60]. По этому способу (рис. 1.14, д), помимо обычного осциллирования, брусок совершает дополнительное колебательное движение под острым углом к вектору линейной скорости изделия. Такое движение способствует возрастанию давления в зоне резания и динамичности воздействия бруска на металл. Это интенсифицирует резание, повышает производительность и стабилизирует работу бруска, однако при этом наблюдается значительное искажение обрабатываемого профиля [60].

При суперфинишировании с "развязанным" центром колебания (рис. 1.14, е) бруском сообщают два взаимосвязанных возвратно-поступательных движения, не совпадающих по направлению, при сложении которых рабочие поверхности брусков скользят по обрабатываемому профилю изделия [61].

Этот способ применяют, как правило, для доводки рабочих поверхностей колец приборных подшипников. С увеличением размеров обрабатываемых колец увеличивается масса колеблющихся деталей, что приводит к снижению скоростей осцилляции инструмента и, как следствие, к снижению производительности обработки.

В СКБ ШО разработан способ ультразвукового суперфиниширования [62-65], который обеспечивает такое же высокое качество обрабатываемой поверхности, как и обычное суперфиниширование, но в 2-3 раза производительнее его и стабильнее по получаемым параметрам шероховатости и съема металла. Обработку осуществляют следующим способом: сначала, в дополнение к обычным движениям бруска, на него накладывают ультразвуковые колебания (УЗК) с частотой 18-44 кГц и амплитудой 1-5 мкм и более.

УЗК поддерживают до снятия припуска, после чего обрабатываемую поверхность выхаживают этим же бруском. Одним из недостатков этого процесса является высокий износ брусков, который в 5-6 раз превышает износ при обычном суперфинишировании, что ограничивает использование УЗ суперфиниширования в промышленности.

На рис.1.15 представлена схема суперфиниширования вращающимися брусками [67]. Обработка производится несколькими абразивными брусками, расположенными в единой суперфинишной головке, ось вращения которой пересекается под некоторым острым углом с осью вращения заготовки в центре ее симметрии.

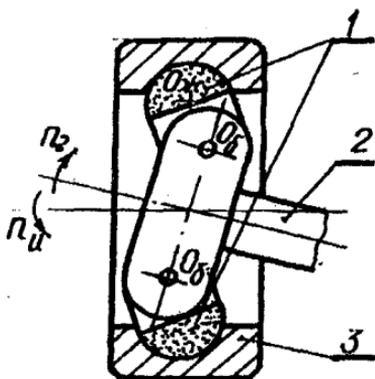


Рис. 1.15. Схема обработки вращающимся инструментом:
1 - абразивные бруски; 2 - инструментальная головка; 3 - заготовка

При этом бруски, расположенные на осях, начинают качаться вокруг них, обрабатывая желоб. Многобрусовая схема обработки обеспечивает повышенную производительность съема припуска, однако во время доводки появляются дополнительные вибрации из-за неравномерного износа брусков, снижающие точность геометрической формы заготовки в ее продольном и поперечном сечениях.

Выполненный обзор исследований показывает, что важнейшими проблемами суперфинишной обработки рабочих поверхностей

деталей, тормозящими ее дальнейшее распространение, являются: низкая производительность съема припуска, нестабильное обеспечение требуемых показателей обработки, низкий уровень формообразующих возможностей, недостаточная степень универсальности и технологической гибкости. Особое место занимает проблема исправления геометрической формы обрабатываемой поверхности, но результаты исследований этого вопроса носят противоречивый характер.

Ряд исследователей [9,11,24,82] считает, что степень наследования исходных погрешностей геометрической формы обрабатываемых поверхностей при суперфинишировании определяется величиной снимаемого припуска. Поэтому изучается механизм резания единичным зерном и режущей поверхностью абразивного инструмента, выявляются закономерности формообразования обрабатываемой поверхности, определяются режимные факторы процесса, при которых достигаются наилучшие результаты. Эти исследования базируются в основном на теории абразивного изнашивания [48,70-72].

В работах [48,72] установлена линейная зависимость скорости изнашивания инструмента от его давления на обрабатываемую поверхность и скорости относительного движения контактирующих поверхностей, однако при этом не учитывается нестационарность процесса резания, состояние и жесткость технологической системы.

В других работах [42,62,73] показано, что в качестве критерия, определяющего закономерности съема металла, может быть использовано отношение глубины внедрения абразивного зерна в обрабатываемую поверхность к радиусу его вершины. На этой основе определены рациональные условия осуществления процесса брусковой обработки, но не затронуты вопросы снижения исходных погрешностей геометрической формы заготовки.

Значительное количество исследований [74-79] посвящено изучению геометрических характеристик абразивного инструмента и их влияния на показатели обработки. При изучении рельефа рабочей поверхности абразивных брусков выявлены дополнительные характеристики, что дает возможность более глубокого изучения закономерностей резания [74,75] на основе более точных представлений о размерах и форме следов от зерен. Однако здесь не учитывается изменение этих характеристик в процессе обработки.

Противоречивы исследования, связанные с изучением закономерностей исправления погрешностей заготовки в ее продольном сечении. Так, в работах И.М. Брозголя утверждается, что на интенсивность исправления отклонений от круглости значительное влияние оказывает длина бруска. В работах [41-49] показано, что величина погрешностей обработки снижается с увеличением давления брусков на обрабатываемую поверхность. В работе [38] исправление некруглости и гранности ставится в зависимость от режущей способности инструмента. Однако не учитывается жесткость резания и податливость системы СПИД.

В работах [83-92] приводятся интересные сведения о возможности формирования в процессе абразивной обработки регулярного микрорельефа обрабатываемой поверхности. Предложены методы обеспечения регулярной шероховатости [90,91] и обоснована целесообразность использования этих методов при обработке рабочих поверхностей деталей подшипников качения. Приводятся результаты исследований, свидетельствующие о повышенной работоспособности опор качения, имеющих регулярный микрорельеф на рабочих поверхностях деталей [88,89,92].

1.3. Классификация способов брусковой обработки

На основе проведенного анализа, с целью систематизации выполненных исследований и обобщения их результатов разработана классификация известных методов брусковой обработки высокоточных деталей (рис.1.16), которая основана на трех группах признаков: технологических, конструкторских и контактных.

Технологические признаки доводки представлены степенью универсальности, уровнем технологической гибкости, формообразующими возможностями и степенью автоматизируемости процессов. Так, по степени универсальности известные методы брусковой обработки можно разделить на широко универсальные, универсальные и специальные. Широко универсальные способы доводки могут быть использованы для обработки самых различных по форме профиля и размерам наружных и внутренних поверхностей (вогнутых, выпуклых, конических, сферических, прямолинейных и т.д.) без существенной переналадки технологического оборудования [93-94].

Для этих способов характерны многобрусковая схема осуществления и оригинальная кинематика перемещения инструмента, обеспечивающая либо копирование обрабатываемой поверхности [105, 106, 108], либо ее профилирование [95, 109-120].

Универсальные методы [105-108] позволяют обрабатывать более ограниченную номенклатуру изделий, например, рабочие поверхности только наружных и внутренних колец шариковых роликовых подшипников, что обеспечивает им более узкую область применения.

Классические методы суперфиниширования [26-32 и др.], широко применяемые в подшипниковой и других отраслях промышленности, составляют группу специальных методов. Каждый из этих методов предназначен для обработки деталей одного типа, например, желобов колец шарикоподшипников, и не может быть использован для обработки других деталей.

Традиционно при суперфинишировании заготовки придают вращение, а инструменту — комплекс движений, обусловленный формой профиля обрабатываемой поверхности. Для обработки различных по форме профиля деталей требуется специальное оборудование. Такое разнообразие методов и средств технологического оснащения брусковой доводки, их дифференцируемость при обработке различных поверхностей создают серьезные трудности при разработке гибких технологических процессов, пригодных для использования в интегрированных производственных системах.

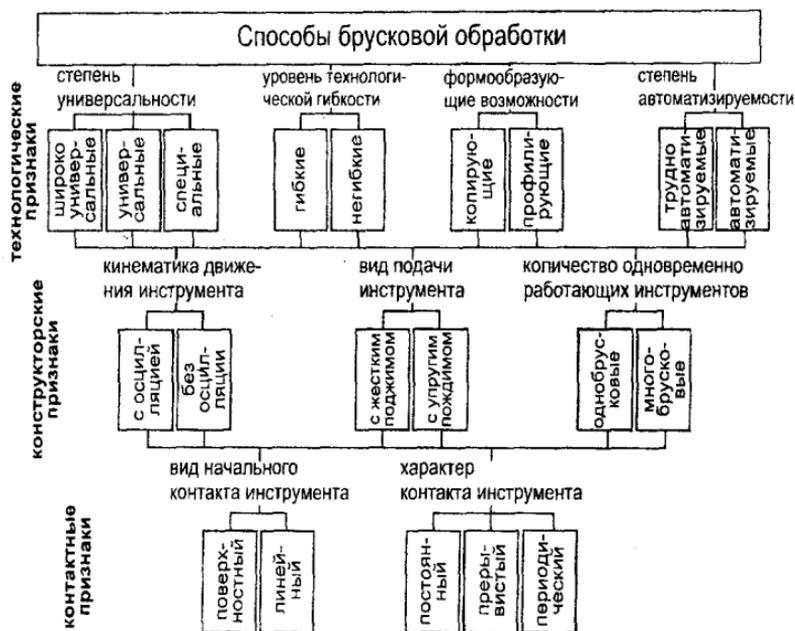


Рис. 1.16. Классификация способов брусковой обработки

По уровню технологической гибкости методы брусковой доводки можно подразделить на гибкие и негибкие. Гибкие методы обработки позволяют при минимальной переналадке и без существенного изменения режимов и инструмента вести доводку деталей различной

конфигурации и размеров. К числу таких методов можно отнести методы многобрусковой обработки [100,101 и др.], разработанные на кафедре "Технология машиностроения" Саратовского государственного технического университета совместно с ОАО СПЗ.

К негибким методам принадлежат методы однобрусковой обработки [30,31,36 и др.], которые плохо поддаются управлению, требуют постоянной подналадки, отличаются низкой стабильностью выходных параметров.

По формообразующим возможностям процессы брусковой обработки подразделяются на копирующие и профилирующие. Копирующие методы, как правило, имеют траекторию главного движения инструмента, повторяющую форму обрабатываемого профиля. У профилирующих методов [109,120] кинематика перемещения инструмента не зависит от формы профиля обрабатываемой поверхности.

Важным технологическим признаком оценки эффективности того или иного способа брусковой доводки является степень его автоматизируемости. К трудно автоматизируемым методам доводки можно отнести классический способ суперфиниширования дорожек качения колец подшипников (см. рис. 1.13).

Сложность автоматизации этого способа обусловлена сложностью наладки, длительностью подбора характеристик инструмента и необходимостью постоянной подналадки по мере износа брусков. Методы многобрусковой доводки лишены этих недостатков [99-104] и относятся к группе автоматизируемых методов. Так, например, для перехода от обработки дорожек качения колец шарикоподшипников к доводке роликовых дорожек достаточно заменить многобрусковую инструментальную головку и продолжить

обработку. Конструкторские признаки представлены кинематикой движения инструмента, видом подачи брусков и их количеством в инструментальной головке.

В подавляющем большинстве известных способов суперфиниширования в качестве главного движения инструмента используется его круговая или прямолинейная осцилляция. Увеличение частоты осцилляции приводит к интенсификации процесса резания, однако работа с повышенными частотами осцилляции способствует возникновению дополнительных вибраций и шума, а это, в свою очередь, оказывает отрицательное влияние на точность формообразования. Поэтому делаются попытки отказаться от осциллирующих движений инструмента и заменить их другими движениями, например - вращательным [97]. Такое направление совершенствования процесса брусковой обработки, на наш взгляд, является перспективным.

Вид подачи брусков на обрабатываемую поверхность в значительной степени определяет эффективность формообразования и производительность обработки. В настоящее время применяют два вида подачи брусков: через жесткие самотормозящиеся кинематические звенья и через упругие звенья. Первая разновидность характерна для многобрусковых методов обработки, вторая - для традиционного суперфиниширования.

По количеству одновременно участвующих в работе брусков все многообразие способов брусковой обработки можно разделить на однобрусковые и многобрусковые. Применение многобрусковой схемы обработки позволяет повысить производительность съема припуска и точность формообразования. Контактные признаки характеризуются видом и характером контакта инструмента с поверхностью заготовки.

По виду начального контакта все методы можно подразделить на две группы: с поверхностным и линейным контактом. По характеру взаимодействия инструмента и детали встречаются методы с постоянным, прерывистым и периодическим контактом.

Постоянный поверхностный контакт характерен для широко известных методов хонингования и суперфиниширования, когда абразивный брусок в течение цикла обработки взаимодействует с обрабатываемой поверхностью всей своей рабочей поверхностью, при этом затруднены условия очистки зоны резания от стружки и шлама, процесс резания носит затухающий характер, съем припуска усредняется на всей рабочей поверхности бруска, обработка трудноуправляема, не стабильна.

При поверхностном или линейном прерывистом контакте бруска с изделием инструмент в течение рабочего хода многократно отрывается от обрабатываемой поверхности, что приводит к улучшению условий очистки режущей поверхности от продуктов резания, повышает эффективность обработки. Отрыв инструмента от обрабатываемой поверхности достигается сообщением ему дополнительных движений. Начальный линейный контакт бруска с изделием позволяет дифференцированно воздействовать на отдельные участки обрабатываемой поверхности, обеспечивая прецизионное формообразование профиля заготовки.

При периодическом контакте инструмента с заготовкой брусок в течение рабочего цикла не выходит из контакта с обрабатываемой поверхностью, однако в каждый последующий момент времени взаимодействует с ней различными участками своей режущей поверхности. Такой характер контакта возникает, например, при перекатывании бруска по обрабатываемому профилю.

Обобщая выполненный анализ, можно сделать выводы:

1. Выпускаемые отечественной промышленностью конструкции подшипников качения не удовлетворяют возросшим требованиям по увеличению их эксплуатационных характеристик. Более прогрессивные конструкции подшипников с повышенной грузоподъемностью и долговечностью не находят практического применения по причине отсутствия надежных способов профилирования их рабочих поверхностей. Существующие технологические процессы доводки дорожек качения не обеспечивают сохранение требуемых параметров даже конструктивно упрощенных профилей, очерченных дугами окружностей или прямыми линиями, что приводит к значительному снижению эксплуатационных показателей подшипников.

2. Для окончательной обработки рабочих поверхностей деталей подшипников наиболее широкое применение в промышленности получил процесс однобрускового суперфиниширования. Обладая рядом достоинств по сравнению с другими методами обработки, данный процесс не лишен и недостатков, основными из которых являются: сложность обеспечения заданной точности обрабатываемой поверхности в продольном и поперечном сечениях, необходимость осуществления процесса в несколько переходов, низкая универсальность, технологическая гибкость, формообразующие возможности, что в значительной степени затрудняет использование суперфиниширования в условиях гибких интегрированных производств.

3. Необходимо дальнейшее совершенствование суперфинишных операций в направлении повышения их технологических возможностей на основе глубоких исследований механизма формообразования обрабатываемых поверхностей.

2. МЕХАНИЗМ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ БРУСКОВОЙ ОБРАБОТКИ

2.1. Взаимодействие инструмента и обрабатываемой поверхности

Рассмотрим общий случай брусковой абразивной обработки, когда с обрабатываемой поверхностью изделия контактирует несколько абразивных брусков. Внешняя сила P , прижимающая каждый брусок к обрабатываемой поверхности, может задаваться постоянной либо возникает под действием перемещения бруска с заданной подачей. В общем виде дифференциальное уравнение брусковой обработки имеет следующий вид:

$$\frac{dt}{dT} = \frac{dq}{dT} + \frac{dv}{dT} + \frac{dy}{dT}, \quad (2.1)$$

где t - величина перемещения каждого бруска в направлении изделия за время T ;

q - толщина слоя металла, снимаемого с поверхности изделия за время T ;

v - величина износа бруска за время T ;

y - величина упругой деформации системы СПИД.

Обычно величины износа инструмента v и съема q металла связаны между собой прямой пропорциональной зависимостью [62,81]:

$$v = \Theta \cdot q, \quad (2.2)$$

где Θ - удельный износ абразивного инструмента [62].

С учетом (2.2) выражение (2.1) примет вид:

$$\frac{dt}{dT} = \frac{dq}{dT} (1 + \Theta) + \frac{dy}{dT}. \quad (2.3)$$

При осуществлении процесса брусковой обработки могут встретиться несколько вариантов:

1. Скорость S_t перемещения брусков постоянна.
2. Постоянная во времени сила P прижима каждого бруска к изделию передается упругими кинематическими звеньями.
3. Постоянная во времени сила P прижима каждого бруска к изделию передается через жесткие самотормозящиеся кинематические звенья.

Дифференциальное уравнение (2.3) для первого варианта обработки примет следующий вид:

$$S_t = \frac{dq}{dT}(1 + \Theta) + \frac{dy}{dT}. \quad (2.4)$$

Такое уравнение (2.4) обычно соответствует процессу шлифования. При брусковой обработке этот вариант на практике используется редко, так как скорость подачи S_t бруска мала, что затрудняет быстрый подвод брусков к обрабатываемой поверхности. Обычно брусковая обработка осуществляется с постоянной силой прижима абразивных брусков к изделию. Так как величина упругой деформации y системы СПИД постоянна во времени, то дифференциальное уравнение (2.3) для этого варианта:

$$\frac{dt}{dT} = \frac{dq}{dT}(1 + \Theta). \quad (2.5)$$

Основное отличие третьего варианта осуществления брусковой обработки от второго состоит в том, что сьем металла во впадинах и на вершинах неровностей поверхности изделия различный. Во впадинах он меньше и не зависит от жесткости системы СПИД. На вершинах неровностей сьем больше и зависит от жесткости системы СПИД. Поэтому для каждого произвольного поперечного сечения поверхности изделия дифференциальное уравнение (2.3) можно представить в виде:

$$\frac{dt}{dT} = \frac{dq_{bn}}{dT} (1 + \Theta), \quad (2.6)$$

где q_{bn} - съем металла в наиболее глубокой впадине неровностей.

В связи с тем, что первый из указанных вариантов осуществления брусковой обработки имеет на практике ограниченное применение, рассмотрим второй вариант. Задача состоит в том, чтобы выразить скорость съема металла через силу прижима бруска к изделию и условия осуществления процесса обработки. Известно [49], что сила прижима бруска к поверхности изделия уравнивается как силой резания, так и силой упругой деформации бруска с изделием:

$$P = P_{рез} + P_{ск}, \quad (2.7)$$

где $P_{рез}$ - нормальная сила взаимодействия режущих абразивных зерен бруска с обрабатываемой поверхностью;

$P_{ск}$ - нормальная сила давления продуктов износа, находящихся в порах бруска, на обрабатываемую поверхность изделия.

Определим величину силы $P_{рез}$. Известно [76], что нормальная сила резания P_i единичным зерном определяется равенством:

$$P_i = 11.8\tau_{сдв} \cdot a_i^2 \frac{(1 + \xi)^3}{\xi}, \quad (2.8)$$

где $\tau_{сдв}$ - величина касательных напряжений вдоль условной плоскости сдвига материала изделия;

a_i - глубина внедрения зерна в обрабатываемую поверхность;

ξ - коэффициент усадки стружки.

Глубина внедрения зерна a_i в обрабатываемую поверхность зависит от его положения на рабочей поверхности инструмента и шероховатости поверхности в зоне обработки. Если расположение наиболее выступающих над связкой абразивных зерен описать степенной зависимостью [41]:

$$z_i = 0.5z_0 \left(\frac{h_i}{H_0} \right)^k, \quad (2.9)$$

а глубину внедрения абразивного зерна в обрабатываемую поверхность выражением:

$$a_i = R_{\max} - h_i, \quad (2.10)$$

то нормальная сила резания единичным зерном:

$$P_i = 11.8\tau_{\text{сдв}} \frac{(1+\xi)^3}{\xi} R_{\max}^2 \left[1 - \left(\frac{z_i}{0.5z_0} \right)^{\frac{1}{k}} \frac{H_0}{R_{\max}} \right]^2, \quad (2.11)$$

где z_i - число зерен на единице рабочей поверхности инструмента, расположенных на расстоянии h_i , отсчитываемом от вершины наиболее выступающего над связкой зерна;

z_0 - общее число выступающих над связкой зерен на единице рабочей поверхности инструмента;

k - показатель степени расположения абразивных зерен на рабочей поверхности инструмента;

R_{\max} - максимальная высота микронеровностей обрабатываемой поверхности;

H_0 - расстояние вершин наиболее выступающих над связкой зерен до центра группирования вершин зерен в направлении нормали к рабочей поверхности инструмента.

На основе выражения (2.11) несложно определить общую силу резания:

$$P_{\text{рез}} = \sum_{i=1}^{z_0} P_i = 11.8\tau_{\text{сдв}} BL\eta \frac{(1+\xi)^3}{\xi} R_{\max}^2 \sum_{i=1}^{z_0} \left[1 - \left(\frac{z_i}{0.5z_0} \right)^{\frac{1}{k}} \frac{H_0}{R_{\max}} \right]^2, \quad (2.12)$$

где z_s - общее число режущих абразивных зерен на единице площади контакта бруска с изделием;

B - ширина площадки контакта бруска с изделием;

L - длина площадки контакта бруска с изделием в направлении вращения изделия;

η - относительная опорная площадь исходной обрабатываемой поверхности изделия на уровне взаимодействия с ней абразивных зерен.

С учетом выражения (2.9) несложно определить

$$z_s = 0.5z_0 \left(\frac{R_{\max}}{H_0} \right)^k. \quad (2.13)$$

При большом числе зерен z_s от суммирования в правой части равенства (2.12) можно перейти к интегрированию:

$$P_{\text{рез}} = 11.8 \tau_{\text{сдв}} B L \eta \frac{(1+\xi)^3}{\xi} R_{\max}^2 \int_0^{z_s} \left[1 - \left(\frac{z_i}{0.5z_0} \right)^{\frac{1}{k}} \frac{H_0}{R_{\max}} \right] dz_i. \quad (2.14)$$

Обозначим

$$x = \left(\frac{z_i}{0.5z_0} \right)^{\frac{1}{k}} \frac{H_0}{R_{\max}}.$$

С учетом выражения (2.13)

$$x = \left(\frac{z_i}{z_s} \right)^{\frac{1}{k}}, \quad (2.15)$$

тогда

$$z_i = z_s \cdot x^k, \quad dz_i = k \cdot z_s \cdot x^{k-1} \cdot dx.$$

Преобразуем выражение (2.14), используя обозначение (2.15):

$$P_{\text{рез}} = 11.8 \tau_{\text{сдв}} B L \eta \frac{(1+\xi)^3}{\xi} R_{\max}^2 \int_0^1 x^{k-1} (1-x)^2 dx. \quad (2.16)$$

Интеграл в правой части равенства (2.16) представляет собой интеграл Эйлера, который выражается через гамма-функцию:

$$\int_0^1 x^{k-1}(1-x)^2 dx = \frac{\Gamma(K) \cdot \Gamma(3)}{\Gamma(K+3)} = \frac{2}{K(K+1)(K+2)},$$

отсюда

$$P_{рез} = 23.6 \tau_{сдв} BL \eta \frac{(1+\xi)^3 z_s R_{max}^2}{\xi(K+1)(K+2)}.$$

Так как z_s определяется равенством (2.13), то

$$P_{рез} = 11.8 \tau_{сдв} BL \eta \frac{(1+\xi)^3 z_0 R_{max}^{K+2}}{\xi H_0^K (K+1)(K+2)}. \quad (2.17)$$

Известно [41], что

$$z_0 = \frac{1.53}{\alpha_0^2} \sqrt[3]{\frac{\gamma_u^2}{\gamma_3^2}}, \quad (2.18)$$

где γ_u, γ_3 - удельные веса инструмента и материала абразивных зерен соответственно;

d_0 - средний размер абразивных зерен бруска.

Величина γ_u зависит от структуры и твердости абразивного инструмента [126].

С учетом равенства (2.18) выражение (2.17) примет вид:

$$P_{рез} = 18.1 \tau_{сдв} BL \eta \frac{(1+\xi)^3 R_{max}^{K+2}}{\xi d_0^2 (K+1)(K+2) H_0^K} \sqrt[3]{\frac{\gamma_u^2}{\gamma_3^2}}. \quad (2.19)$$

Объем стружки dW_i , снимаемый абразивным зерном за время dT , равен:

$$dW_i = F_i \cdot V_p \cdot \eta dT, \quad (2.20)$$

где dW_i - объем стружки, снимаемый единичным зерном;

V_p - скорость резания.

В работе [41] показано, что профиль режущей части абразивного зерна описывается параболической зависимостью, при этом ширина b_{ik} и глубина a_i процарапанной им канавки связаны соотношением:

$$b_{ik} = 3.8 \cdot a_i. \quad (2.21)$$

Площадь среза единичным зерном [76] равна:

$$F_i = \frac{1}{3} a_i \cdot b_{ik}$$

или с учетом выражения (2.21):

$$F_i = 1.27 \cdot a_i^2. \quad (2.22)$$

Подставляя выражение (2.22) в равенство (2.20), получим:

$$dW_i = 1.27 \cdot a_i^2 \cdot V_p \cdot \eta dT. \quad (2.23)$$

Используя равенства (2.9) и (2.10), преобразуем выражение (2.23):

$$dW_i = 1.27 V_p \eta R_{\max}^2 \left[1 - \left(\frac{z_i}{0.5z_0} \right)^{\frac{1}{k}} \frac{H_0}{R_{\max}} \right] dT. \quad (2.24)$$

На основе равенства (2.24) определим объем металла dW , снимаемого абразивными зернами бруска за время dT :

$$dW = 1.27 V_p B L \eta R_{\max}^2 \sum_{i=1}^{z_s} \left[1 - \left(\frac{z_i}{0.5z_0} \right)^{\frac{1}{k}} \frac{H_0}{R_{\max}} \right] dT. \quad (2.25)$$

Значение суммы в правой части равенства (2.25) равно значению суммы в правой части равенства (2.12), поэтому:

$$dW = 2.54 V_p B L \eta R_{\max}^2 \frac{z_s dT}{(K+1)(K+2)}.$$

Раскрывая значение z_s в выражении (2.13), используя равенство (2.18), найдем:

$$dW = 1.94 V_p B L \eta \frac{R_{\max}^{K+2}}{(K+1)(K+2) H_0^k d_0^2} \sqrt[3]{\frac{\gamma_u^2}{\gamma_3^2}} dT. \quad (2.26)$$

Решая совместно равенства (2.19) и (2.26), выразим величину dW через силу $P_{рез}$:

$$dW = 0.107 \frac{\xi P_{рез} V_p}{(1 + \xi)^3 \tau_{сдв}} dT. \quad (2.27)$$

Определив из выражения (2.7) силу резания $P_{рез}$ и подставив ее значение в равенство (2.27), найдем:

$$dW = 0.107 \frac{\xi P V_p}{(1 + \xi)^3 \tau_{сдв}} \left(1 - \frac{P_{ск}}{P} \right) dT. \quad (2.28)$$

Скорость резания представляет собой геометрическую сумму окружной скорости изделия V_u и скорости осцилляции V_6 бруска:

$$\bar{V}_p = \bar{V}_u + V_6. \quad (2.29)$$

Обычно вектор скорости осцилляции бруска направлен перпендикулярно вектору окружной скорости изделия:

$$V_p = \sqrt{V_u^2 + V_3^2}. \quad (2.30)$$

Если модуль скорости осцилляции инструмента изменяется по синусоидальному закону, то ее среднее значение равно:

$$\left| V_6 \right|_{cp} = 4A \cdot n_6, \quad (2.31)$$

где A - амплитуда осцилляции бруска;

n_6 - частота осцилляции бруска.

Прогрессивные способы суперфиниширования [39,49,62-67], главным образом, направлены на обеспечение постоянной очистки рабочей поверхности бруска от стружки, шлама, затупившихся зерен. Поэтому сила скольжения $P_{ск}$ в этом случае мала, а съем металла, как следует из выражения (2.28), прямо пропорционален силе прижима бруска P . Если условия для очистки бруска от стружки и шлама отсутствуют, то по мере снятия припуска рабочая поверхность заполняется стружкой и шламом [49], сила скольжения $P_{ск}$

увеличивается и, как следует из выражения (2.28), съем металла не будет прямо пропорционален силе P .

Обозначим:

$$C = 1 - \frac{P_{ск}}{P} \quad (2.32)$$

Коэффициент C характеризует режущую способность бруска. При $C=1$ брусок обладает максимальными режущими свойствами, при $C<1$ режущая способность бруска снижается за счет засаливания его рабочей поверхности.

Выражение (2.28) характеризует съем металла за время $d\Gamma$ при постоянных условиях обработки. В реальных процессах условия обработки могут изменяться. В частности, уменьшается относительная площадь опорной поверхности η , так как постепенно уменьшаются неровности обрабатываемой поверхности, при этом может возрастать степень засаленности рабочей поверхности бруска. На основе экспериментальных данных ряда авторов [70, 127, 128] и результатов экспериментальных исследований данной работы зависимость съема металла от времени обработки при непрерывном контакте бруска с обрабатываемой поверхностью изделия можно выразить в общем виде следующей зависимостью:

$$C = e^{-b\Gamma} \quad (2.33)$$

где Γ - время от начала контакта бруска с изделием;

b - показатель степени.

На основе равенств (2.32) и (2.33) запишем выражение (2.28) в следующем виде:

$$dW = 0.107 \frac{\xi P V_p}{(1 + \xi)^3 \tau_{сдв}} e^{-b\Gamma} d\Gamma \quad (2.34)$$

Проинтегрировав выражение (2.34) по времени Γ , получим объем $W_{тк}$ металла, снимаемого с обрабатываемой поверхности за время непрерывного контакта T_k бруска с изделием:

$$\begin{aligned}
 W_{T_k} &= 0.107 \frac{\xi P V_p}{(1+\xi)^3 \tau_{сдв}} \int_0^{T_k} e^{-bT} dT = \\
 &= 0.107 \frac{\xi P V_p}{(1+\xi)^3 \tau_{сдв} B} (1 - e^{-bT_k}).
 \end{aligned}
 \tag{2.35}$$

Время непрерывного контакта бруска с изделием:

$$T_k = \frac{m_0}{n_u},
 \tag{2.36}$$

где m_0 - количество оборотов изделия за время T_k ;

n_u - частота вращения изделия.

Постоянная очистка бруска от стружки и шлама достигается за счет прерывистого контакта бруска с изделием. При этом абразивный брусок в процессе обработки периодически подводится к обрабатываемой поверхности, взаимодействует с ней в течение времени T_k и отводится от нее. Стружка и шлам вымываются с поверхности бруска, и очищенный брусок снова подводится к обрабатываемой поверхности. Так повторяется многократно, в результате чего брусок сохраняет высокую режущую способность [32,127,130,131].

Если время каждого непрерывного контакта T_k постоянно, то, как следует из выражения (2.35), и объем удаленного металла за это время является постоянной величиной. В таком случае за число непрерывных контактов λ_k объем удаленного металла будет равен:

$$W_{\lambda_k} = 0.107 \frac{\xi P V_p \lambda_k}{(1+\xi)^3 \tau_{сдв} B} (1 - e^{-bT_k}).
 \tag{2.37}$$

С другой стороны, объем удаленного металла зависит от микро- и макронеровностей исходной поверхности изделия и толщины снятого металла. Обозначим плотность распределения ординат неровностей обрабатываемой поверхности изделия $f(h)$ (рис.2.1). Тогда относительная опорная площадь поверхности на уровне X от средней плоскости (рис.2.1а) можно определить из выражения:

$$\eta = \int_x^{\infty} f(h) dh .$$

(2.38)



Рис. 2.1. Профиль обрабатываемой поверхности (а) и плотность распределения ординат неровностей (б)

На рисунке 2.2 представлена зависимость относительной опорной площадки обрабатываемой поверхности от расстояния до средней плоскости неровностей.

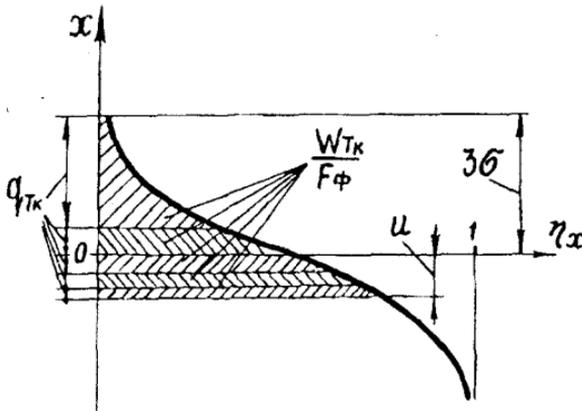


Рис.2.2. Опорная кривая обрабатываемой поверхности

Показан также съем металла $q_{Тк}$ за время каждого непрерывного контакта бруска с изделием и объем металла $W_{Тк}$, снимаемого за один оборот изделия с фактической площади $F_{ф}$ контакта бруска с изделием. Сумма всех этих объемов $W_{Тк}$ равна объему металла, снимаемого с поверхности изделия за число контактов λ_k :

$$W_{\lambda_k} = \pi D_u B \int_u^{\infty} \eta_x dx = \pi D_u B \int_u^{\infty} \int_x^{\infty} f(h) dh dx, \quad (2.39)$$

где u - расстояние плоскости резания бруска от средней плоскости неровностей.

Распределение ординат неровностей обрабатываемой поверхности (рис.2.1б) подчиняется закону нормального распределения [131]:

$$f(h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{h^2}{2\sigma^2}},$$

тогда

$$W_{\lambda_k} = \frac{\pi D_u B}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_u^{\infty} \int_x^{\infty} e^{-\frac{h^2}{2\sigma^2}} dh dx, \quad (2.40)$$

где σ - среднее квадратическое отклонение ординат неровностей обрабатываемой поверхности.

Решение уравнения (2.40) дано в работе [131]:

$$W_{\lambda_k} = \pi D_u B \sigma \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u^2}{2\sigma^2}} - \frac{u}{\sigma} \left[1 - \Phi\left(\frac{u}{\sigma}\right) \right] \right\}, \quad (2.41)$$

где $\Phi\left(\frac{u}{\sigma}\right)$ - функция Лапласа.

Приравняв правые части выражений (2.37) и (2.41), получим:

$$\begin{aligned} W_{\lambda_k} &= \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(3\sigma - q_{\lambda})^2}{2\sigma^2}} - \frac{3\sigma - q_{\lambda}}{\sigma} \left[1 - \Phi\left(\frac{3\sigma - q_{\lambda}}{\sigma}\right) \right] \right\} \pi D_u B \sigma = \\ &= 0.107 \frac{\xi P \lambda_k V_p}{(1 - \xi)^3 \tau_{сдв} b} (1 - e^{-b\tau_k}). \end{aligned} \quad (2.42)$$

Если за начало отсчета съема металла с поверхности изделия принять расстояние, равное 3σ от средней плоскости (рис.2.2), то накопленный съем металла q_λ за число непрерывных контактов λ_k бруска с изделием равен:

$$q_\lambda = 3\sigma - U,$$

тогда из выражения (2.42):

$$J(U = 3\sigma - q_\lambda) = 0.107 \frac{\xi P \lambda_k (1 - e^{-bT_k}) V_p}{(1 + \xi)^3 \tau_{сдв} b V \sigma \pi D_u}, \quad (2.43)$$

где

$$J(U = 3\sigma - q_\lambda) = \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(3\sigma - q_\lambda)^2}{2\sigma^2}} - \frac{3\sigma - q_\lambda}{\sigma} \left[1 - \Phi\left(\frac{3\sigma - q_\lambda}{\sigma}\right) \right] \right\}. \quad (2.44)$$

Значения интеграла (2.44) представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Зависимость $J(3\sigma - q_\lambda)$ от q_λ/σ

| q_λ/σ | 0 | 1.0 | 2.0 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $J(3\sigma - q_\lambda)$ | $5.3 \cdot 10^{-4}$ | $8.3 \cdot 10^{-3}$ | $8.3 \cdot 10^{-2}$ | $3.9 \cdot 10^{-1}$ | $10.83 \cdot 10^{-1}$ | $20.08 \cdot 10^{-1}$ | $30.05 \cdot 10^{-1}$ |

Используя таблицу 2.1, несложно подобрать соответствующее аппроксимирующее выражение:

$$J(3\sigma - q_\lambda) = 0.015 \left(\frac{q_\lambda}{\sigma} \right)^3. \quad (2.45)$$

На рисунке 2.3 представлены теоретическая и аппроксимирующая зависимости $J(3\sigma - q_\lambda)$ от q_λ/σ .

Погрешность аппроксимации не превышает 10%, что вполне допустимо для инженерных расчетов. Используя полученную аппроксимацию и подставляя ее выражение в равенство (2.44), после несложных преобразований имеем:

$$q_{\lambda} = 1.92\sigma^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt[3]{\frac{\xi P \lambda_k V_p}{(1+\xi)^3 \tau_{сдв} b V \pi D_u}} \left(1 - e^{-bT_k}\right).$$

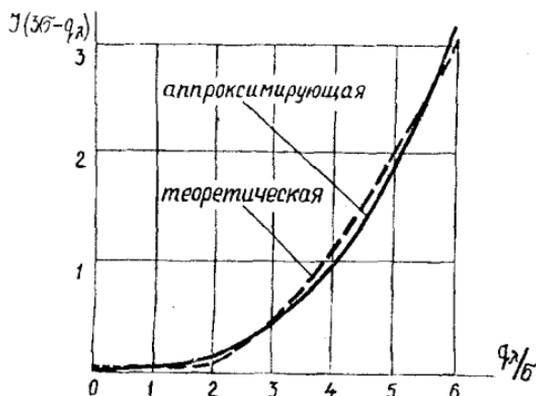


Рис. 2.3. График зависимости

Если в работе участвуют одновременно z_{σ} брусков, то съем металла равен:

$$q_{\lambda} = 1.92\sigma^{\frac{2}{3}} z_{\sigma} \cdot \sqrt[3]{\frac{\xi P \lambda_k V_p}{(1+\xi)^3 \tau_{сдв} b V \pi D_u}} \left(1 - e^{-bT_k}\right). \quad (2.46)$$

Особый интерес выражение (2.46) представляет с точки зрения обоснования рациональной схемы осуществления процесса суперфиниширования. Если суперфиниширование осуществляется без отрыва бруска от обрабатываемой поверхности, то при $\lambda_k=1$:

$$q_{\lambda} = 1.92\sigma^{\frac{2}{3}} z_{\sigma} \cdot \sqrt[3]{\frac{\xi P V_p}{(1+\xi)^3 \tau_{сдв} b V \pi D_u}} \left(1 - e^{-bT_k}\right). \quad (2.47)$$

Как видно из выражения (2.47), величина накопленного съема металла не прямо пропорционально зависит от времени T_k , и с увеличением этого времени интенсивность съема металла уменьшается. Если же время единичного контакта бруска с изделием T_k мало, а число

таких контактов велико, и при этом λ_k прямо пропорционально общему времени обработки $\lambda_k = T_{об} \cdot n_{\sigma}$, то, раскладывая выражение в скобках равенства (2.46) в ряд и ограничиваясь тремя первыми членами ряда, получим:

$$q_{\lambda} = 1.92 \sigma^3 z_{\sigma}^3 \sqrt[3]{\frac{\xi P T_{об} n_{\sigma} V_p T_k (1 - 0.5b T_k)}{(1 + \xi)^3 \tau_{св} V \pi D_u}}, \quad (2.48)$$

где $T_{об}$ - общее время обработки;

n_{σ} - частота осцилляции брусков.

Из равенства (2.48) видно: в данном случае накопленный съем металла в большей степени зависит от общего времени обработки. Следовательно, схема осуществления процесса суперфиниширования с прерывистым контактом бруска является более рациональной по сравнению с тем, когда брусок постоянно взаимодействует с обрабатываемой поверхностью.

Чаще всего суперфиниширование или хонингование используют в качестве окончательной операции при обработке ответственных поверхностей высокоточных деталей, главным образом, с целью уменьшения шероховатости обработанной поверхности [149,151-154].

При этом стремятся создать такие условия обработки, при которых обеспечивается повышенная производительность съема припуска и минимальное искажение обработанного профиля. Однако при обработке традиционными способами суперфиниширования с увеличением интенсивности съема припуска увеличивается вероятность искажения геометрической формы профиля обрабатываемой поверхности. Это противоречие можно устранить, если в процессе брусковой обработки обеспечить периодическое, целенаправленное взаимодействие участков рабочей поверхности инструмента с участками обрабатываемой поверхности, т.е. перемещать брусок таким образом, чтобы в течение периода обработки он контактировал с заготовкой не всей своей рабочей поверхностью одновременно, а

последовательно каждой ее точкой, когда каждый последующий участок рабочей поверхности бруска входит в контакт с заготовкой после того, как предыдущий ее участок выйдет из контакта.

Изменяя скорость перемещения бруска и силу его взаимодействия с обрабатываемой поверхностью заготовки на различных участках ее профиля, можно управлять величиной снимаемого припуска на этих участках, а значит формировать заданную геометрическую форму обрабатываемого профиля, исправляя погрешности заготовки.

Рассмотрим наиболее общий случай (рис.2.4).

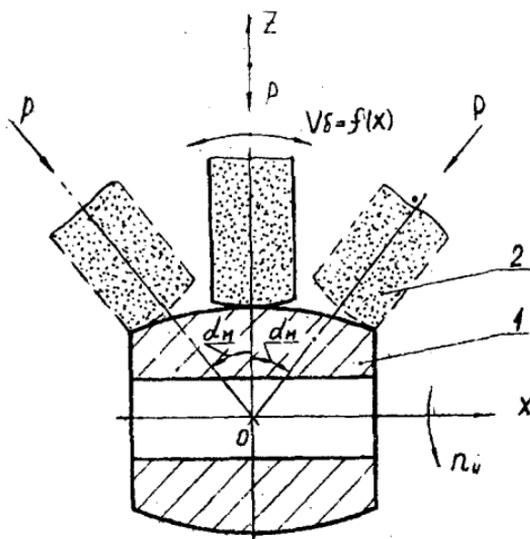


Рис.2.4. Обобщенная схема профилирующего суперфиниширования

Пусть обработка наружной поверхности вращения ведется одним или несколькими абразивными брусками 1, расположенными вокруг этой поверхности и перемещающимися возвратно-поступательно вдоль ее профиля с переменной скоростью $V_б$ и постоянной силой прижима P . Бруски перемещаются таким образом, что угол α_M их контакта с обрабатываемой поверхностью меняется от

0 — в центре профиля, до максимального значения - в его краевых зонах. При этом заготовка 2 совершает вращательное движение с частотой n_u .

Найдем съем металла с поверхности заготовки в ее поперечном сечении, проходящем через произвольную точку М (рис.2.5).

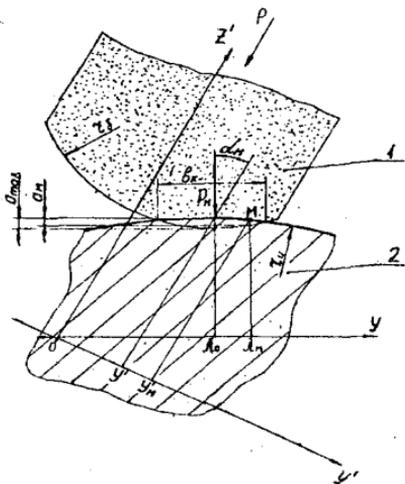


Рис.2.5. Схема для расчета снимаемого припуска

Элементарный объем металла dV_3 , удаляемый единичным абразивным зерном, закрепленным на поверхности абразивного бруска и контактирующим с обрабатываемой поверхностью на участке dy , равен:

$$dV_3 = S_3 \sqrt{dy^2 + dx^2}, \quad (2.49)$$

где dx - проекция на дугу окружности обрабатываемой поверхности длины царапины от абразивного зерна при его перемещении в осевом направлении заготовки на величину dy ;
 S_3 - площадь поперечного сечения царапины.

Из работы [76] имеем:
$$S_3 = 2.53a^2, \quad (2.50)$$

где a - глубина царапины.

Несложно определить:
$$dx = \frac{V_u}{V_6} dy \quad (2.51)$$

Подставляя выражения (2.50) и (2.51) в равенство (2.49), найдем:

$$dV_3 = 2.53a^2 \sqrt{1 + \frac{V_u^2}{V_6^2}} dy \quad (2.52)$$

Глубина контакта зерна в т. М (см. рис.2.5) может находиться в пределах от 0 до a_M . Если через h_i обозначить расстояние вершины этого зерна от наружной поверхности бруска, то

$$a = a_M - h_i \quad (2.53)$$

В работе [76] показана функция распределения вершин абразивных зерен по нормали к рабочей поверхности абразивного инструмента:

$$z_i = 0.5z_0 \left(\frac{h_i}{H_0} \right)^k F, \quad \text{при } h_i \leq H_0, \quad (2.54)$$

где z_i - число вершин зерен, расположенных на расстоянии h_i от наружной поверхности бруска на площадке F .

Из выражения (2.54) можно определить плотность распределения вершин зерен:

$$f(h_i) = \left(\frac{z_i}{z_0 F} \right)' = 0.5k \frac{h_i^{k-1}}{H_0^k} \quad (2.55)$$

Используя равенства (2.52), (2.53) и (2.55), несложно определить плотность распределения объема металла $f(dV_3)$, срезаемого абразивным зерном, находящимся в т. М:

$$f(dV_3) = f[\Psi(dV_3)] \cdot |\Psi'(dV_3)|, \quad (2.56)$$

где $\Psi(dV_3)$ - функция, обратная по отношению к $\Psi(a)$:

$$\Psi(dV_3) = a_M - \sqrt{\frac{dV_3}{2.53dy} \frac{V_6}{\sqrt{V_6^2 + V_u^2}}} \quad (2.57)$$

Тогда

$$\Psi'(dV_3) = -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{V_6}{2.53dydV_3\sqrt{V_6^2 + V_u^2}}}$$

Используя это выражение, а также выражения (2.55), (2.56) и (2.57), найдем:

$$f(dV_3) = \frac{1}{4} \frac{k}{H_0^k} (a_M - \sqrt{cdV_3})^{k-1} \sqrt{\frac{c}{dV_3}}, \quad (2.58)$$

где

$$C = \frac{V_6}{2.53dy\sqrt{V_6^2 + V_u^2}}. \quad (2.59)$$

Математическое ожидание объема металла, срезаемого одним абразивным зерном при его перемещении через т. М на величину dy вдоль оси заготовки:

$$\begin{aligned} dV_{3.M} &= \frac{\int_0^{\frac{a_M^2}{c}} dV_3 f(dV_3) ddV_3}{\int_0^{\frac{a_M^2}{c}} f(dV_3) ddV_3} = \\ &= \frac{\int_0^{\frac{a_M^2}{c}} \left(1 - \frac{\sqrt{cdV_3}}{a_M}\right)^{k-1} \sqrt{cdV_3} ddV_3}{\int_0^{\frac{a_M^2}{c}} \left(1 - \frac{\sqrt{cdV_3}}{a_M}\right)^{k-1} \sqrt{\frac{c}{dV_3}} ddV_3}. \end{aligned} \quad (2.60)$$

Обозначим

$$\frac{\sqrt{cdV_3}}{a_M} = u, \quad dV_3 = \frac{a_M^2}{c} u^2,$$

тогда

$$ddV_3 = \frac{2a_M^2}{c} u du. \quad (2.61)$$

Преобразуем выражение (2.60), используя обозначение (2.61):

$$dV_{з.м.} = \frac{a_M^2}{c} \frac{\int_0^1 u^2(1-u)^{k-1} du}{\int_0^1 (1-u)^{k-1} du}. \quad (2.62)$$

Интегралы в уравнении (2.62) представляют собой интегралы Эйлера, которые выражаются через гамма-функцию:

$$\int_0^1 u^2(1-u)^{k-1} du = \frac{\Gamma(3) \cdot \Gamma(K)}{\Gamma(K+3)} = \frac{2}{(K+2)(K+1)K};$$

$$\int_0^1 (1-u)^{k-1} du = \frac{\Gamma(K)}{\Gamma(K+1)} = \frac{1}{K}.$$

Подставляя эти значения интегралов в равенство (2.62) и раскрывая значение С, используя выражение (2.59), получим:

$$dV_{з.м.} = \frac{5.06}{(K+1)(K+2)} a_M^2 \sqrt{1 + \frac{V_u^2}{V_6^2}} dy. \quad (2.63)$$

Просуммируем объемы металла, срезаемые всеми зернами, прошедшими через точку М и расположенными на полоске $d\lambda$ длиной B_k , равной ширине бруска. Используя выражение (2.54), найдем:

$$dV'_{з.м.} = dV_{з.м.} B_k 0.5z_0 \left(\frac{a_M}{H_0} \right)^k d\lambda. \quad (2.64)$$

Интегрируя равенство (2.64) по $d\lambda$, получим объем металла, снимаемого всеми режущими зернами площадки контакта бруска при перемещении его через т. М на величину dy :

$$V_M = B_k 0.5z_0 \frac{1}{H_0^k} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} dV_{з.м.} a_M^k d\lambda. \quad (2.65)$$

При этом, так как скорость перемещения бруска значительно меньше скорости вращения заготовки, то за один ее оборот брусок обработает поверхность площадью

$$dS_{\text{об}} = 2\pi r_y dy ,$$

где r_y - радиус заготовки в месте расположения т.М.

Но за время контакта τ_k рабочей поверхности бруска с т. М заготовка может сделать не один полный оборот, а лишь его часть, поэтому площадь обрабатываемой поверхности $dS_{\text{об}}$, подвергшейся воздействию со стороны бруска, будет равна:

$$dS_{\text{об}} = 2\pi r_y d n_u \tau_k . \quad (2.66)$$

Разделив выражение (2.65) на равенство (2.66), получим величину слоя металла t_M , снимаемого в т. М за один контакт заготовки с абразивным бруском:

$$t_M = \frac{B_k 0.5z_0}{H_0^k 2\pi r_y d n_u \tau_k} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} dV_{\text{з.м.}} a_M^k d\lambda . \quad (2.67)$$

При обработке несколькими абразивными брусками, расположенными вокруг обрабатываемой поверхности, съем металла в рассматриваемом сечении за произвольное время τ будет равен:

$$t = t_M \cdot Z_6 \cdot n_6 \cdot \tau , \quad (2.68)$$

где Z_6 - количество одновременно работающих абразивных брусков;
 n_6 - частота перемещения абразивных брусков вдоль обрабатываемого профиля.

Раскрывая значения t_M (2.67) и $dV_{\text{з.м.}}$ (2.63), получим:

$$t = \frac{1.265}{\pi(k+1)(k+2)} \frac{B_k z_0 Z_6 n_6 \tau}{H_0^k r_y n_u \tau_k} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} a_M^{k+2} \sqrt{1 + \frac{V_u^2}{V_6^2}} d\lambda . \quad (2.69)$$

Из рис.2.5

$$a_M = a_{\max} - \frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{2r_6} \left(1 + \frac{r_6}{r_u} \right), \quad (2.70)$$

где λ_0, λ - соответственно координаты центра площадки контакта и точки контакта вдоль ее плоскости.

Величина a_{\max} и размер площадки контакта b_k (см. рис.2.5) зависят от силы прижима бруска к обрабатываемой поверхности.

Абразивное зерно, находящееся на расстоянии h_i от наружной поверхности бруска, может занять произвольное положение вдоль дуги контакта, от чего и глубина его внедрения в поверхность будет различна. Несложно показать, что математическое ожидание глубины врезания этого зерна в поверхность обработки будет равна:

$$a = \frac{1}{k+1} a_M. \quad (2.71)$$

С учетом выражений (2.8), (2.54) и (2.71) элементарная сила резания от зерен, находящихся на площадке $B_k d\lambda$:

$$P_{н.з.} dz_i = 11.8 \tau_{сдв} \frac{(1+\xi)^3}{\xi} \frac{0.5 z_0 B_k k_3}{H_0^k (k+1)^2} a_M^{k+2} d\lambda, \quad (2.72)$$

где k_3 - коэффициент засаливания бруска.

На основе экспериментальных данных ряда авторов [70,127,128] и результатов экспериментальных исследований данной работы коэффициент засаливания бруска можно выразить в общем виде следующей зависимостью:

$$K_3 = \frac{1}{e^{-\tau k}}.$$

В рассматриваемом процессе суперфиниширования рациональная кинематика перемещения инструмента обеспечивает ему повышенную режущую способность. Условия контакта брусков с изделием способствуют эффективной очистке режущей поверхности от

продуктов резания. Учитывая это и то, что время единичного контакта τ_k будет мало для всего диапазона условий обработки подшипников качения, в дальнейших расчетах будем принимать $K_3=1$. Используя выражение (2.70) и интегрируя равенство (2.72), найдем нормальную силу резания:

$$P_H = 11.8 \tau_{сдв} \frac{(1+\xi)^3}{\xi} \frac{z_0 B_k k_3}{H_0^k (k+1)^2} a_{\max}^{k+2} \times \int_0^{\frac{bk}{2}} \left[1 - \frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{2a_{\max} r_6} \left(1 + \frac{r_6}{r_u} \right) \right]^{k+2} d\lambda, \quad (2.73)$$

где b_k - размер площадки контакта в направлении оси вращения заготовки.

Обозначим

$$\frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{2a_{\max} r_6} \left(1 + \frac{r_6}{r_u} \right) = u, \quad \text{откуда } \lambda = \lambda_0 + \sqrt{\frac{2a_{\max} r_6 u}{1 + \frac{r_6}{r_u}}};$$

$$d\lambda = \sqrt{\frac{a_{\max} r_6}{2u \left(1 + \frac{r_6}{r_u} \right)}} du.$$

Тогда

$$P_H = 11.8 \tau_{сдв} \frac{(1+\xi)^3}{\xi} \frac{z_0 B_k k_3}{H_0^k (k+1)^2} \times \sqrt{\frac{r_6}{2 \left(1 + \frac{r_6}{r_u} \right)}} a_{\max}^{k+2.5} \int_0^1 u^{-0.5} (1-u)^{k+2} du. \quad (2.74)$$

Определив подобно (2.69) значение интеграла в правой части равенства (2.74), получим:

$$P_H = 8.34 \frac{(1 + \xi)^3}{\xi} \tau_{сдв} \times \frac{\Gamma(K+3)z_0 B_k k_3}{\Gamma(K+3.5)(K+1)^2 H_0^k} \sqrt{\frac{r_6 \pi}{\left(1 + \frac{r_6}{r_u}\right)}} a_{\max}^{k+2.5} \quad (2.75)$$

Нормальная сила резания P_H выражается через силу P прижима бруска к обрабатываемой поверхности равенством:

$$P_H = \frac{P}{\cos \alpha_M}, \quad (2.76)$$

где α_M - угол между нормалью к контактирующим поверхностям в начальной точке контакта и направлением действия силы прижима P .

Подставляя равенство (2.76) в выражение (2.75) и решая его относительно a_{\max} , найдем:

$$a_{\max} = \left(0.12 \frac{\xi}{(1 + \xi)^3 \tau_{сдв}} \frac{\Gamma(K+3.5)(K+1)^2 H_0^k}{\Gamma(K+3)z_0 B_k k_3} \right)^{\frac{1}{k+2.5}} \times \left(\frac{\sqrt{1 + \frac{r_6}{r_u}}}{r_6 \pi} \frac{P}{\cos \alpha_M} \right)^{\frac{1}{k+2.5}} \quad (2.77)$$

Равенства (2.69), (2.70) и (2.77) позволяют получить выражение для расчета снимаемого припуска:

$$t = \frac{1.265}{\pi(k+1)(k+2)} \frac{B_k z_0 z_6 n_6 \tau}{H_0^k r_y n_u \tau_k} a_{\max}^{k+2} \sqrt{1 + \frac{V_u^2}{V_6^2}} \times \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \left[1 - \frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{2r_6 a_{\max}} \left(1 + \frac{r_6}{r_u} \right) \right]^{k+2} d\lambda \quad (2.78)$$

В выражении (2.78)

$$\lambda_{\max} = \lambda_0 + \sqrt{2 \frac{r_6}{1 + \frac{r_6}{r_u}} a_{\max}} ;$$

$$\lambda_{\min} = \lambda_0 - \sqrt{2 \frac{r_6}{1 + \frac{r_6}{r_u}} a_{\max}} .$$

Воспользовавшись обозначением, принятым в равенстве (2.73), и учитывая симметричность площадки контакта, преобразуем выражение (2.78):

$$t = \frac{0.3\Gamma(k+3.5)(k+1)\xi z_6 n_6 \tau P \sqrt{1 + \frac{V_u^2}{V_6^2}}}{\sqrt{2\pi}^{1.5} (k+2)\Gamma(k+3)n_u (1+\xi)^3 \tau_k r_y \tau_{св} k_s \cos\alpha_M} \times \int_0^1 u^{-0.5} (1-u)^{k+2} du . \quad (2.79)$$

Выразив интеграл в правой части равенства (2.79) через гамма-функцию, получим:

$$t = \frac{0.07(k+1)\xi z_6 n_6 \tau P N_1}{(k+2)n_u r_y \tau_{св} k_s (\xi+1)^3 \tau_k \cos\alpha_M} \sqrt{1 + \frac{V_u^2}{V_6^2}} , \quad (2.80)$$

где N_1 - коэффициент, учитывающий погрешность преобразования равенства (2.78) с учетом симметричности площадки контакта ($N_1=0,08-0,1$).

Время контакта бруска с каждым произвольным сечением обрабатываемой поверхности зависит от средней скорости $V_{6,ср.}$ перемещения инструмента и определяется выражением:

$$\tau_k = \frac{b_k}{|V_{6,ср.}|} . \quad (2.81)$$

Из геометрических соображений, воспользовавшись рис.2.5, определим значение b_k :

$$b_k = 2\sqrt{2 \cdot r_6 \cdot a_{\max}},$$

но

$$a_{\max} = t \frac{2\pi r_y}{B_k z_6} k_u,$$

где k_u - коэффициент износа бруска, тогда

$$b_k = 2\sqrt{\frac{4\pi r_y r_6 k_u t}{B_k z_6}}. \quad (2.82)$$

Подставляя выражение (2.81) в равенство (2.80) и решая его относительно b_k , получим:

$$b_k = \frac{0.07(k+1)\xi z_6 n_6 \tau P |V_{6.ср.}| N_1}{t(k+2)n_u r_y \tau_{сдв} k_3 (\xi+1)^3 \cos \alpha_M} \sqrt{1 + \frac{V_u^2}{V_6^2}}. \quad (2.83)$$

Приравнявая правые части выражений (2.82) и (2.83), найдем:

$$t = \sqrt[3]{\left(\frac{0.009(k+1)\xi n_6 \tau P N_1 |V_{6.ср.}|}{(k+2)\tau_{сдв} k_3 (\xi+1)^3 \cos \alpha_M n_u} \right)^2} \times \sqrt[3]{\left(\frac{z_6}{r_y} \right) \cdot \left(\frac{B_k}{r_6 k_u} \right) \cdot \left(1 + \frac{V_u^2}{V_6^2} \right)}. \quad (2.84)$$

Равенство (2.84) позволяет определить уравнение профиля изделия после обработки (рис.2.6):

$$z = t_0 \left(\frac{t_x}{t_0} - 1 \right), \quad (2.85)$$

где t_0 , t_x - съем металла соответственно в центре профиля и на расстоянии x от него вдоль оси изделия.

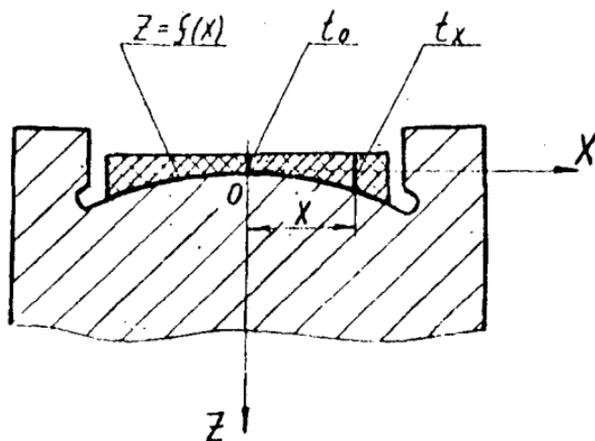


Рис. 2.6. Схема для определения уравнения профиля обработанной поверхности

Определим шероховатость обработанной поверхности. Известно [132], величина среднего арифметического отклонения профиля микронеровностей определяется равенством:

$$R_a = \frac{H_{yc.}}{K_f}, \quad (2.86)$$

где $H_{yc.}$ - условная высота микронеровностей обработанной поверхности;

K_f - коэффициент, определяемый по табл. 14 [132].

В работе [132] показано:

$$H_{yc.} = \frac{a_{cp.}(k+1)}{N_a}, \quad (2.87)$$

где $a_{cp.}$ - средняя толщина среза;

N_a - коэффициент, зависящий от расположения режущих зерен на рабочей поверхности инструмента и определяемый по табл. 15 [132].

Но

$$a_{cp.} = \frac{2}{(k+1)(k+2)} a_{max}. \quad (2.88)$$

Тогда, подставляя выражение (2.87) в равенство (2.86), с учетом (2.88) получим:

$$R_a = \frac{2a_{\max}}{(k+2)N_a K_f} \quad (2.89)$$

Так как выражение (2.77) не удобно для практического использования, найдем значение a_{\max} в более общем виде. Ранее нами было получено выражение (2.17) для определения силы резания при однобрусковом суперфинишировании. Используя это выражение, а также равенство (2.76), определим:

$$a_{\max} = \left[\frac{P_H \xi H_0^k (k+1)(k+2)}{k_3 11.8 \tau_{сдв} B_k b_k (1+\xi)^3 z_0 \cos \alpha_M} \right]^{\frac{1}{k+2}} \quad (2.90)$$

Подставляя равенство (2.90) в выражение (2.89), окончательно найдем:

$$R_a = \frac{2}{(k+2)N_a K_f} \left[\frac{P_H \xi H_0^k (k+1)(k+2)}{11.8 \tau_{сдв} B_k b_k (1+\xi) z_0 \cos \alpha_M k_3} \right]^{\frac{1}{k+2}} \quad (2.91)$$

В работе [76] показано, что для условий брусковой обработки дорожек качения колец подшипников $p \approx 3$, тогда, воспользовавшись рекомендациями [132], определим: $N_a = 0,9$; $K_f = 6,4$.

Как видно из выражения (2.91), шероховатость каждого участка обработанного профиля будет зависеть от размера b_k площадки контакта бруска с изделием на этом участке и угла α_M поворота бруска. Однако, учитывая малость размера b_k и то, что его изменение на различных участках профиля будет незначительным, а угол α_M невелик, можно предположить, что шероховатость любого участка профиля будет практически одинаковой.

2.2. Механизм исправления погрешностей геометрической формы изделия

Рассмотрим возможность исправления погрешностей геометрической формы изделия в процессе брусковой обработки при различных условиях ее осуществления. Для этого представим себе продольное сечение обрабатываемой поверхности изделия как некоторую реализацию случайной функции, представляющую собой совокупность различных гармоник со случайными амплитудами и фазами. Текущий радиус $r(\varphi)$ обрабатываемой поверхности изделия (рис.2. 7) представляется в виде частной суммы тригонометрического ряда Фурье:

$$r(\varphi) = r_0 + \sum_{k=1}^{C_H} A_k \cos(k\varphi + \Psi_k), \quad (2.92)$$

где r_0 - средний радиус обрабатываемой поверхности изделия;

A_k - случайная амплитуда неровности k -й гармоники;

Ψ_k - случайный фазовый угол k -й гармоники;

C_H - минимальная частота гармоники в продольном сечении обрабатываемой поверхности изделия, включая ее микронеровности.

Выражение (2.92) представляет собой стационарную случайную функцию, реализацией которой является произвольное сечение обрабатываемой поверхности. Ее вероятностные характеристики не будут зависеть от аргумента, т.е. от положения текущего радиуса $r(\varphi)$.

Корреляционную функцию случайной функции (2.92) можно определить на основе теоремы сложения корреляционных функций:

$$K(\varphi_1, \varphi_2) = M \left\{ \left[R(\varphi_1) - M_k(\varphi_1) \right] \left[R(\varphi_2) - M_k(\varphi_2) \right] \right\}.$$

В ряде работ [41,133-135] показано, что данная корреляционная функция имеет следующее выражение:

$$K(\varphi_1, \varphi_2) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{C_H} (A_{0k}^2 + \sigma_{0k}^2) \cos k(\varphi_2 - \varphi_1), \quad (2.93)$$

где A_{0k}^2, σ_{0k}^2 - математическое ожидание и дисперсия амплитуд неровностей k-й гармоники соответственно.

Знание корреляционной функции (2.93) дает возможность определить дисперсию σ^2 случайной функции (2.92):

$$\sigma^2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{C_H} (A_{0k}^2 + \sigma_{0k}^2). \quad (2.94)$$

Задаваясь законами распределения амплитуд A_k и фаз Ψ_k гармоник неровностей, составляющих профиль продольного сечения обрабатываемой поверхности, можно найти закон распределения случайного радиуса $r(\varphi)$. Обычно закон распределения погрешностей геометрической формы изделия (овальность, эксцентриситет) соответствует однопараметрическому закону Релея [134]:

$$f(A_k) = \begin{cases} 0 & \text{при } A_k < 0; \\ \frac{A_k}{\sigma_k^2} e^{-\frac{A_k^2}{2\sigma_k^2}} & \text{при } A_k > 0, \end{cases} \quad (2.95)$$

где σ_k - параметр закона распределения Релея.

Распределение случайных фаз Ψ_k гармоник подчиняется закону равной вероятности [134]:

$$f(\Psi_k) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} & \text{при } 0 \leq \Psi_k \leq 2\pi; \\ 0 & \text{при } 0 > \Psi_k > 2\pi. \end{cases} \quad (2.96)$$

При условиях (2.95) и (2.96) величина $r(\varphi)$ подчиняется нормальному закону распределения, плотность вероятности которого определяется выражением [134]:

$$f(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} e^{-\frac{(r-r_0)^2}{2\sigma^2}}. \quad (2.97)$$

Для закона Релея:

$$\begin{aligned} A_{0k} &= 1.25\sigma_{0k}; \\ \sigma_{0k}^2 &= 0.43\sigma_k^2, \end{aligned}$$

тогда дисперсия (2.94) случайной функции (2.92) будет равна:

$$\sigma^2 = 0.64 \sum_{k=1}^{C_{II}} A_{0k}^2 . \quad (2.98)$$

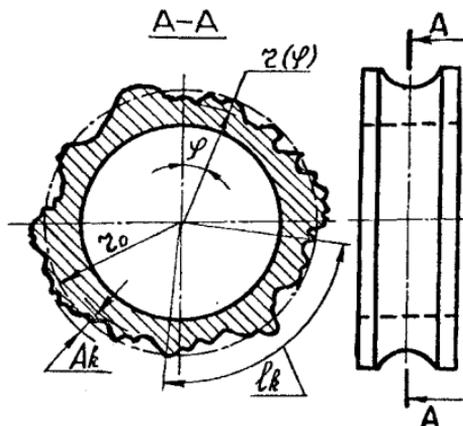


Рис.2.7. Отклонения геометрической формы желоба кольца шарикоподшипника в его продольном сечении

В процессе обработки брусок контактирует с изделием на длине L . Характер исправления погрешностей геометрической формы будет зависеть от шага неровностей, составляющих эти погрешности. Неровности, образованные гармониками с шагом

$$l_k = \frac{\pi D_u}{k} \leq L, \quad (2.99)$$

контактируют с рабочей поверхностью бруска только своими вершинами. Поэтому эти неровности будут устраняться независимо от того, прижимается ли брусок к обрабатываемой поверхности с постоянной силой или перемещается с постоянной скоростью. Если брусок прижимается с постоянной силой, то неровности, образованные гармониками, удовлетворяющими неравенству (2.99), будут равномерно удаляться со всей поверхности. Согласно

выражению (2.97) распределение неровностей с шагом, меньшим длины бруска, соответствует нормальному закону распределения с дисперсией:

$$\sigma_{(l_k < L)}^2 = 0.64 \sum_{k=\frac{\pi D_u}{L}}^{C_{21}} A_{0k}^2. \quad (2.100)$$

В таком случае опорная поверхность профиля, составленного этими неровностями, будет равна:

$$\eta = \frac{1}{\sigma_{(l_k < L)} \sqrt{2\pi}} \int_e^{\infty} \frac{(r-r_0)}{2\sigma_{(l_k < L)}} dx, \quad (2.101)$$

где x - расстояние от средней линии профиля микронеровностей, образованных гармониками с шагом $l_k < L$.

В соответствии с выражением (2.48) при прерывистом контакте бруска с изделием время $T_{об.пр}$, необходимое для удаления этих неровностей высотой 6σ , равно:

$$T_{об.пр} = 0.14 \frac{\sigma(1+\xi)^3 \tau_{сдв} V \pi D_u}{\xi V_p R T_k (1-0.5b T_k) n_g z_6^3}. \quad (2.102)$$

Если обработка производится при постоянном контакте бруска с изделием, то время $T_{об.н}$, необходимое для удаления неровностей высотой $6\sigma_{(l_k < L)}$, определится из выражения (2.47):

$$T_{об.н} = T_k = -\frac{1}{b} \ln \left(1 - \frac{0.14 \sigma(1+\xi)^3 \tau_{сдв} \pi D_u b V}{\xi P V_p z_6^3} \right). \quad (2.103)$$

Анализ выражений (2.102) и (2.103) позволяет сделать вывод о рациональном использовании рассмотренных схем осуществления процесса суперфиниширования. На рисунке 2.8 показана зависимость отношения времени $T_{об.н}$ суперфиниширования, необходимого для снятия неровностей с шагом $l_k < L$, при суперфинишировании с непрерывным контактом ко времени $T_{об.пр}$ суперфиниширования с прерывистым контактом бруска с изделием от коэффициента b ,

учитывающего затупление зерен бруска и отношения времени контакта T_k бруска ко времени его одного двойного хода $T_u=1/\eta_6$. В расчете принято, что время, необходимое для снятия неровностей при суперфинишировании с непрерывным контактом бруска, равно 20 секундам.

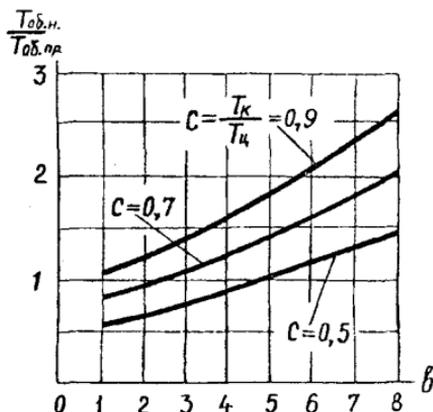


Рис. 2.8. Зависимость отношения $T_{об.н.}/T_{об.пр.}$ от коэффициента b , учитывающего затупление зерен бруска, и коэффициента $C=T_k/T_u$

Из рисунка 2.8 видно, что процесс суперфиниширования при прерывистом контакте бруска с изделием не всегда является эффективным, как считалось до сих пор [42,64,127]. При высокой режущей способности бруска, например, при использовании крупнозернистых брусков, обработке материалов с высокой твердостью, применении брусков низкой твердости, а также, когда время контакта составляет незначительную часть от времени одного двойного хода бруска, процесс суперфиниширования с непрерывным контактом является более эффективным, чем с прерывистым. И только в случае, когда режущая способность бруска с течением времени его непрерывного контакта с изделием резко снижается, например, при использовании мелкозернистых брусков, причем время непрерывного контакта бруска с изделием составляет значительную часть (0.7-0.9) от

времени его двойного хода, процесс суперфиниширования с прерывистым контактом оказывается более эффективным, чем с непрерывным.

При обработке с постоянной силой прижима бруска к изделию через упругие кинематические звенья гармоника неровностей с шагом

$$l_k = \frac{\pi D_u}{k} > L \quad (2.104)$$

устраняться не будут, так как давление брусков на выступах и во впадинах неровностей постоянно. Устранение исходных погрешностей геометрической формы изделия с шагом, большим длины контакта бруска с изделием (2.104), возможно, если брусок подается на обрабатываемую поверхность с постоянной подачей или прижимается к поверхности изделия с постоянной силой через жесткие самотормозящиеся кинематические звенья. Последний вариант, как отмечалось выше, предпочтительнее, так как при этом сокращается время на подвод инструмента к изделию. Поэтому рассмотрим именно эту схему обработки.

Когда брусок находится во впадинах неровностей (рис.2.9а), на него действует сила P , передаваемая через самотормозящиеся жесткие кинематические звенья, например, клиновые. Если брусок находится на вершинах неровностей с амплитудой d (рис.2.9б), то на него, помимо силы P , действует сила упругости P_y . Следовательно, результирующая сила P_p :

$$P_p = P + P_y . \quad (2.105)$$

Упругая деформация системы СПИД под действием силы P_p :

$$y = \frac{P_p}{J_c} , \quad (2.106)$$

где J_c - жесткость системы СПИД.

Обозначим:

$$J_{pj} = \frac{P_p}{q_j}, \quad (2.107)$$

где q_j - величина съема металла на j -м обороте изделия.

В технической литературе [41,136] величину J_p иногда называют жесткостью резания. Примем для краткости этот термин. Из выражений (2.106) и (2.107)

$$q_j = y \frac{J_{pj}}{J_c}. \quad (2.108)$$

Обозначим диаметр обрабатываемой поверхности по линии выступов на $(j-1)$ оборотов изделия через $D_{b(j-1)}$, а на j -м обороте - D_{bj} , диаметр обрабатываемой поверхности по линии впадин на $(j-1)$ обороте изделия через $D_{bn(j-1)}$, а на j -м обороте — соответственно $D_{bn,j}$ (рис.2.9), тогда

$$\begin{cases} D_{bj} = D_{b(j-1)} - 2q_{bj}; \\ D_{bn,j} = D_{bn(j-1)} - 2q_{bn,j}, \end{cases} \quad (2.109)$$

где $q_{bj}, q_{bn,j}$ - величина съема металла одним брусом на j -м обороте изделия на выступах и впадинах неровностей соответственно.

Из выражения (2.109) имеем:

$$D_{bj} - D_{bn,j} = D_{b(j-1)} - D_{bn(j-1)} - 2(q_{bj} - q_{bn,j}), \quad (2.110)$$

а с учетом равенства (2.108)

$$q_{bj} - q_{bn,j} = (y_{bj} - y_{bn,j}) \frac{J_c}{J_{pj}}, \quad (2.111)$$

где $y_{bj}, y_{bn,j}$ - упругая деформация системы СПИД на j -м обороте изделия при контакте бруска с выступами и впадинами неровностей соответственно.

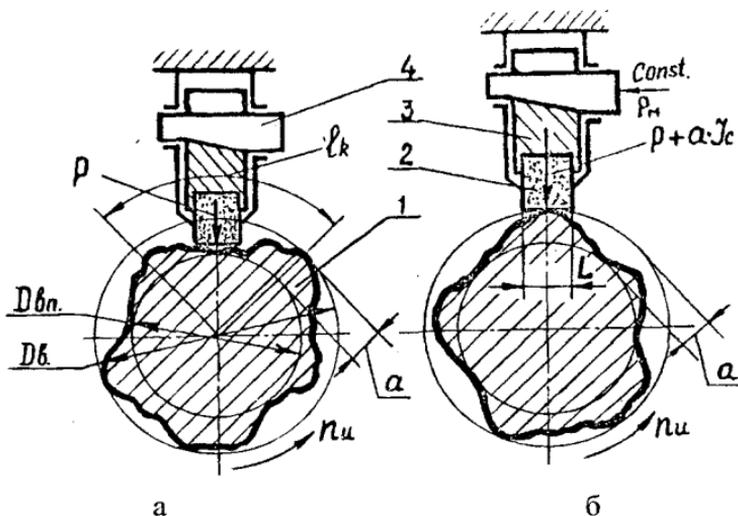


Рис.2.9. Схема суперфиниширования абразивными брусками, прижимаемыми к изделию через жесткие самотормозящиеся кинематические звенья: а - брусок во впадине неровностей; б - брусок на вершине неровностей

Несложно показать, что
$$y_{bj} = y_{bn,j} - \frac{1}{2}(D_{bj} - D_{bn,j}).$$

Тогда выражение (2.111) примет вид:

$$q_{bj} - q_{bn,j} = \frac{1}{2}(D_{bj} - D_{bn,j}) \frac{J_c}{J_{pj}}. \quad (2.112)$$

Подставив выражение (2.112) в (2.110), после несложных преобразований имеем:

$$D_{bj} - D_{bnj} = (D_{b(j-1)} - D_{bn(j-1)}) \frac{1}{1 + \frac{J_c}{J_{pj}}}. \quad (2.113)$$

Так как

$$\alpha_j = \frac{1}{2}(D_{bj} - D_{bn,j}), \quad \alpha_{(j-1)} = \frac{1}{2}(D_{b(j-1)} - D_{bn,(j-1)}),$$

где $\alpha_j, \alpha_{(j-1)}$ - амплитуда неровностей обрабатываемой поверхности соответственно на j -м и предшествующем обороте изделия.

В конце обработки после m оборотов изделия амплитуда неровностей станет равной

$$\alpha_m = \alpha_u \prod_{j=1}^m \left(\frac{1}{1 + \frac{J_c}{J_{pj}}} \right), \quad (2.114)$$

где α_u - исходная амплитуда неровностей.

Уравнение (2.114) показывает, что исправление исходной погрешности геометрической формы обрабатываемой поверхности изделия будет тем интенсивнее, чем выше жесткость системы СПИД и ниже жесткость резания.

Для практического использования приведем выражение (2.114) к более удобному виду. Прологарифмируем равенство (2.114):

$$\ln \alpha_m = \ln \alpha_u + \sum_{j=1}^m \ln \left(\frac{1}{1 + \frac{J_c}{J_{pj}}} \right) = \ln \alpha_u - \sum_{j=1}^m \ln \left(\frac{J_c}{J_{pj}} + 1 \right). \quad (2.115)$$

Найдем величину J_{pj} . Для этого выразим в равенстве (2.48) общее время обработки $T_{об}$ через порядковый номер оборота изделия j :

$$T_{об} = \frac{j}{n_u}.$$

Тогда съем металла за один оборот изделия:

$$q_j = 1.92 z_6^3 \sqrt{\frac{\sigma^2 \xi P n_6 V_p T_k (1 - 0.5 b T_k) j}{(1 + \xi)^3 \tau_{сдв} B \pi D_u n_u}} \left(1 - \sqrt[3]{1 - \frac{1}{j}} \right).$$

При $j \geq 10$ с погрешностью до 3.4%

$$q_j = 0.64 j^{-\frac{2}{3}} z_6^3 \sqrt{\frac{\sigma^2 \xi P n_6 V_p T_k (1 - 0.5 b T_k)}{(1 + \xi)^3 \tau_{сдв} B \pi D_u n_u}}. \quad (2.116)$$

Подставляя значение q_j из выражения (2.116) в равенство (2.107), найдем J_{pj} :

$$J_{pj} = \frac{Ej^{\frac{2}{3}}}{Z_6}, \quad (2.117)$$

где

$$E = 1.56 \cdot 3 \sqrt{\frac{(1 + \xi)^3 \tau_{сдв} B P^2 \pi D_u n_u}{\xi n_6 V_p \sigma^2 T_k (1 - 0.5b T_k)}}. \quad (2.118)$$

Используя выражение (2.117), преобразуем равенство (2.115):

$$\ln \alpha_m = \ln \alpha_u - \sum_{j=1}^m \ln \left(1 + \frac{J_c Z_6}{E j^{\frac{2}{3}}} \right). \quad (2.119)$$

Рассчитаем ориентировочное значение величины J_p . Обычно при суперфинишировании за время $T=20$ с обработки, частоте вращения изделия $n_u=1800$ об/мин и силе прижима бруска к изделию не более 20 кг осуществляется снятие припуска [48] около $q=5$ мкм на сторону. В таком случае среднее значение величины J_p составляет:

$$J_p = \frac{1000 \cdot P n_u T}{60q} = \frac{1000 \cdot 20 \cdot 1800 \cdot 20}{60 \cdot 5} = 24 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{мм}}.$$

Жесткость системы СПИД, как правило, не превышает $2 \cdot 10^3$ кг/мм. Таким образом, при брусовой обработке жесткость резания более чем на порядок превышает жесткость системы СПИД. При этом условии можно разложить в степенной ряд логарифмы в выражении (2.119), ограничиваясь одним членом этого ряда:

$$\ln \alpha_m = \ln \alpha_u - \frac{Z_6 J_c}{E} \sum_{j=1}^m j^{-\frac{2}{3}}. \quad (2.120)$$

При достаточно большом значении m от суммирования в правой части выражения (2.120) можно перейти к интегрированию:

$$\sum_{j=1}^m j^{-\frac{2}{3}} = 3N_1 \left(m^{\frac{1}{3}} - 1 \right). \quad (2.121)$$

В таблице 2.2 даны значения поправочного коэффициента N_1 .

Таблица 2.2

**Значение поправочного коэффициента N_1 в зависимости от
накопленного количества оборотов изделия m**

| m | 5 | 10 | 20 | 30 |
|-------|------|------|------|------|
| N_1 | 1.34 | 1.19 | 1.12 | 1.04 |

Из таблицы 2.2 видно, что при $m \geq 30$ значение коэффициента N_1 можно принять равным единице с погрешностью менее 10%.

Подставляя выражение (2.121) в равенство (2.120), после преобразования имеем:

$$\alpha_m = \alpha_u e^{-3N_1(m^{1/3}-1)\frac{J_c}{E}z_6} \quad (2.122)$$

Величину амплитуды a_u исходных неровностей обрабатываемой поверхности изделия можно принять равной $\alpha_u = 6\sigma_{(k>L)}$, тогда из выражения (2.98):

$$\alpha_u = 4.8 \sqrt{\frac{\pi D_u}{k} \sum_{k=1}^k A_{0k}^2}$$

Анализируя равенства (2.118) и (2.122), можно сделать вывод, что величина E возрастает с увеличением параметров P , $\tau_{сдв}$, b , B , при этом снижается исправляющая способность процесса. Наоборот, с увеличением частоты осцилляции бруска n_6 и величины σ микронеровностей исправляющая способность процесса возрастает. Для повышения исправляющей способности процесса обработки на практике стремятся осуществлять снятие припуска двумя или большим количеством брусков.

Жесткость системы СПИД зависит от жесткости крепления изделия J_u , жесткости крепления бруска J_6 и жесткости самой державки J_d :

$$\frac{1}{J_c} = \frac{1}{J_u} + \frac{1}{J_6} + \frac{1}{J_d} \quad (2.123)$$

Поэтому повысить исправляющую способность процесса суперфиниширования можно либо увеличением жесткости этих кинематических звеньев, либо уменьшением числа этих звеньев. С целью уменьшения числа кинематических звеньев, оказывающих влияние на жесткость системы СПИД, можно использовать многобрусковую обработку с жесткими кинематическими связями между брусками. Например, если обработка осуществляется двумя симметрично расположенными брусками, связанными между собой жесткими кинематическими звеньями, то при обработке нечетных гармоник неровностей (рис. 2.10а) жесткость системы СПИД определяется выражением (2.123), и исправляющая способность процесса для этих гармоник возрастает пропорционально увеличению числа обрабатываемых брусков. При обработке двумя брусками:

$$\alpha_m = \alpha_{ин.} e^{-\frac{6N_1 J_6}{E} (m^{1/3} - 1)},$$

где

$$\alpha_{ин.} = 4.8 \sqrt{\sum_{k=1}^k A_{0(2k-1)} \frac{\pi D_u}{k}}.$$

Для четных гармоник (рис. 10б) жесткость самой державки и крепления изделия не оказывает влияния на упругие перемещения системы СПИД, поэтому $J_6 = J_6$, а амплитуда этих гармоник после m оборотов изделия будет:

$$\alpha_m = \alpha_{иг} e^{-\frac{6N_1 J_6}{E} (m^{1/3} - 1)},$$

где

$$\alpha_{иг} = 4.8 \sqrt{\sum_{k=1}^k A_{02k}^2 \frac{\pi D_u}{k}}.$$

При произвольном количестве z_6 жестко связанных брусков, расположенных в процессе обработки вокруг оси вращения изделия, особенно интенсивно будут устраняться гармоники с частотой, кратной наименьшему общему делителю числа брусков и номеров гармоник. Например, для трех брусков:

$$\alpha_m = \alpha_{изк} e^{-\frac{9N_1 J_6}{E} (m^{1/3} - 1)} \quad (2.124)$$

где

$$\alpha_{изк} = 4.8 \sqrt{\sum_{k=1}^k A_{03k}^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi D_u}{k}}$$

Для всех других гармоник, не кратных трем:

$$\alpha_m = \alpha_u e^{-\frac{9N_1 J_c}{E} (m^{1/3} - 1)} \quad (2.125)$$

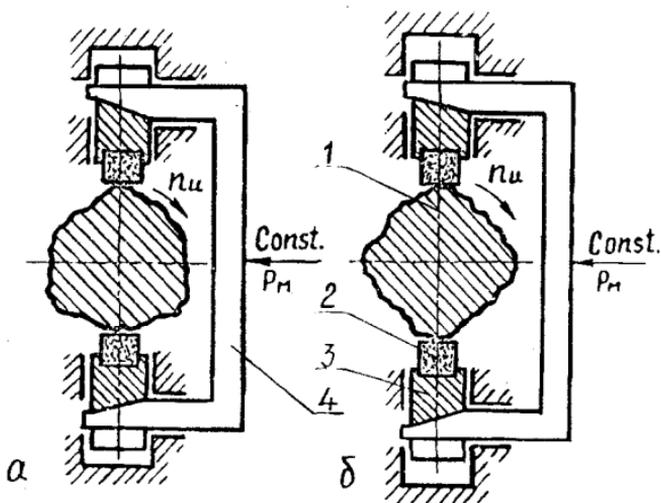


Рис. 2.10. Схема брусковой обработки нечетных (а) и четных (б) гармоник неровностей изделия: 1 - изделие; 2 - брусок; 3 - державка; 4 - механизм подачи

Конструктивно высокую жесткость кинематической связи брусков между собой в державке обеспечить значительно легче, чем высокую жесткость самой державки и жесткость крепления изделия. Поэтому использование многобрусковой обработки позволяет обеспечить эффективное исправление погрешностей геометрической формы обрабатываемой поверхности изделия.

Таким образом, обеспечивая прижим брусков к обрабатываемой поверхности с постоянной силой через жесткие самотормозящиеся кинематические звенья, можно устранять с обрабатываемой поверхности неровности с шагом, большим длины контакта бруска с изделием. Снижение влияния жесткости системы СПИД на исправляющую способность процесса брусковой обработки можно обеспечить использованием многобрусковой обработки с жесткими кинематическими связями между брусками. При этом, с увеличением числа одновременно работающих брусков, исправляющая возможность процесса возрастает.

3.МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

3.1. Методика проведения

Экспериментальные исследования, выполненные в рамках данной работы, заключались в анализе технологических возможностей предлагаемых методов многобрусковой доводки рабочих поверхностей колец подшипников, реализующих прерывистый и периодический контакт брусков с изделием.

В ходе экспериментов исследовали многобрусковую обработку дорожек качения колец роликовых и шариковых подшипников осциллирующим инструментом и вращающейся инструментальной головкой. Исследование каждого из предлагаемых методов осуществлялось в два этапа. На первом этапе исследовали влияние режимных факторов обработки на производительность съема припуска, параметры геометрической формы обрабатываемого профиля, шероховатость, волнистость и отклонение от круглости обработанной поверхности.

На втором этапе определялось влияние на эти параметры обработки структуры и продолжительности цикла доводки, а также характеристики применяемых абразивных брусков.

Весь цикл экспериментов проводили на опытных образцах суперфинишных автоматов для многобрусковой обработки, позволяющих в широких пределах варьировать значения исследуемых факторов. Обрабатывали дорожки качения наружных и внутренних колец наиболее массовых шариковых и роликовых подшипников, изготовленных из стали ШХ-15 ГОСТ 801-91 и термически обработанных до твердости HRC, 61...65.

В процессе экспериментальных исследований применяли литые абразивные бруски из карбида кремния зеленого на керамической связке. Эти бруски значительно дешевле брусков из эльбора и других сверхтвердых материалов и широко применяются при доводке поверхностей деталей машин.

Обработку производили одновременно несколькими абразивными брусками, имеющими одинаковые размеры и характеристику и расположенными на обрабатываемой поверхности с равным угловым шагом.

Измерение твердости абразивных брусков производили на приборе Роквелла ГОСТ 13407 - 92 по методике, изложенной в ГОСТ 19202 - 89.

Контроль диаметрального съема металла осуществляли путем замера диаметра дорожки качения до и после обработки на приборе Д422М микрокатрами модели ИГП ГОСТ 6933 - 88 с ценой деления 0,0005 мм при постоянной температуре 20° С. Постоянство температуры обеспечивали выдержкой колец в 5% водном растворе кальцинированной соды емкостью 10 литров при температуре 20° С в течение 5 минут.

Шероховатость обработанной поверхности определяли как среднее значение пяти измерений в пяти сечениях каждого из обработанных изделий [131]. Среднее арифметическое отклонение профиля неровностей R_a и форму профиля обработанной поверхности контролировали с помощью профилограф-профилометра "Поворотный Телисерф-4" при анализе профилограмм, записанных с увеличением 20000 и 10000 соответственно.

Записанные на профилограммах профили трех сечений дорожки качения колец роликоподшипников аппроксимировали степенными

зависимостями вида $y = Ax^n$ и находили средние значения параметров A и n .

Отклонения от круглости и волнистость обработанной поверхности изделия определяли по круглограммам, записанным с помощью прибора "Талиронд" модели 51 (ФРГ). Запись волнистости осуществляли с фильтром С, отклонений от круглости - с фильтром В при увеличении 5000, 10000 и 20000.

3.2. Методика проведения многофакторного эксперимента и обработки экспериментальных данных

Процесс суперфинишной обработки является процессом многофакторным, поэтому для учета влияния всех факторов на технологические показатели обработки использовали статистические методы планирования эксперимента, которые позволяют на основе научно обоснованной программы проведения экспериментального исследования получить объективную оценку результатов эксперимента на всех последовательных этапах исследования при проведении минимального числа опытов.

Требуемое количество опытов, необходимое для достоверной и надежной оценки результатов измерения, с учетом принятой методики и средств измерений, определили в соответствии с рекомендациями, изложенными в работе [137]. Установлено, что проведение трех повторных опытов, при осуществлении каждой позиции плана эксперимента, удовлетворяет 95% надежности результатов. Опыты проводили в случайной последовательности в соответствии с данными таблицы равномерно распределенных случайных чисел [138].

Для определения механизма влияния исследуемых факторов на результаты обработки использовали интерполяционные модели на основе степенных функций:

$$\begin{aligned}
 n &= \rho_n \cdot A_{\delta}^{a_{n1}} \cdot n_{\delta}^{a_{n2}} \cdot P_{\delta}^{a_{n3}} \cdot n_u^{a_{n4}}; \\
 \delta &= \rho_{\delta} \cdot A_{\delta}^{a_{\delta1}} \cdot n_{\delta}^{a_{\delta2}} \cdot P_{\delta}^{a_{\delta3}} \cdot n_u^{a_{\delta4}}; \\
 q &= \rho_q \cdot A_{\delta}^{a_{q1}} \cdot n_{\delta}^{a_{q2}} \cdot P_{\delta}^{a_{q3}} \cdot n_u^{a_{q4}}; \\
 R_a &= \rho_{R_a} \cdot A_{\delta}^{a_{R_a1}} \cdot n_{\delta}^{a_{R_a2}} \cdot P_{\delta}^{a_{R_a3}} \cdot n_u^{a_{R_a4}}; \\
 W_z &= \rho_{W_z} \cdot A_{\delta}^{a_{W_z1}} \cdot n_{\delta}^{a_{W_z2}} \cdot P_{\delta}^{a_{W_z3}} \cdot n_u^{a_{W_z4}}; \\
 \Delta_{кр.} &= \rho_{\Delta_{кр.}} \cdot A_{\delta}^{a_{\Delta_{кр.}1}} \cdot n_{\delta}^{a_{\Delta_{кр.}2}} \cdot P_{\delta}^{a_{\Delta_{кр.}3}} \cdot n_u^{a_{\Delta_{кр.}4}};
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

$$\begin{aligned}
 n &= \lambda_n \cdot T_{вп.}^{K_{n1}} \cdot T_{в.}^{K_{n2}} \cdot HRA^{K_{n3}} \cdot 3^{K_{n4}}; \\
 \delta &= \lambda_{\delta} \cdot T_{вп.}^{K_{\delta1}} \cdot T_{в.}^{K_{\delta2}} \cdot HRA^{K_{\delta3}} \cdot 3^{K_{\delta4}}; \\
 q &= \lambda_q \cdot T_{вп.}^{K_{q1}} \cdot T_{в.}^{K_{q2}} \cdot HRA^{K_{q3}} \cdot 3^{K_{q4}}; \\
 R_a &= \lambda_{R_a} \cdot T_{вп.}^{K_{R_a1}} \cdot T_{в.}^{K_{R_a2}} \cdot HRA^{K_{R_a3}} \cdot 3^{K_{R_a4}}; \\
 W_z &= \lambda_{W_z} \cdot T_{вп.}^{K_{W_z1}} \cdot T_{в.}^{K_{W_z2}} \cdot HRA^{K_{W_z3}} \cdot 3^{K_{W_z4}}; \\
 \Delta_{кр.} &= \lambda_{\Delta_{кр.}} \cdot T_{вп.}^{K_{\Delta_{кр.}1}} \cdot T_{в.}^{K_{\Delta_{кр.}2}} \cdot HRA^{K_{\Delta_{кр.}3}} \cdot 3^{K_{\Delta_{кр.}4}};
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

$$\begin{aligned}
 q &= \rho_q \cdot n_u^{a_{q1}} \cdot n_2^{a_{q2}} \cdot P_{\delta}^{a_{q3}} \cdot \alpha^{a_{q4}}; \\
 \delta &= \rho_{\delta} \cdot n_u^{a_{\delta1}} \cdot n_2^{a_{\delta2}} \cdot P_{\delta}^{a_{\delta3}} \cdot \alpha^{a_{\delta4}}; \\
 W_z &= \rho_{W_z} \cdot n_u^{a_{W_z1}} \cdot n_2^{a_{W_z2}} \cdot P_{\delta}^{a_{W_z3}} \cdot \alpha^{a_{W_z4}}; \\
 \Delta_{кр.} &= \rho_{\Delta_{кр.}} \cdot n_u^{a_{\Delta_{кр.}1}} \cdot n_2^{a_{\Delta_{кр.}2}} \cdot P_{\delta}^{a_{\Delta_{кр.}3}} \cdot \alpha^{a_{\Delta_{кр.}4}};
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

$$\begin{aligned}
 R_a &= \rho_{R_a} \cdot n_u^{a_{R_a1}} \cdot n_2^{a_{R_a2}} \cdot P_{\delta}^{a_{R_a3}} \cdot \alpha^{a_{R_a4}}; \\
 q &= \lambda_q \cdot T_{\delta}^{K_{q1}} \cdot HRA^{K_{q2}} \cdot 3^{K_{q3}}; \\
 \delta &= \lambda_{\delta} \cdot T_{\delta}^{K_{\delta1}} \cdot HRA^{K_{\delta2}} \cdot 3^{K_{\delta3}}; \\
 W_z &= \lambda_{W_z} \cdot T_{\delta}^{K_{W_z1}} \cdot HRA^{K_{W_z2}} \cdot 3^{K_{W_z3}}; \\
 \Delta_{кр.} &= \lambda_{\Delta_{кр.}} \cdot T_{\delta}^{K_{\Delta_{кр.}1}} \cdot HRA^{K_{\Delta_{кр.}2}} \cdot 3^{K_{\Delta_{кр.}3}}; \\
 R_a &= \lambda_{R_a} \cdot T_{\delta}^{K_{R_a1}} \cdot HRA^{K_{R_a2}} \cdot 3^{K_{R_a3}};
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

где n - показатель формы профиля обработанной поверхности;

δ - величина выпуклости обработанного профиля, мкм;

q - толщина снимаемого металла, мкм;

R_a - среднее арифметическое отклонение профиля микронеровностей обработанной поверхности, мкм;

W_z - среднее арифметическое значение из пяти значений высоты волнистости обработанной поверхности, мкм;

$\Delta_{кр.}$ - отклонение от круглости обработанной поверхности, мкм;

$\rho_n, \rho_\delta, \rho_q, \rho_{R_a}, \rho_{W_z}, \rho_{\Delta_{кр.}}$

- коэффициенты пропорциональности;

$\lambda_n, \lambda_\delta, \lambda_q, \lambda_{R_a}, \lambda_{W_z}, \lambda_{\Delta_{кр.}}$

$a_n, a_\delta, a_q, a_{R_a}, a_{W_z}, a_{\Delta_{кр.}}$

- показатели степеней.

$K_n, K_\delta, K_q, K_{R_a}, K_{W_z}, K_{\Delta_{кр.}}$

Приведем уравнения(3.1), (3.2),(3.3) и (3.4) к линейному виду:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ln n = \ln \rho_n + a_{n1} \ln A_\delta + a_{n2} \ln n_\delta + a_{n3} \ln P_\delta + a_{n4} \ln n_u; \\ \ln \delta = \ln \rho_\delta + a_{\delta1} \ln A_\delta + a_{\delta2} \ln n_\delta + a_{\delta3} \ln P_\delta + a_{\delta4} \ln n_u; \\ \ln q = \ln \rho_q + a_{q1} \ln A_\delta + a_{q2} \ln n_\delta + a_{q3} \ln P_\delta + a_{q4} \ln n_u; \\ \ln R_a = \ln \rho_{R_a} + a_{R_a1} \ln A_\delta + a_{R_a2} \ln n_\delta + a_{R_a3} \ln P_\delta + a_{R_a4} \ln n_u; \\ \ln W_z = \ln \rho_{W_z} + a_{W_z1} \ln A_\delta + a_{W_z2} \ln n_\delta + a_{W_z3} \ln P_\delta + a_{W_z4} \ln n_u; \\ \ln \Delta_{кр.} = \ln \rho_{\Delta_{кр.}} + a_{\Delta_{кр.1}} \ln A_\delta + a_{\Delta_{кр.2}} \ln n_\delta + a_{\Delta_{кр.3}} \ln P_\delta + a_{\Delta_{кр.4}} \ln n_u; \end{array} \right. \quad (3.5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \ln n = \ln \lambda_n + K_{n1} \ln T_{вп.} + K_{n2} \ln T_b + K_{n3} \ln HRA + K_{n4} \ln 3; \\ \ln \delta = \ln \lambda_\delta + K_{\delta1} \ln T_{вп.} + K_{\delta2} \ln T_b + K_{\delta3} \ln HRA + K_{\delta4} \ln 3; \\ \ln q = \ln \lambda_q + K_{q1} \ln T_{вп.} + K_{q2} \ln T_b + K_{q3} \ln HRA + K_{q4} \ln 3; \\ \ln R_a = \ln \lambda_{R_a} + K_{R_a1} \ln T_{вп.} + K_{R_a2} \ln T_b + K_{R_a3} \ln HRA + K_{R_a4} \ln 3; \\ \ln W_z = \ln \lambda_{W_z} + K_{W_z1} \ln T_{вп.} + K_{W_z2} \ln T_b + K_{W_z3} \ln HRA + K_{W_z4} \ln 3; \\ \ln \Delta_{кр.} = \ln \lambda_{\Delta_{кр.}} + K_{\Delta_{кр.1}} \ln T_{вп.} + K_{\Delta_{кр.2}} \ln T_b + K_{\Delta_{кр.3}} \ln HRA + K_{\Delta_{кр.4}} \ln 3; \end{array} \right. \quad (3.6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \ln q = \ln \rho_q + a_{q1} \ln n_u + a_{q2} \ln n_2 + a_{q3} \ln P_\delta + a_{q4} \ln \alpha; \\ \ln \delta = \ln \rho_\delta + a_{\delta1} \ln n_u + a_{\delta2} \ln n_2 + a_{\delta3} \ln P_\delta + a_{\delta4} \ln \alpha; \\ \ln W_z = \ln \rho_{W_z} + a_{W_z1} \ln n_u + a_{W_z2} \ln n_2 + a_{W_z3} \ln P_\delta + a_{W_z4} \ln \alpha; \\ \ln \Delta_{кр.} = \ln \rho_{\Delta_{кр.}} + a_{\Delta_{кр.}1} \ln n_u + a_{\Delta_{кр.}2} \ln n_2 + a_{\Delta_{кр.}3} \ln P_\delta + a_{\Delta_{кр.}4} \ln \alpha; \\ \ln R_a = \ln \rho_{R_a} + a_{R_a1} \ln n_u + a_{R_a2} \ln n_2 + a_{R_a3} \ln P_\delta + a_{R_a4} \ln \alpha; \end{array} \right. \quad (3.7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \ln q = \ln \lambda_q + K_{q1} \ln T + K_{q2} \ln HRA + K_{q3} \ln 3; \\ \ln \delta = \ln \lambda_\delta + K_{\delta1} \ln T + K_{\delta2} \ln HRA + K_{\delta3} \ln 3; \\ \ln W_z = \ln \lambda_{W_z} + K_{W_z1} \ln T + K_{W_z2} \ln HRA + K_{W_z3} \ln 3; \\ \ln \Delta_{кр.} = \ln \lambda_{\Delta_{кр.}} + K_{\Delta_{кр.}1} \ln T + K_{\Delta_{кр.}2} \ln HRA + K_{\Delta_{кр.}3} \ln 3; \\ \ln R_a = \ln \lambda_{R_a} + K_{R_a1} \ln T + K_{R_a2} \ln HRA + K_{R_a3} \ln 3. \end{array} \right. \quad (3.8)$$

Для исследования предлагаемых процессов суперфиниширования применяли полный факторный эксперимент, при этом использовали линейные модели уравнения регрессии, которые в кодированном виде записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} y_1 &= b_0 x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_{12} x_1 x_2 + \\ &+ b_{13} x_1 x_3 + b_{14} x_1 x_4 + b_{23} x_2 x_3 + b_{24} x_2 x_4 + b_{34} x_3 x_4 + \\ &+ b_{1234} x_1 x_2 x_3 x_4 ; \\ y_2 &= b_0 x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + \\ &+ b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3 , \end{aligned} \quad (3.9)$$

где y_1, y_2 - натуральные логарифмы параметров оптимизации;

b_i - параметры модели (коэффициенты регрессии);

x_i - факторы процесса в кодированном виде.

Введя специальные обозначения, при которых верхний уровень факторов соответствовал +1, нижний -1, а основной 0, на всех этапах исследований, кроме последнего, строили планы матриц планирования полного факторного эксперимента типа 2^4 . На последнем этапе

исследования суперфиниширования вращающимся инструментом ставили полный факторный эксперимент типа 2^3 .

Обработку результатов экспериментов и построение линейной модели уравнения регрессии производили по стандартной методике [139], а результаты расчетов заносили в журналы планирования экспериментов (приложение 2-17).

Значение коэффициентов пропорциональности и показателей степеней в интерполяционных моделях исследуемых процессов определяли по методике, изложенной в работе [139]. При этом, для перехода от кодированных значений факторов к их действительным значениям использовали уравнения преобразования, которые для исследования влияния режимных факторов имеют вид:

$$x_1 = \frac{2(\ln A_\delta - \ln A_{\delta_{\max}})}{\ln A_{\delta_{\max}} - \ln A_{\delta_{\min}}} + 1;$$

$$x_2 = \frac{2(\ln n_\delta - \ln n_{\delta_{\max}})}{\ln n_{\delta_{\max}} - \ln n_{\delta_{\min}}} + 1;$$
(3.10)

$$x_3 = \frac{2(\ln P_\delta - \ln P_{\delta_{\max}})}{\ln P_{\delta_{\max}} - \ln P_{\delta_{\min}}} + 1;$$

$$x_4 = \frac{2(\ln n_u - \ln n_{u_{\max}})}{\ln n_{u_{\max}} - \ln n_{u_{\min}}} + 1;$$

$$x_1 = \frac{2(\ln n_u - \ln n_{u_{\max}})}{\ln n_{u_{\max}} - \ln n_{u_{\min}}} + 1;$$

$$x_2 = \frac{2(\ln n_2 - \ln n_{2_{\max}})}{\ln n_{2_{\max}} - \ln n_{2_{\min}}} + 1;$$
(3.11)

$$x_3 = \frac{2(\ln P_\delta - \ln P_{\delta_{\max}})}{\ln P_{\delta_{\max}} - \ln P_{\delta_{\min}}} + 1;$$

$$x_4 = \frac{2(\ln \alpha - \ln \alpha_{\max})}{\ln \alpha_{\max} - \ln \alpha_{\min}} + 1.$$

Для факторов, характеризующих временной цикл обработки и характеристику инструмента, уравнения преобразования имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}x_1 &= \frac{2(\ln T_{\text{вр.}} - \ln T_{\text{вр. max}})}{\ln T_{\text{вр. max}} - \ln T_{\text{вр. min}}} + 1; \\x_2 &= \frac{2(\ln T_{\text{в}} - \ln T_{\text{в max}})}{\ln T_{\text{в max}} - \ln T_{\text{в min}}} + 1; \\x_3 &= \frac{2(\ln \text{HRA} - \ln \text{HRA}_{\text{max}})}{\ln \text{HRA}_{\text{max}} - \ln \text{HRA}_{\text{min}}} + 1; \\x_4 &= \frac{2(\ln 3 - \ln 3_{\text{max}})}{\ln 3_{\text{max}} - \ln 3_{\text{min}}} + 1.\end{aligned}\tag{3.12}$$

Однородность дисперсий различных опытов определяли по критерию Кохрена, значимость коэффициентов уравнения регрессии - по критерию Стьюдента, адекватность математических моделей - по критерию Фишера. Доверительную вероятность во всех этих случаях принимали равной 95%.

4. МНОГОБРУСКОВОЕ СУПЕРФИНИШИРОВАНИЕ КОЛЕЦ РОЛИКОПОДШИПНИКОВ С ЛОКАЛИЗАЦИЕЙ КОНТАКТА ИНСТРУМЕНТА И ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОСЕВОЙ ОСЦИЛЛЯЦИЕЙ СУПЕРФИНИШНОЙ ГОЛОВКИ

4.1. Сущность метода

Выполненные исследования показали, что в процессе брускового обработки при определенных условиях перемещения инструмента вдоль обрабатываемого профиля возможно не только интенсивное исправление погрешностей его геометрической формы, но и формирование новых профилей, отвечающих самым высоким требованиям по обеспечению их работоспособности. Традиционные способы суперфиниширования в силу поверхностного контакта инструмента и детали мало пригодны для профилирования обрабатываемой поверхности. Наиболее полно отвечает требованиям профилирующей доводки способ многобрускового суперфиниширования с прямолинейной осевой осцилляцией инструмента [141]. Сущность данного способа заключается в следующем (рис.4.1).

Обработка осуществляется бруском, имеющим тороидальную рабочую поверхность с осью, перпендикулярной оси вращения детали и не совпадающей с центром кривизны ее профиля. В процессе доводки, в результате возвратно-поступательного перемещения центра кривизны тора в направлении оси вращения детали, брусок совершает качательное движение, перекатываясь по профилю обрабатываемой поверхности. В данном способе рабочая поверхность инструмента выполнена в виде усеченного тора, так как образована в результате вращения бруска вокруг оси, перпендикулярной плоскости чертежа (см. рис. 4.1), а профиль ее поперечного сечения представляет собой

дугу окружности с радиусом, равным радиусу вращения обрабатываемой поверхности.

Таким образом, ось поворота торовой поверхности инструмента перпендикулярна оси вращения детали и не совпадает с центром кривизны ее профиля (в плоскости чертежа, см. рис. 4.1).

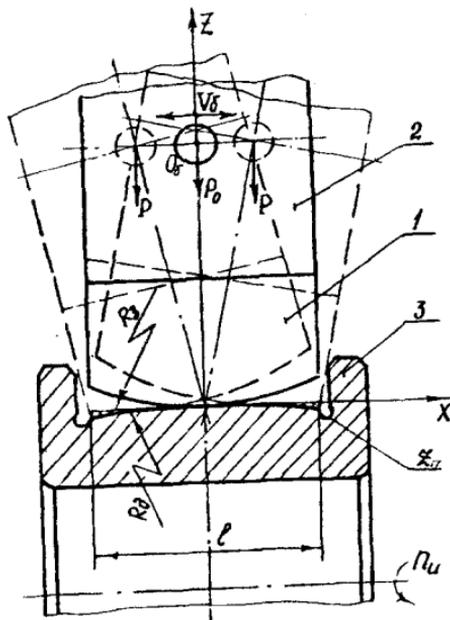


Рис. 4.1. Схема способа формирования выпуклого профиля дорожки качения кольца роликоподшипника на стадии суперфиниширования:
1 - брусок; 2 - державка; 3 - обрабатываемое кольцо

Радиус кривизны тора заведомо меньше радиуса кривизны профиля детали, что обеспечивает линейный контакт инструмента и детали, и при перекачивании тора вдоль профиля детали рабочая поверхность инструмента имеет возможность дифференцированно воздействовать на различные участки профиля обрабатываемой поверхности, в том числе и на участки, сопряженные с бортами. При постоянном режиме обработки обеспечивается равномерный съем металла по всему профилю детали, а значит, сохранение исходной

точности геометрической формы профиля заготовки. Кроме того, ширина рабочей части инструмента, равная длине образующей обрабатываемой поверхности, намного больше ширины брусков, используемых в известных способах, что является дополнительным источником увеличения производительности обработки. К тому же, в результате перекатывания бруска возникают благоприятные условия для очистки его рабочей поверхности от продуктов резания, что обеспечивает сохранение высоких режущих свойств.

Если же инструменту при перемещении вдоль профиля детали задавать переменную скорость или силу прижима к обрабатываемой поверхности в зависимости от заданного съема припуска в различных точках профиля, то можно будет не только обеспечить сохранение исходной формы профиля заготовки на стадии суперфиниширования, но и осуществить формирование нового профиля заданной геометрической формы.

Линейный контакт инструмента с деталью позволяет тонко регулировать съем металла на различных участках профиля обрабатываемой поверхности. Чем меньше скорость перемещения инструмента в той или иной точке профиля и больше сила его прижима к детали, тем больше время его контакта с деталью в этой точке, тем больший происходит съем металла и наоборот. На различных участках профиля детали можно снимать различный припуск, либо задавая переменную скорость перемещения инструмента при постоянной силе его поджима к детали, либо задавая изменение силы поджима инструмента к обрабатываемой поверхности при постоянной скорости перемещения бруска. Возможно и одновременное изменение силы прижима и скорости движения инструмента, но, в отличие от известных технических решений, они не обязательно должны изменяться по обратно пропорциональной зависимости, но так, чтобы эффект, например, увеличения съема металла на каком-то

участке профиля детали от увеличения силы прижима инструмента складывался с эффектом увеличения съема от уменьшения скорости перемещения бруска.

При жестком поджиге абразивного инструмента к обрабатываемой поверхности данный способ доводки будет иметь высокую исправляющую способность даже при постоянных режимах работы. Исправление погрешности профиля в процессе обработки будет происходить за счет естественного изменения давления при попадании режущей поверхности бруска на вершины неровностей и во впадины. При этом будут удаляться неровности любого шага.

Способ позволяет использовать многобрусковые суперфинишные головки [142, 143], что значительно увеличивает его эффективность.

С целью упрощения практической реализации способа исследуем возможность получения параболического профиля обрабатываемой поверхности при перемещении центра поворота бруска по закону косинуса:

$$x = A_6 \cos 2\pi n_6 \tau, \quad (4.1)$$

где x - величина перемещения центра поворота бруска из начального положения за время τ ;

A_6 - амплитуда возвратно-поступательного движения центра поворота бруска;

n_6 - частота осцилляции центра поворота бруска.

Найдя первую производную выражения (4.1) по времени, определим абсолютную величину скорости V_6 перемещения центра O_6 абразивного бруска:

$$|V_6| = A_6 2\pi n_6 \sin 2\pi n_6 \tau. \quad (4.2)$$

Решая уравнение (4.1) относительно $(2\pi n_6 \tau)$ и подставляя полученное выражение в равенство (4.2), определим:

$$|V_6| = A_6 2\pi n_6 \sin \cdot \arccos \frac{x}{A_6}. \quad (4.3)$$

При перекачивании бруска по обрабатываемому профилю без скольжения производительность съема припуска в любой точке поверхности обработки будет определяться временем контакта инструмента и заготовки в этой точке, которое зависит от скорости перемещения центра O_6 поворота бруска.

Подставляя выражение (4.3) в равенство (2.84) и учитывая, что $d_M=0$, а $|V_{cp.}| = 4A_6 n_6$, определим величину снимаемого припуска в любой точке обрабатываемого профиля:

$$t_x = N_3 \sqrt{1 + \left(\frac{V_u}{A_6 2\pi n_6 \sin \arccos \frac{x}{A_6}} \right)^2}, \quad (4.4)$$

где

$$N = \sqrt[3]{\left(\frac{0.038(k+1)\xi n_6^2 \tau A_6 P N_1}{(k+2)\tau_{сдв} k_3 (\xi+1)^3 n_u} \right) \cdot \left(\frac{\xi}{r_y} \right) \cdot \frac{B_k}{r_6 k_u}}. \quad (4.5)$$

Так как наибольшее значение синуса в равенстве (4.3) равно 1, то наибольшая скорость V_{6max} (по абсолютной величине) равна:

$$|V_{6max}| = 2\pi A_6 n_6. \quad (4.6)$$

Анализ выражения (4.3) показывает, что максимальную скорость абразивный брусок будет иметь тогда, когда его центр поворота попадет в плоскость симметрии обрабатываемого профиля, а точка контакта - в его середину. Тогда, с учетом выражения (4.6), можно определить величину снимаемого припуска в центре обрабатываемого профиля:

$$t_0 = N \cdot \sqrt[3]{1 + \left(\frac{V_u}{2\pi A_6 n_6} \right)^2}, \quad (4.7)$$

где

$$V_u = 2\pi r_y n_u . \quad (4.8)$$

С учетом выражений (4.4), (4.7) и (4.8) запишем уравнение профиля обработанной поверхности:

$$Z = t_0 \left[\frac{\sqrt[3]{1 + \frac{r_y n_u}{A_6 n_6 \sin \arccos \frac{x}{A_6}}}}{\sqrt[3]{1 + \left(\frac{r_y n_u}{A_6 n_6}\right)^2}} - 1 \right] \approx \quad (4.9)$$

$$\approx t_0 \left[\sqrt[3]{\frac{1}{\left(\sin \arccos \frac{x}{A_6}\right)^2} - 1} \right] .$$

Равенство (4.9) позволяет в зависимости от условий суперфиниширования определить форму полученного профиля обработанной поверхности.

Аппроксимируем выражение (4.9) степенной зависимостью вида:

$$Z_n = Ax^n . \quad (4.10)$$

Для этого необходимо подобрать такие значения параметров A и n , чтобы величина

$$M = \int_0^{l_g} (Z - Z_n)^2 dx , \quad (4.11)$$

где l_g - длина дорожки качения, была, по возможности, минимальной.

Перепишем выражение (4.11) с учетом равенств (4.9) и (4.10):

$$M = \int_0^{l_g/2} \left\{ t_0 \left[\sqrt{\frac{1}{\left(\sin \arccos \frac{x}{A_6} \right)^2}} - Ax^n \right] \right\}^2 dx. \quad (4.12)$$

Для определения минимального значения функции (4.12) найдем ее производные по переменным параметрам A и n и приравняем их к нулю:

$$\begin{cases} \int_0^{l_g/2} 2 \left\{ t_0 \left[\left(\sin \arccos \frac{x}{A_6} \right)^{-\frac{2}{3}} - 1 \right] - Ax^n \right\} x^n dx = 0, \\ \int_0^{l_g/2} 2 \left\{ t_0 \left[\left(\sin \arccos \frac{x}{A_6} \right)^{-\frac{2}{3}} - 1 \right] - Ax^n \right\} Ax^n \ln x dx = 0. \end{cases} \quad (4.13)$$

Решая систему уравнений (4.13) относительно A и n на ЭВМ, определим параметры аппроксимирующего выражения (4.10) с погрешностью:

$$\Delta = \frac{2M}{l_g}. \quad (4.14)$$

Результаты расчетов для различных режимов суперфиниширования представлены на рис. 4.2, 4.3, 4.4. Все зависимости получены для случая суперфиниширования дорожек качения наружных колец роликового подшипника 42207 тремя абразивными брусками с характеристикой 63СМ10СМ1КЛ при следующих условиях: $K=3$ [132], $\xi=1.34$ [132], $\tau_{сдв}=134$ кг/мм [132], $K_3=1$, $K_u=0.1$, $N_1=0.094$, $z_6=3$, $r_y=30.9$ мм, $B_6=9$ мм, $r_6=15$ мм, $n_u=3654$ об/мин, $P=6$ кг, $\tau=0.17$ мин.

На рис. 4.2 показано влияние амплитуды осцилляции A_6 брусков на значение показателя n и коэффициента A формы. Как видно, с увеличением амплитуды осцилляции величина показателя формы уменьшается, а коэффициент формы увеличивается. Сравнивая теоретические зависимости с данными экспериментов, видим, что максимальная погрешность расчета не превышает 9%, а в некоторых случаях расчетные и экспериментальные значения совпадают (см.рис.4.2).

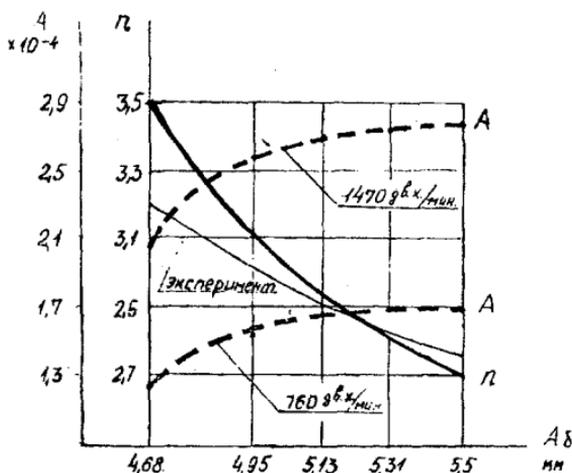


Рис. 4.2. Зависимость показателя n и коэффициента A формы от амплитуды и частоты осцилляции брусков

Анализ полученных результатов доказывает, что показатель формы мало зависит от частоты осцилляции брусков, силы их давления на обрабатываемую поверхность, частоты вращения заготовки и времени обработки. Это позволило максимально упростить выражение (4.9). Однако на практике в результате действия факторов, не учтенных в теоретических расчетах, влияние перечисленных параметров на величину показателя формы будет более существенным.

В отличие от показателя n , коэффициент формы A в большей степени зависит от режимов суперфиниширования. С увеличением частоты осцилляции брусков n_6 коэффициент формы A увеличивается (рис.4.3). Его повышение наблюдается и с увеличением всех остальных технологических факторов процесса, кроме частоты вращения изделия $n_в$, влияние которой на параметры формы обработанного профиля недостаточно ярко выражено.

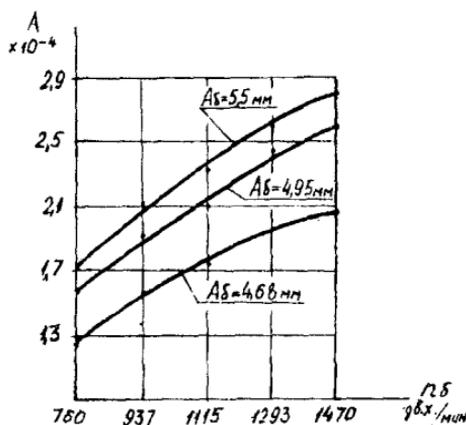


Рис. 4.3. Зависимость коэффициента формы A от частоты и амплитуды осцилляции брусков

Увеличение коэффициента формы равнозначно росту величины выпуклости δ дорожки качения, так как эти два показателя связаны следующей зависимостью:

$$\delta = A \left(\frac{1}{2} \right)^n \quad (4.15)$$

График зависимости величины выпуклости дорожки качения от частоты осцилляции брусков представлен на рис.4.4. Как видно, с увеличением частоты осцилляции брусков значение коэффициента формы возрастает.

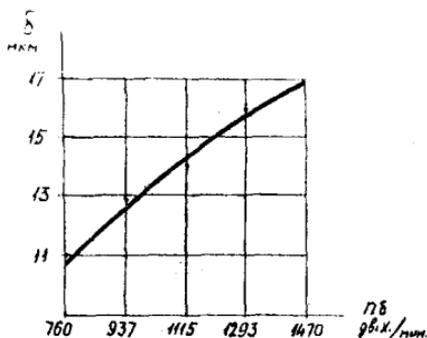


Рис. 4.4. Зависимость величины выпуклости роликовой дорожки от частоты осцилляции брусков

Наряду с анализом формы профиля обрабатываемой поверхности полученные выражения позволяют судить о производительности исследуемого способа обработки, а также о влиянии на нее различных технологических факторов. Так, на рис.4.5 показано влияние частоты осцилляции брусков на интенсивность снимаемого припуска. С увеличением частоты осцилляции брусков производительность процесса увеличивается. Следует отметить хорошую согласованность теоретических зависимостей с экспериментальными данными, полученными при обработке заготовок на специальном суперфинишном станке для многобрусковой доводки дорожек качения колец подшипников.

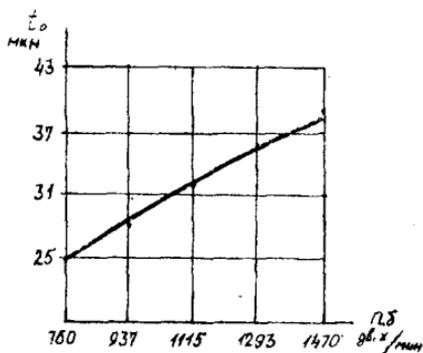


Рис. 4.5. Зависимость величины снимаемого припуска от частоты осцилляции брусков

Таким образом, анализ полученных зависимостей показывает, что исследуемый способ суперфиниширования с осевой прямолинейной осцилляцией инструмента позволяет эффективно формировать параболический профиль обрабатываемой поверхности.

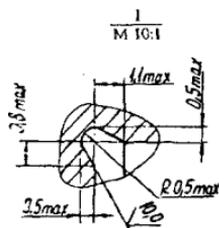
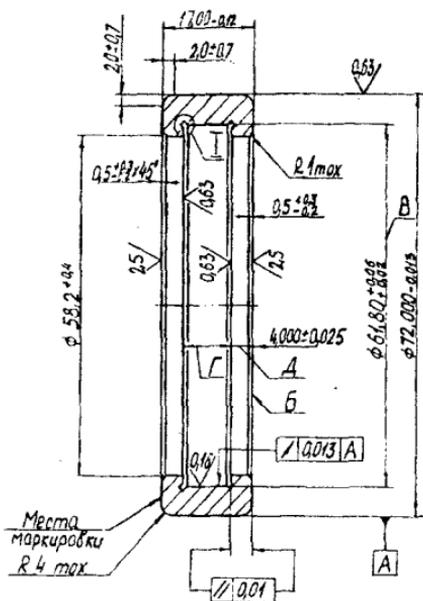
Меняя режимы доводки, можно управлять величиной снимаемого на любом участке профиля припуска, обеспечивая требуемые параметры обработанного профиля.

4.2. Объект и условия проведения экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования данного метода суперфиниширования роликовых дорожек выполняли в два этапа. На первом этапе исследовали влияние амплитуды (A_6) и частоты (n_6) осцилляции брусков, давления брусков на обрабатываемую поверхность (P_6) и частоты вращения изделия (n_u) на величину съема металла (q), показатель формы профиля обработанной поверхности (n), величину выпуклости профиля (δ) и шероховатость поверхности (R_a). На втором этапе исследовали влияние на величину съема металла (q), параметры формы профиля (n , δ) и шероховатость (R_a) времени обработки, твердости и зернистости брусков. Весь цикл экспериментальных исследований проводился на опытном образце суперфинишного автомата для многобрусковой доводки колец подшипников, позволяющем в широких пределах варьировать значения исследуемых факторов.

В качестве объекта исследований использовали наружные кольца радиального роликового подшипника 42207 (рис.4.6), как наиболее типичного „представителя” продукции, выпускаемой отечественной подшипниковой промышленностью. Исследуемые кольца изготовлены из стали ШХ-15 ГОСТ 801-78 и термически обработаны до твердости

HRC₂ 61...65. Выбор этой стали для проведения экспериментальных исследований обусловлен ее широким применением для производства деталей подшипников самых массовых серий, а также других ответственных деталей машиностроения, работающих в сложных условиях эксплуатации. Химический состав стали ШХ-15 обеспечивает ей высокие физико-механические свойства. Кольца были обработаны окончательно по всем поверхностям, кроме роликовых дорожек, и предназначены для подшипников 6 класса точности по ГОСТ 520-71. На предшествующих операциях роликовые дорожки подвергались предварительному и окончательному шлифованию и имели следующие показатели: шероховатость - $R_a=0.6-0.32$ мкм, волнистость $W_z=0.5-1.2$ мкм, отклонение от круглости $\Delta_{кр}=1.2-3.2$ мкм. Обработку производили одновременно тремя абразивными брусками, имеющими одинаковые размеры и характеристику и расположенными на обрабатываемой поверхности с равным угловым шагом (рис. 4.7).



1. HRC₂ E2...66.
2. Непостоянство единичной ширины кольца не далее 0,02 мм.
3. Непостоянство диаметра дорожки качения не далее 0,009 мм.
4. Кочувобразность дорожки качения не далее 0,004 мм.
5. Биение дорожки качения относительно торца Б не далее 0,008 мм.
6. Выпуклость образующей дорожки качения не далее 0,005 мм.
7. Волнистость дорожки качения не далее 0,0008 мм.
8. Допускается исполнение размера Г (3,90±0,03) мм или (3,91±0,01) мм; размера Д (4,0±0,1) мм; размера В (6,8±0,1) мм.
9. Остальные технические требования по ТУ 37.008.000-80.
10. Материал: Сталь ШХ-15 ГОСТ 801-78.

Рис. 4.6. Наружное кольцо роликоподшипника 42207

Условия проведения экспериментальных исследований представлены в табл. 4.1. Они были определены на основе изучения работ ряда авторов, расчетов и теоретических исследований, а также путем анализа результатов предварительных опытов [94-111].

Таблица 4.1

Условия проведения экспериментальных исследований

| Наименование факторов процесса | Численные значения факторов | Единицы измерения |
|---------------------------------------|---|----------------------------------|
| 1 | 2 | 3 |
| Абразивные бруски | БП12х663СМ10СМ1КЛ БП12х663СМ7М1КЛ БП12х663СМ14М1КЛ БП12х663СМ14СМ1КЛ | 3 шт. 3 шт. 3 шт. 3 шт. |
| Длина бруска с державкой | 15 | мм |
| Частота осцилляции брусков | 760-1470 | дв.х./мин |
| Давление на бруски | 0.82-0.27 | МПа |
| Частота вращения изделия | 1061-3654 | об/мин |
| Амплитуда осцилляции брусков | 1.5-2.5 | мм |
| Время врезания | 3-24 | с |
| Время выхаживания | 1-10 | с |
| Твердость абразивных брусков | 20-50 | НРА |
| Зернистость абразивных брусков | М7 - М14 | мкм |
| Смазывающе-охлаждающая жидкость (СОЖ) | смесь из велосита(88%), керосина (10%) и олеиновой кислоты (2%) | % |
| Способ подачи СОЖ | поливом | - |
| Расход СОЖ | 20 | л/мин |

Факторы, их уровни и интервалы варьирования при проведении всего экспериментального цикла приведены в табл. 4.2 и 4.3. Расчеты произведены по формулам методики [138].

Первый этап экспериментов проводился с использованием абразивных брусков с характеристикой 63СМ10СМ1КЛ, а продолжительность обработки составляла 10 секунд. На втором этапе исследований режимы обработки имели следующие значения: частота вращения изделия - 3654 об/мин, амплитуда осцилляции брусков - 1,5 мм, частота осцилляции брусков - 760 дв.х./мин, давление брусков на обрабатываемую поверхность - 0.54 МПа.

На всех этапах исследований ставили полные факторные эксперименты типа 2^4 . Результаты обработки данных заносили в журнал планирования эксперимента.

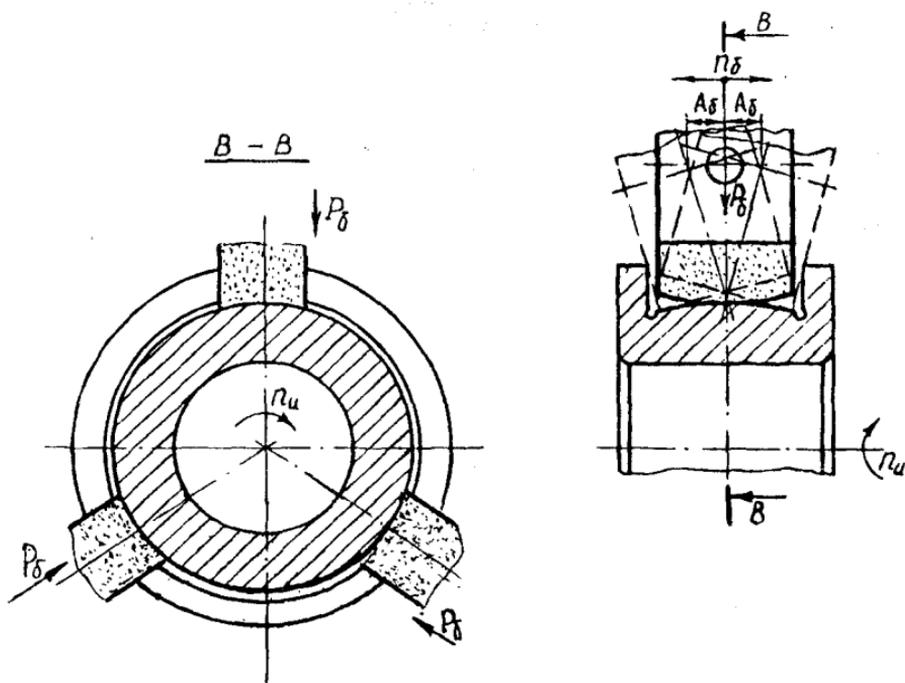


Рис. 4.7. Схема многобрускового суперфиниширования дорожек качения роликоподшипников с осевой прямолинейной осцилляцией инструмента

Действительные значения факторов, изучаемых на первом этапе экспериментальных исследований

| Уровни | Факторы процесса в единицах измерения | | | |
|-----------------------|---------------------------------------|-------------------------------|-------------------------|----------------------------|
| | A ₆ (мм) | n ₆ (дв.х./мин) | P ₆ (МПа) | n ₆ (об/мин) |
| Верхний | 2.5 | 1470 | 0.82 | 3654 |
| Нижний | 1.5 | 760 | 0.27 | 1061 |
| Основной | 2 | 1115 | 0.545 | 2357.5 |
| Интервал варьирования | 0.5 | 355 | 0.275 | 1296.5 |
| Кодовые обозначения | X ₁ | X ₂ | X ₃ | X ₄ |

Таблица 4.3

Действительные значения факторов, изучаемых на втором этапе экспериментальных исследований

| Уровни | Факторы процесса в единицах измерения | | | |
|-----------------------|---------------------------------------|------------------------|----------------|----------------|
| | T _{вр.} (с) | T _{в.} (с) | HRA (ед.) | Z (мин) |
| Верхний | 24 | 10 | 50 | 14 |
| Нижний | 3 | 1 | 20 | 7 |
| Основной | 13.5 | 5.5 | 35 | 10.5 |
| Интервал варьирования | 10.5 | 4.5 | 15 | 3.5 |
| Кодовые обозначения | X ₁ | X ₂ | X ₃ | X ₄ |

4.3. Экспериментальное оборудование

Общий вид экспериментального двухпозиционного суперфинишного автомата с горизонтальным расположением шпинделей изделий представлен на рис. 4.8. Массивная чугунная станина 2 автомата несет два поперечных суппорта 1, на подвижных каретках которых установлены механизмы осцилляции 6 с электроприводами и устройства подачи брусков с инструментальными

головками 7. В качестве электроприводов использованы двухскоростные электродвигатели с набором сменных шкивов, позволяющие в широких пределах варьировать частоту осцилляции брусков. Оригинальная конструкция механизмов осцилляции инструментальных головок позволяет в процессе обработки изменять амплитуду осцилляции от 0 до 3 мм в соответствии с делениями на лимбе ручки управления. Для осуществления подвода брусков к обрабатываемой поверхности, создания рабочего давления в зоне обработки и отвода брусков от обработанной поверхности применены пневмоцилиндры двухстороннего действия. Станок имеет двухскоростной электродвигатель главного движения, который посредством клиноременной передачи связан с двумя высокоточными шпиндельными узлами 4.

Для центрирования заготовок во время обработки предусмотрены гидростатические опоры 14, а для фиксации колец в рабочем положении - механизм прижима к торцу вращающегося шпинделя.

Станок снабжен автоматическим устройством 9 доставки заготовок в зону обработки и удаления готовых изделий из рабочей зоны, а также загрузки и выгрузки колец.

Конструкцией станка предусмотрено устройство компенсации износа брусков, которое осуществляет автоматическое регулирование амплитуды осцилляции инструментальных головок в зависимости от износа брусков. В станине смонтирована насосная установка 3 гидросистемы станка и устройство для центробежной очистки СОЖ.

Станок может работать в наладочном и автоматическом режимах. При функционировании станка в автоматическом режиме рабочий цикл состоит из следующих этапов: подача заготовки на

рабочую позицию, фиксация заготовки в рабочем положении, быстрый подвод инструментальных головок в зону обработки, быстрый подвод брусков к обрабатываемой поверхности и создание рабочего давления, работа в режиме врезания, работа в режиме выхаживания, быстрый отвод брусков от обрабатываемой поверхности, быстрый вывод инструментальных головок из рабочей зоны, освобождение кольца от усилия зажима, удаление обработанной детали с рабочей позиции и подача новой заготовки.

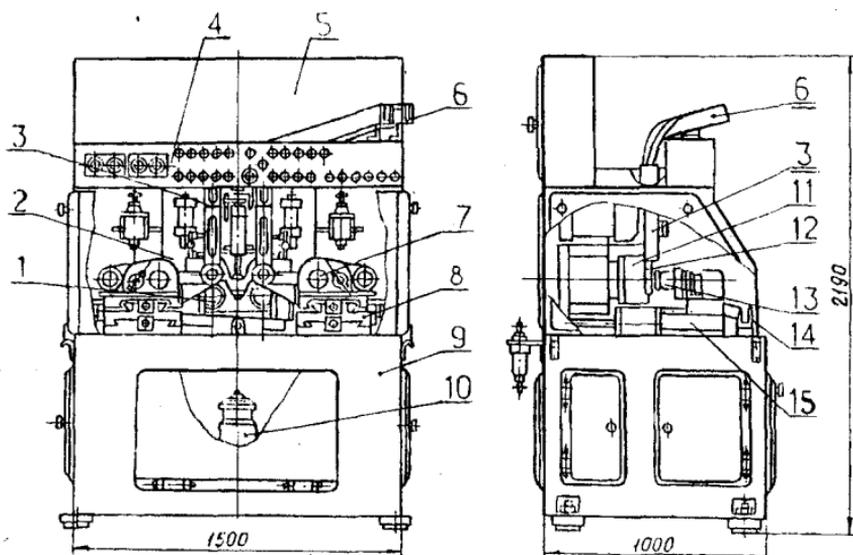


Рис. 4.8. Общий вид суперфинишного автомата МФ-1

Пневогидравлическая схема (приложение I) позволяет наглядно показать работу автомата. Сжатый воздух под давлением 0,5 МПа из цеховой системы, проходя через фильтр-влагодетель 21, регулятор давления 23, маслораспылитель 22 и реле давления 12, подходит к воздухораспределителю 13 (6). При включении станка в

автоматический режим работы электрический сигнал поступает на соленоид воздухораспределителя 13 (6), который открывает золотник. Сжатый воздух, проходя через воздухораспределитель 13 (7), поступает в пневмоцилиндры 1 (1), 1 (2) и подает шток поршня механизма штучной выдачи изделий, обеспечивая поступление заготовок на рабочие позиции станка. Включается воздухораспределитель 13 (1), воздух поступает в масляный бачок 3 (1) и создает давление в этом бачке, выжимая масло из него. Масло под давлением из бачка 3 (1) перемещает штоки пневмогидроцилиндров механизмов зажима изделий, обеспечивая зажим заготовок на рабочих позициях.

Насосная установка 19 обеспечивает подачу масла в гидродинамические опоры 8 (1), 8 (2) изделий и подачу СОЖ в рабочую зону. Электрический сигнал от механизма зажима изделий поступает на соленоид воздухораспределителя 13 (5), сжатый воздух поступает в масляный бачок 3 (2), масло под давлением из этого бачка выжимается в пневмогидроцилиндры 5, 6 суппортов, обеспечивая быстрый подвод механизмов осцилляции и инструментальных головок к рабочей зоне. После подвода инструментальных головок к изделию концевые выключатели, расположенные на суппортах, включают электродвигатели механизмов осцилляции и управления амплитудой, а также воздухораспределители 13 (3), 13 (4) механизмов подачи брусков инструментальных головок. В это время происходит подвод абразивных брусков к обрабатываемой поверхности изделия штоками пневмоцилиндров 10, 11.

После окончания обработки изделия воздухораспределители 13 (4) переключаются и пневмоцилиндры 10, 11 обеспечивают отвод брусков от обработанной поверхности изделий. Затем переключается воздухораспределитель 13 (5), сжатый воздух поступает через дроссели 4 (2), 4 (7) в пневмогидроцилиндры 5, 6, обеспечивая отвод суппортов в

исходное положение вместе с механизмами осцилляции и инструментальными головками.

Концевой выключатель на суппортах переключает воздухораспределитель 13 (1) и сжатый воздух, поступаая через дроссели 4 (1), 4 (6) в пневмоцилиндры 9 (1), 9 (2), отводит вилки механизмов зажима изделий в исходное положение. Концевые выключатели механизмов зажима изделий переключают воздухораспределитель 13 (2) и сжатый воздух, проходя через дроссель 4 (9), поступает в пневмоцилиндр 7 автооператора и обеспечивает удаление из рабочих зон автомата обработанных изделий. Затем цикл повторяется.

Автомат спроектирован согласно требованиям техники безопасности [166]. Электрошкаф станка снабжен устройством, обеспечивающим отключение вводного автомата при открывании дверцы электрошкафа. Корректированный уровень звуковой мощности не превышает 99 Дб согласно требованиям [167]. Направление вращения рукояток соответствует требованиям [168]. Автомат по расположению органов управления и элементов наладки отвечает требованиям эргономики и соответствует условиям [169].

При ремонте станка не требуется разбирать соседние с ремонтируемой сборочной единицей узлы.

Техническая характеристика автомата представлена в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Техническая характеристика автомата

| Наименование параметра | Численное значение | |
|-------------------------|--------------------|------|
| 1 | 2 | |
| Габаритные размеры, мм: | длина | 1500 |
| | ширина | 1000 |
| | высота | 2190 |

Продолжение таблицы 4.4

| | |
|---|--------------------------|
| Масса станка, кг | 3700 |
| Наибольший диаметр обрабатываемого кольца, мм | 90 |
| Количество суппортов | 2 |
| Число позиций | 2 |
| Расстояние между инструментальными головками, мм | 240 |
| Диапазон хода суппортов, мм | 0 ... 70 |
| Количество одновременно обрабатываемых изделий | 2 |
| Частота вращения шпинделя, об/мин: максимальная | 3900 |
| минимальная | 1000 |
| Частота осцилляции инструментальных головок, дв.х./мин: | |
| максимальная | 2000 |
| минимальная | 760 |
| Диапазон амплитуд осцилляции инструментальных головок, мм | 0 ... 3 |
| Количество абразивных брусков в инструментальной головке | 1 ... 6 |
| Давление бруска на изделие, МПа | 0.2 ... 2 |
| Род питающей сети | переменный трехфазный |
| Частота тока, Гц | 50 |
| Напряжение питания, В | 380 |
| Количество электродвигателей | 6 |
| Установленная мощность электрооборудования, кВт | 4 |
| Производительность насоса гидропривода, л/с | 6.6 |
| Давление воздуха питающей сети, МПа | 0.4 ... 0.5 |
| Число пневмогидроцилиндров, шт. | 9 |
| Число воздухораспределителей, шт. | 7 |
| Число дросселей, шт. | 9 |

На первом этапе экспериментов исследования проводились при работе станка в режиме врезания, при этом время выхаживания, устанавливаемое с помощью реле времени, было равно нулю, и цикл обработки возобновлялся после окончания режима врезания.

Для обработки применялась инструментальная головка, показанная на рис. 4.9. Она состоит из корпуса 1, имеющего три радиальных паза, в которых расположены ползушки 2, с установленными на них посредством осей 5 держателями 9 брусков 4. Для осуществления перемещения ползушек 2 в радиальном направлении в корпусе 1 головки помещены разжимные конусы 6, жестко связанные со штоком подачи 8. Рычаги 7, шарнирно связанные с ползушками 2 и штоком подачи 8, обеспечивают возврат ползушек 2 в исходное положение при обратном ходе штока подачи 8 после окончания обработки.

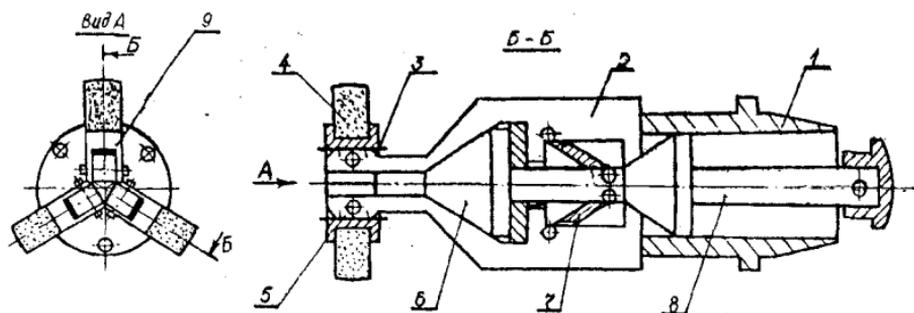


Рис. 4.9. Многобрусковая суперфинишная головка для доводки дорожек качения наружных колец подшипников

Для проведения экспериментальных исследований станок оснастили контрольно-измерительными приборами. Контроль частоты вращения изделия и частоты осцилляции инструментальных головок осуществляли с помощью измерительных дисков, установленных на шкивах шпинделей изделий и механизмов осцилляции, взаимодействующих с индукционными датчиками, электрически связанными с цифровыми тахометрами модели ТЦ - 5.

Амплитуду осцилляции инструментальных головок фиксировали по лимбу на ручке управления. Силу давления абразивных брусков на обрабатываемую поверхность контролировали динамометром модели ДП-20, который устанавливали на лоток подачи заготовок в рабочую зону с возможностью взаимодействия с одной из ползушек инструментальной головки.

Время цикла обработки устанавливали с помощью реле времени. Контроль остальных параметров обработки осуществляли в соответствии с методикой, изложенной в главе 3.

4.4. Исследование влияния режимов обработки на ее выходные параметры

В результате обработки экспериментальных данных получены зависимости выходных параметров обработки дорожек качения от режимов суперфиниширования:

$$\begin{aligned}
 n &= 16.039A_6^{-1.037} n_6^{-0.379} P_6^{-0.497} n_u^{0.217}, \\
 \delta &= 0.436A_6^{1.241} n_6^{0.670} P_6^{0.481} n_u^{-0.359}, \\
 q &= 0.00015A_6^{0.802} n_6^{1.361} P_6^{1.239} n_u^{0.320}, \\
 R_a &= 0.0703A_6^{0.912} n_6^{0.261} P_6^{0.383} n_u^{-0.181}.
 \end{aligned}
 \tag{4.16}$$

Данные зависимости получены при обработке абразивными брусками с характеристикой 63СМ10СМ1КЛ в течение 10 секунд.

Из рис. 4.10, на котором представлены зависимости показателя формы n и величины выпуклости δ профиля дорожки качения от амплитуды A_6 осцилляции абразивных брусков при различных частотах вращения n_u обрабатываемого изделия, видно, что с увеличением амплитуды осцилляции брусков показатель формы профиля дорожки качения уменьшается, т.е. кривизна профиля в

области середины роликовой дорожки возрастает, а на краях уменьшается. При этом величина выпуклости дорожки качения увеличивается. Это объясняется тем, что с повышением амплитуды колебаний брусков возрастает скорость их перемещения по обрабатываемой поверхности, а значит, и число контактов бруска с каждой точкой обрабатываемого профиля, что приводит к увеличению съема металла на всей поверхности обработки. Кроме того, с повышением амплитуды колебания брусков увеличивается угол их микроповорота вокруг осей в конце каждого хода инструментальной головки, и в начальный период обработки резко возрастает удельное давление брусков на обрабатываемую поверхность в крайних зонах дорожки качения с увеличением числа их попаданий в эти зоны. При этом в начале обработки в местах максимального удельного давления происходит интенсивный сьем металла и формируется выпуклый профиль обрабатываемой поверхности.

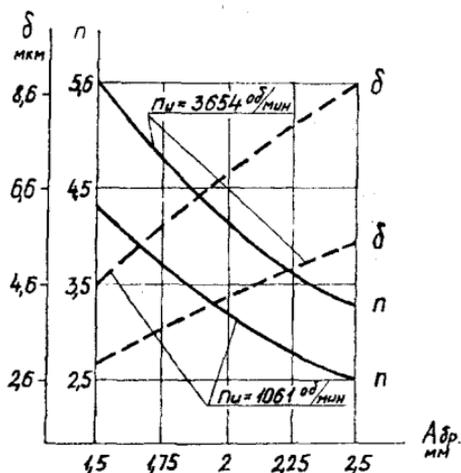


Рис. 4.10. Зависимость показателя формы n и величины выпуклости δ обработанной дорожки качения от амплитуды осцилляции брусков $A\delta$ и частоты вращения изделия n_n при $n_s=760$ об.х./мин, $P_s=0.82$ МПа, $T_{ap}=10$ с.

На заключительной стадии обработки, в результате приработки абразивных брусков к обрабатываемой поверхности, максимальное удельное давление снижается и возникает уже за счет дополнительной микроподачи в конце каждого хода инструментальной головки. Оно теперь приходится не на самые крайние зоны дорожки качения, как в начале обработки, а на зоны, прилегающие к крайним. Таким образом, максимум удельного давления с течением времени смещается к центру профиля обрабатываемой поверхности, и он становится более пологим, хотя и с достаточно высокой величиной выпуклости. Полученные результаты хорошо согласуются с теоретическими расчетами.

С повышением частоты вращения n_d изделия картина уменьшения показателя формы профиля p и увеличения величины выпуклости δ с ростом амплитуды осцилляции брусков A_s остается прежней, но изменение p происходит на более высоком уровне значений, а изменение δ - на более низком уровне. Это связано с тем, что в данном случае увеличение частоты вращения изделия способствует возрастанию съема металла во всех точках профиля обрабатываемой поверхности на всех этапах обработки. При этом снижается величина выпуклости профиля и возрастает его показатель формы.

На рис. 4.11 показана зависимость формы профиля и величины выпуклости роликовой дорожки от давления P_s брусков на обрабатываемую поверхность при обработке с различной частотой вращения изделия и постоянными значениями амплитуды и частоты осцилляции n_s брусков, когда $A_s=1.5$ мм, $n_s=760$ дв.х./мин, а время обработки составляло 10 секунд.

Как видно, с увеличением давления брусков на обрабатываемую поверхность показатель формы профиля дорожки качения уменьшается, а ее выпуклость увеличивается. Увеличение давления в

зоне обработки обеспечивает рост размеров площадки контакта брусков с изделием и глубины внедрения зерен в обрабатываемую поверхность. При этом средняя часть брусков, в отличие от краевых участков, практически не отрывается от поверхности обработки, что затрудняет самозатачивание и отвод продуктов резания.

Поэтому интенсивность съема металла в крайних зонах дорожки качения значительно выше, чем в любой другой точке профиля. В результате этого увеличивается величина выпуклости дорожки качения и уменьшается показатель формы ее профиля. При невысоких значениях давления съем металла на большей части профиля дорожки качения примерно одинаков, а небольшой его рост наблюдается в малых по размерам самых крайних зонах дорожки качения. При этом профиль роликовой дорожки в средней ее части приближается к прямолинейному, а по краям закругляется с малым радиусом кривизны. Профиль имеет высокое значение показателя формы и малую величину выпуклости.

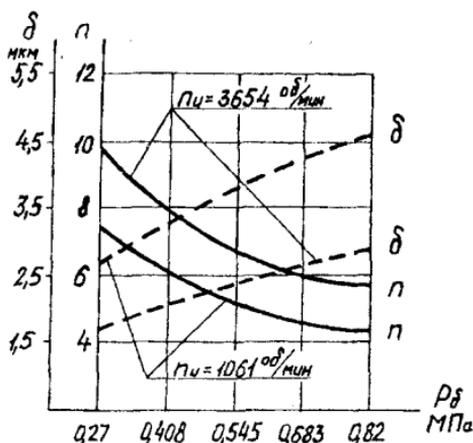


Рис. 4.11. Зависимость показателя формы n и величины выпуклости дорожки качения δ от давления брусков P_{δ} и частоты вращения изделия n_u при $A_{\delta}=1.5$ мм, $n_{\delta}=760$ дв.х./мин, $T_{op.}=10$ с.

С увеличением значения показателя формы средняя часть профиля все больше соответствует прямой линии, а радиус кривизны его краев все более уменьшается.

Повышение частоты вращения изделия не изменяет механизма формирования профиля, но за счет увеличения производительности съема припуска возрастает значение показателя формы и снижается выпуклость профиля.

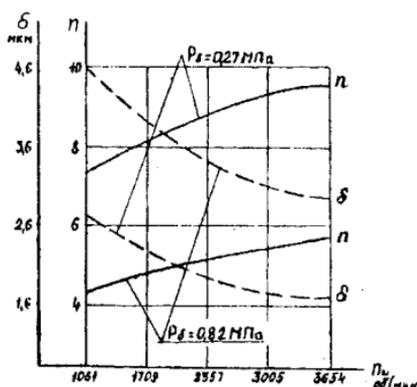


Рис. 4.12. Зависимость показателя формы n и величины выпуклости дорожки качения δ от частоты вращения изделия n_n и давления брусков P_δ при $n_s=760$ об./мин. $A_\delta=1.5$ мм. $T_{op}=10$ с.

Как видно из рис. 4.12, при больших давлениях брусков рост показателя формы идет менее интенсивно, а снижение δ - более интенсивно, чем при малых давлениях.

Увеличение частоты осцилляции брусков (рис. 4.13) приводит к уменьшению показателя формы и увеличению величины выпуклости дорожек качения. При малых значениях амплитуды колебания брусков это уменьшение идет более интенсивно и происходит в области высоких значений n , а при увеличении амплитуды осцилляции интенсивность уменьшения показателя формы снижается и снижение происходит на более низком уровне значений n . Это связано с тем, что при малых амплитудах осцилляции брусков их средняя часть не

успевают очиститься от продуктов резания, в то время как условия очистки краевых участков значительно лучше.

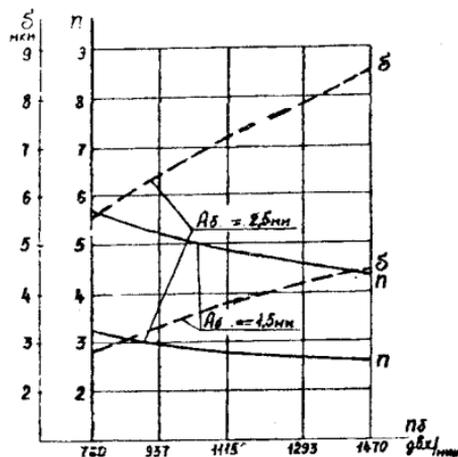


Рис. 4.13. Зависимость показателя формы n и величины выпуклости дорожки качения δ от частоты $n\delta$ и амплитуды $A\delta$ осцилляции брусков при $n_0 = 3654$ об/мин. $P_\delta = 0,82$ МПа, $T_{op} = 10$ с.

Поэтому с увеличением частоты осцилляции брусков интенсивность резания увеличивается лишь на самых крайних участках профиля, что приводит к незначительному росту величины его выпуклости и к снижению значения показателя формы.

При работе с большими амплитудами осцилляции улучшаются условия очистки всей режущей поверхности брусков и увеличение частоты осцилляции способствует интенсификации резания на любом участке обрабатываемого профиля. При этом изменение параметров профиля идет более интенсивно.

Экспериментальная проверка теоретических предпосылок показала, что, действительно, меняя режимы суперфиниширования при доводке многобрусковой головкой, можно получить любую форму профиля дорожки качения с широким диапазоном величин выпуклости.

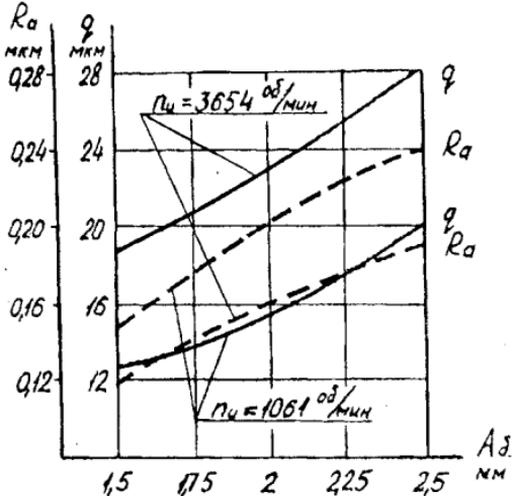


Рис. 4.14. Зависимость производительности q обработки и шероховатости R_a обработанной поверхности от амплитуды осцилляции брусков A_δ и частоты вращения изделия n при $n_s = 760$ дв.х./мин, $P_s = 0.82$ МПа, $T_{sp} = 10$ с.

На рис. 4.14-4.17 показаны зависимости производительности q обработки и шероховатости R_a обработанной поверхности от значений варьируемых факторов доводки. Как видно, исследуемому процессу многобрускового суперфиниширования присущи те же закономерности изменения данных параметров обработки в зависимости от ее режимов, что и при традиционных методах суперфиниширования. Однако в результате улучшения условий очистки рабочей поверхности от продуктов резания и увеличения количества одновременно участвующих в работе зерен, за счет применения нескольких абразивных брусков, удалось значительно повысить производительность съема припуска на всех режимах доводки и обеспечить незатухающий характер резания.

С увеличением амплитуды осцилляции брусков шероховатость поверхности и производительность обработки увеличиваются (см. рис. 4.14, 4.17).

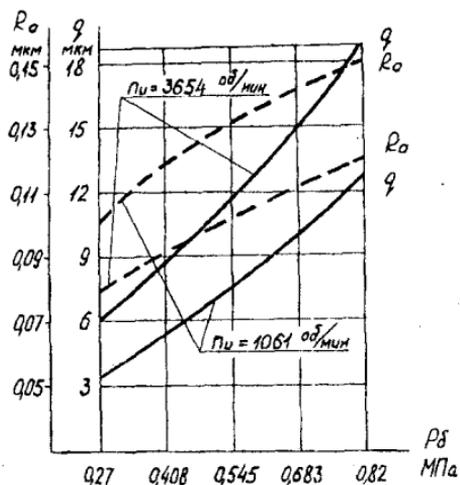


Рис. 4.15. Зависимость производительности q обработки и шероховатости R_a обработанной поверхности от давления P_δ брусков и частоты вращения изделия n_{II} при $A_\delta = 1.5$ мм, $n_\delta = 760$ дв. х./мин, $T_{сп.} = 10$ с.

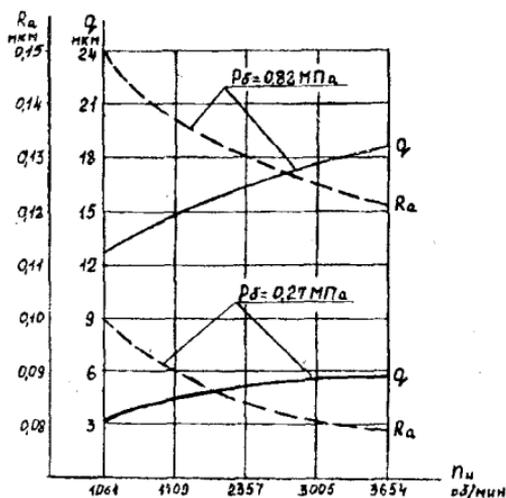


Рис. 4.16. Зависимость производительности q обработки и шероховатости R_a обработанной поверхности от частоты вращения изделия n_{II} и давления P_δ брусков при $n_\delta = 760$ дв. х./мин, $A_\delta = 1.5$ мм, $T_{сп.} = 10$ с.

Это происходит потому, что увеличивается скорость перемещения брусков вдоль поверхности обработки, абразивные зерна начинают более интенсивно взаимодействовать с микронеровностями обрабатываемой поверхности, улучшаются условия самозатачивания, возрастает число контактов бруска с каждой точкой профиля поверхности обработки в единицу времени. При повышении частоты вращения изделия (см. рис. 4.15, 4.16) производительность съема припуска увеличивается, а шероховатость обработанной поверхности снижается.

Объясняется это тем, что в данном случае также увеличивается число контактов абразивных зерен с микровыступами обрабатываемой поверхности в единицу времени, что способствует, как было отмечено ранее, увеличению производительности обработки. Однако время единичного контакта режущих зерен с микровыступами уменьшается, снижается глубина внедрения режущей части зерен в поверхность обработки и, соответственно, уменьшается высота микронеровностей обработанной поверхности.

Влияние удельного давления на производительность процесса обработки и шероховатость обработанной поверхности показано на рис. 4.15, 4.16. Из графиков видно, что с увеличением удельного давления производительность процесса резания, шероховатость поверхности возрастают. Это связано с более глубоким проникновением режущих зерен в металл. Поэтому увеличение удельного давления ограничивается непроизводительным износом абразивных брусков и ухудшением шероховатости поверхности обработки.

Повышение частоты колебаний инструмента (см. рис. 4.17) приводит к увеличению производительности обработки и шероховатости обработанной поверхности. При этом, за счет увеличения динамических нагрузок на рабочие зерна, происходит

активное обновление режущих граней, повышение глубины их внедрения в металл, что приводит к интенсификации процесса резания и, как следствие, к увеличению высоты микронеровностей обработанной поверхности.

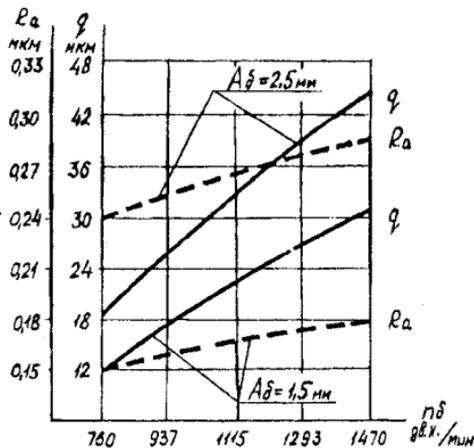


Рис. 4.17. Зависимость производительности q обработки и шероховатости R_a обработанной поверхности от частоты n_s и амплитуды A_δ осцилляции брусков при $n_n=3654$ об/мин, $P_\delta=0.82$ МПа, $T_{sp}=10$ с.

Сравнение полученных зависимостей с результатами исследований традиционных процессов суперфиниширования и хонингования показывает, что они не противоречат общепринятым представлениям.

4.5. Исследование влияния продолжительности цикла обработки и характеристики инструмента на результаты суперфиниширования

Математическая обработка экспериментальных данных второго этапа исследований позволила получить степенные зависимости параметров обработки от времени и структуры рабочего цикла суперфиниширования, а также от факторов, характеризующих

применяемый абразивный инструмент. Эти зависимости имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 n &= 971.654 T_{\text{вр.}}^{-0.342} T_{\text{в}}^{-0.174} \text{HRA}^{-0.726} Z^{-0.484}, \\
 \delta &= 0.028 T_{\text{вр.}}^{0.515} T_{\text{в}}^{0.444} \text{HRA}^{0.496} Z^{0.900}, \\
 q &= 1.976 T_{\text{вр.}}^{0.479} T_{\text{в}}^{-0.253} \text{HRA}^{-0.310} Z^{0.641}, \\
 R_a &= 0.052 T_{\text{вр.}}^{-0.299} T_{\text{в}}^{-0.460} \text{HRA}^{0.153} Z^{0.779}.
 \end{aligned}
 \tag{4.17}$$

Для удобства анализа и большей наглядности приведем графические интерпретации полученных зависимостей. Так, из рис. 4.18, на котором представлена зависимость показателя формы и величины выпуклости роликовой дорожки от продолжительности цикла обработки, видно, что с увеличением времени врезания абразивных брусков от 4 до 12 секунд значение показателя формы резко снижается, а величина выпуклости увеличивается.

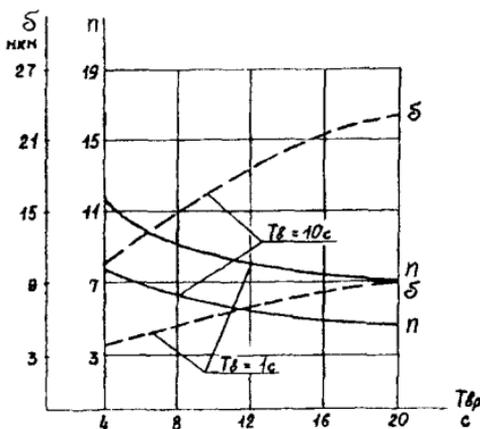


Рис. 4.18. Зависимость показателя формы n и величины выпуклости δ роликовой дорожки от времени врезания $T_{\text{вр.}}$ и времени выжигания $T_{\text{в}}$, при $\text{HRA}=40$, $Z=M14$

Дальнейшее увеличение времени врезания оказывает слабое влияние на изменение показателя формы и величины выпуклости. Это говорит о том, что активное формирование формы профиля обрабатываемой поверхности происходит в начальный период обработки, когда абразивный инструмент еще не успел приработаться к обрабатываемой поверхности. Однако процесс профилирования поверхности обработки полностью не прекращается даже при работе абразивных брусков в режиме выхаживания.

Как видно из рис. 4.19, с увеличением времени выхаживания значение показателя формы уменьшается. Это происходит оттого, что исследуемый процесс суперфиниширования обладает повышенной режущей способностью. Кинематика перемещения инструмента обеспечивает благоприятные условия для постоянной очистки режущей поверхности брусков от продуктов резания. Поэтому рабочая поверхность инструмента не засаливается даже при работе в режиме выхаживания.

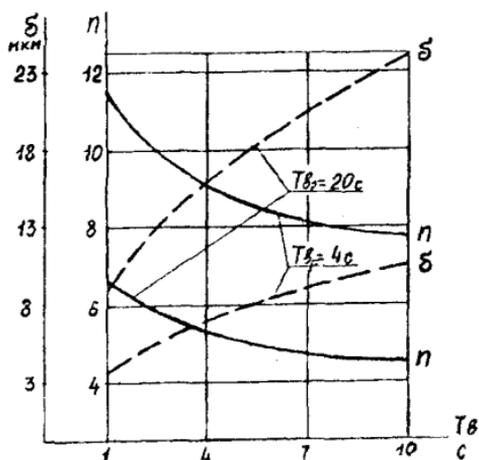


Рис. 4.19. Зависимость показателя формы n и величины выпуклости δ роликовой дорожки от времени выхаживания $T_{в}$ и времени врезания $T_{вр}$ при $HRA=40$, $Z=M14$

Влияние твердости и зернистости абразивных брусков на параметры обрабатываемого профиля показано на рис. 4.20 и 4.21. Повышение твердости брусков способствует снижению значения показателя формы и возрастанию величины выпуклости.

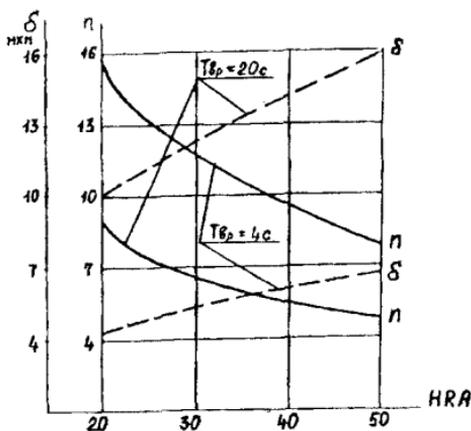


Рис. 4.20. Зависимость показателя формы n и величины выпуклости δ роликовой дорожки от твердости HRA абразивных брусков и продолжительности режима резания T_{sp} , при $T_s = 3$ с, $Z = M14$

Это происходит оттого, что бруски повышенной твердости плохо прирабатываются к обрабатываемой поверхности и мало изнашиваются в местах возникновения высокого давления. Твердые бруски хорошо сохраняют в процессе обработки форму режущей поверхности и при определенных условиях могут иметь высокую исправляющую и формообразующую способность. Увеличение зернистости брусков обеспечивает повышение их режущей способности, а значит, и производительности обработки. Это приводит к увеличению выпуклости и снижению показателя формы профиля обработанной поверхности (рис. 4.21).

При обработке крупнозернистыми брусками в местах повышенного давления абразивные зерна глубже внедряются в металл

и обеспечивают интенсивный сьем припуска. Они очень тонко реагируют на малейшее изменение условий обработки и формируют профиль обрабатываемой поверхности в течение очень короткого времени.

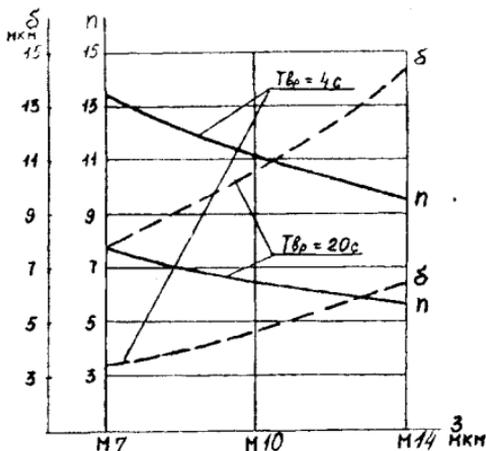


Рис. 4.21. Зависимость показателя формы n и величины выпуклости δ роликовой дорожки от зернистости Z абразивных брусков и времени врезания $T_{вр}$ при $T_в = 3$ с, $HRA=40$

На рис. 4.22 и 4.23 представлены зависимости, характеризующие степень влияния продолжительности цикла обработки на величину съема металла и шероховатость обработанной поверхности.

С увеличением времени врезания и времени выхаживания производительность процесса увеличивается, а шероховатость снижается. Как видно из рис. 4.23, интенсивный сьем припуска в первые 6 секунд обеспечивается и на стадии выхаживания, когда прекращается принудительная подача брусков, и они подаются лишь за счет компенсации упругих деформаций в механической системе. В этот период цикла обработки происходит снижение шероховатости поверхности.

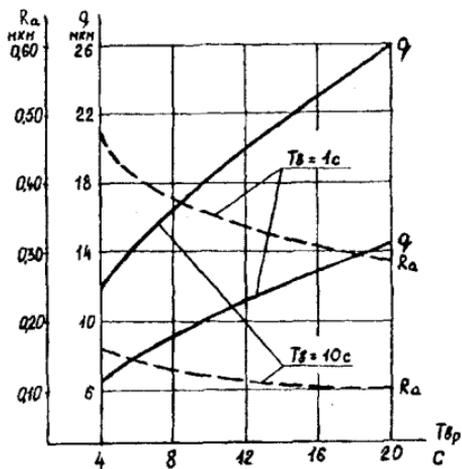


Рис. 4.22. Зависимость величины съема металла q и шероховатости R_a обработанной поверхности от времени врезания $T_{сп}$ и времени выхаживания T_g при $HRA=40$, $3=M14$

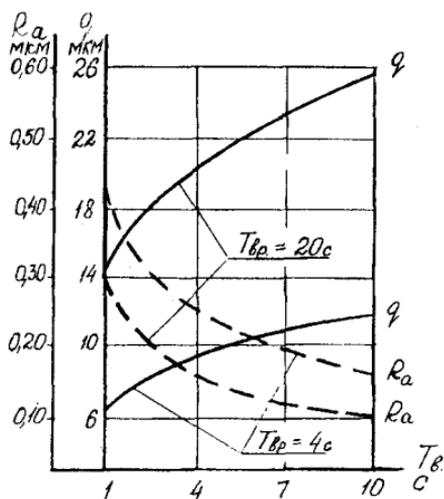


Рис. 4.23. Зависимость величины съема металла q и шероховатости R_a обработанной поверхности от времени выхаживания T_g и времени врезания $T_{сп}$ при $HRA=40$, $3=M14$

С увеличением твердости абразивного инструмента производительность процесса доводки уменьшается, а шероховатость обработанной поверхности несколько увеличивается (рис. 4.24). Это обстоятельство объясняется тем, что повышение твердости брусков снижает их способность приработки к обрабатываемой поверхности, что приводит к уменьшению количества активно режущих зерен. Кроме того, твердые бруски мало изнашиваются в процессе обработки, быстро засаливаются и не исключают возможности образования на рабочей поверхности металлических наростов, которые приводят к увеличению шероховатости поверхности обработки.

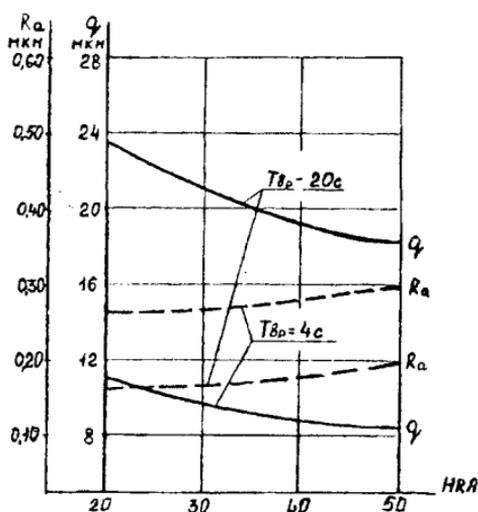


Рис. 4.24. Зависимость величины съема металла q и шероховатости R_a обработанной поверхности от твердости HRA абразивных брусков и продолжительности режима активного резания $T_{ар}$ при $T_{св} = 3 с$, $Z = M14$

Исключительно сильное влияние на величину съема металла и шероховатость обработанной поверхности оказывает зернистость абразивного инструмента (рис. 4.25).

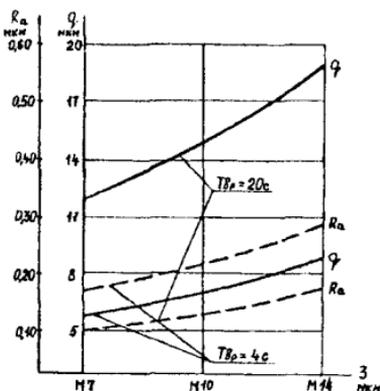


Рис. 4.25. Зависимость величины съема металла q и шероховатости R_a обработанной поверхности от зернистости Z абразивных брусков и времени активного резания $T_{сп}$ при $HRA = 40$, $T = 3$ с.

С увеличением размеров зерен эти параметры обработки повышаются. Это связано с увеличением глубины внедрения зерен в металл и возрастанием толщины единичных срезов. Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод о том, что основные закономерности, присущие исследуемому процессу суперфиниширования, не противоречат общепринятым представлениям о механизме брусковой доводки. Некоторые расхождения данных зависимостей с ранее известными в сторону увеличения производительности обработки связаны с кинематическими и динамическими особенностями перемещения инструмента по обрабатываемой поверхности.

На всех этапах экспериментальных исследований производили выборочный контроль волнистости обработанной поверхности и ее отклонений от круглости.

Полученные данные свидетельствуют о высокой исправляющей способности многобрускового суперфиниширования. Применение суперфинишной головки (см.рис.4.9) позволило стабильно обеспечить

на обрабатываемой поверхности низкие значения волнистости и отклонений от круглости. Так, при доводке с рациональными режимами волнистость дорожек качения находилась в пределах 0.005-0.1 мкм, а отклонения от круглости - в пределах 0.2-0.5 мкм.

4.6. Выбор рациональных значений факторов процесса суперфиниширования

Одной из ключевых задач, возникающих при разработке прогрессивного технологического процесса, является выбор оптимальных режимов его осуществления. Решение этой задачи состоит в том, чтобы на основе знания свойств заготовки инструмента, механизма их взаимодействия в процессе обработки, кинематических и динамических возможностей оборудования, назначить такие режимы резания, которые обеспечат формообразование детали в соответствии с техническими условиями на ее приемку при наименьших затратах общественного труда.

Наиболее универсальным методом условий обработки деталей является симплексный метод решения задач линейного программирования [144-148], который заключается в том, чтобы по заданным исходным данным определить параметры обработки, при которых критерий оптимальности достигал бы минимума или максимума в зависимости от его характера. Поэтому правильный выбор критерия оптимальности играет важную роль в решении поставленной задачи.

Используя выражение (4.16), запишем систему технических ограничений режимов резания:

$$\begin{cases} n \geq 16.039 A_{\delta}^{-1.037} n_{\delta}^{-0.379} P_{\delta}^{-0.497} n_u^{0.217}, \\ \delta \geq 0.436 A_{\delta}^{1.241} n_{\delta}^{0.670} P_{\delta}^{0.481} n_u^{-0.359}, \\ q \geq 0.00015 A_{\delta}^{0.802} n_{\delta}^{1.361} P_{\delta}^{1.239} n_u^{0.320}, \\ R_u \geq 0.0703 A_{\delta}^{0.912} n_{\delta}^{0.261} P_{\delta}^{0.383} n_u^{-0.181}. \end{cases} \quad (4.18)$$

За критерий оптимальности примем наибольшую производительность съема припуска, которая в значительной степени определяется частотой и амплитудой осцилляции брусков.

Тогда, на основе рекомендаций [149], оценочная функция будет иметь вид:

$$(A_{\delta} n_{\delta})_{\max} = F.$$

Введем ограничения для A_{δ} и n_{δ} с учетом технологических особенностей оборудования:

$$1 \text{ мм} \leq A_{\delta} \leq 2.5 \text{ мм} \quad (4.19)$$

$$250 \frac{\text{гВ. Х.}}{\text{МИН}} \leq n_{\delta} \leq 1470 \frac{\text{гВ. Х.}}{\text{МИН}}. \quad (4.20)$$

Перепишем систему (4.18) с учетом дополнительных ограничений:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{\delta}^{1.037} n_{\delta}^{0.379} \geq \frac{16.039 n_u^{0.217}}{n P_{\delta}^{0.497}}, \\ A_{\delta}^{1.241} n_{\delta}^{0.670} \geq \frac{\delta n_u^{0.359}}{0.436 P_{\delta}^{0.481}}, \\ A_{\delta}^{0.802} n_{\delta}^{1.361} \geq \frac{q}{0.00015 P_{\delta}^{1.239} n_u^{0.320}}, \\ A_{\delta}^{0.912} n_{\delta}^{0.261} \geq \frac{R_a n_u^{0.181}}{0.0703 P_{\delta}^{0.383}}, \\ n_{\delta} \geq 250, \\ n_{\delta} \leq 1470, \\ A_{\delta} \geq 1, \\ A_{\delta} \leq 2.5 \\ \hline (A_{\delta} n_{\delta})_{\max} = F \end{array} \right. \quad (4.21)$$

Прологарифмируем левые и правые части выражения (4.21) и обозначим $\ln 100A_8 = X_1$, $\ln n_8 = X_2$, а правые части через $b_1, b_2 \dots b_8$. После подстановки получим математическую модель процесса доводки роликовых дорожек:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1.037X_1 + 0.379X_2 \geq b_1, \\ 1.241X_1 + 0.670X_2 \geq b_2, \\ 0.802X_1 + 1.361X_2 \geq b_3, \\ 0.912X_1 + 0.261X_2 \geq b_4, \\ X_2 \geq b_5, \\ X_2 \leq b_6, \\ X_1 \geq b_7, \\ X_1 \leq b_8 \end{array} \right. \quad (4.22)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} X_1 \geq b_7, \\ X_1 \leq b_8 \end{array} \right. \quad (4.23)$$

$$\frac{(X_1 + X_2)_{\max}}{F}.$$

В выражении (4.22)

$$b_1 = 3.597, b_2 = 7.113, b_3 = 11.021, b_4 = 2.809,$$

$$b_5 = 5.521, b_6 = 7.293, b_7 = 4.605, b_8 = 5.521.$$

Решая полученную систему уравнений с помощью стандартной программы [147] на ЭВМ и сравнивая допустимые решения с оценочной функцией (4.23), определим оптимальные значения режимов:

$$n_{\text{б.опт.}} = 1470 \frac{\text{г.в. х.}}{\text{МИН}}, \quad A_{\text{б.опт.}} = 2.5 \text{ мм.}$$

Графическая интерпретация математической модели (4.22) представлена на рис. 4.26.

Неравенствам системы (4.22) соответствует множество точек плоскости, образующей многоугольник решений ABCDE (рис. 4.26).

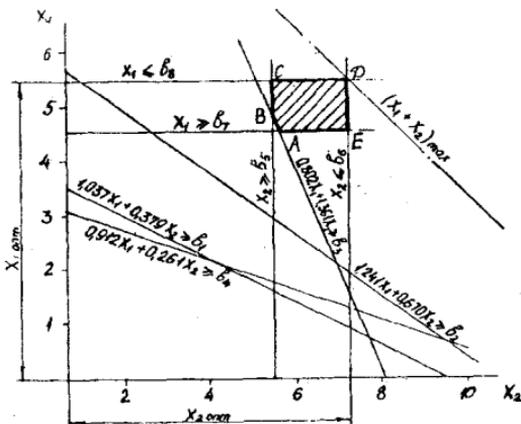


Рис. 4.26. Графическая интерпретация выбора оптимального решения

Найдя координаты $X_{1\text{опт.}}$ и $X_{2\text{опт.}}$, определим оптимальное значение частоты и амплитуды осцилляции брусков:

$$n_{\text{бонт.}} = e^{X_{2\text{опт.}}} = e^{7.293} = 1.470 \frac{\text{гВ. X.}}{\text{МИН}},$$

$$A_{\text{бонт.}} = e^{X_{1\text{опт.}}} = e^{5.521} = 2.5 \text{ мм.}$$

Подобным же образом нашли оптимальные параметры продолжительности цикла обработки и характеристику инструмента. При этом использовали метод решения [148]. После обработки на ЭВМ получили: $Z_{\text{опт.}} = \text{M14}$, $T_{\text{вр.опт.}} = 4 \text{ с}$, $T_{\text{вопт.}} = 2 \text{ с}$, $\text{HRA}_{\text{опт.}} = 30 \text{ ед.}$

Таким образом, исследуемый способ суперфиниширования обладает повышенной производительностью съема припуска. Она, по меньшей мере, в 2.5 раза выше, чем у традиционных способов, применяемых на подшипниковых заводах для суперфиниширования роликовых дорожек. Кроме того, предложенный способ окончательной обработки прецизионных поверхностей деталей обеспечивает гарантированное получение выпуклого профиля дорожки качения

колец роликовых подшипников и исключает возможность образования вогнутости роликовой дорожки.

Многобрусковое суперфиниширование позволяет в значительной степени исправлять исходные погрешности геометрической формы дорожки качения в продольном сечении такие, как волнистость, отклонение от круглости и гранность

Оптимальными условиями многобрускового суперфиниширования с осцилляцией суперфинишной головки являются следующие: частота осцилляции инструмента - 1470 дв.х./мин., амплитуда осцилляции - 2,5 мм, время врезания - 4 с, время выхаживания - 2 с.

Использование цикла обработки, состоящего из времени активного резания и времени выхаживания, когда прекращается подача брусков, уменьшается частота их осцилляции и увеличивается частота вращения изделия, позволяет снизить шероховатость обработанной поверхности.

5. СУПЕРФИНИШИРОВАНИЕ ЖЕЛОБОВ КОЛЕЦ ШАРИКОПОДШИПНИКОВ С ЛОКАЛИЗАЦИЕЙ КОНТАКТА ИНСТРУМЕНТА И ЗАГОТОВКИ ОСЕВОЙ ОСЦИЛЛЯЦИЕЙ СУПЕРФИНИШНОЙ ГОЛОВКИ

5.1. Обоснование рациональной схемы обработки

Ранее выполненные исследования позволяют обосновать рациональную схему процесса суперфиниширования криволинейных поверхностей вращения. Как было показано в гл.2, из условия одновременного обеспечения высокой производительности снятия припуска и интенсивности исправления исходных погрешностей геометрической формы изделия можно сформулировать следующие требования к кинематике осуществления процесса суперфиниширования:

1. Периодический или прерывистый контакт инструмента с изделием. Периодический контакт бруска с поверхностью заготовки целесообразно использовать при необходимости прецизионного профилирования обрабатываемой поверхности. Когда такая необходимость отсутствует, возможно использование методов доводки с прерывистым контактом инструмента с заготовкой. Особенно эффективен прерывистый контакт бруска с изделием при отношении времени его непрерывного контакта ко времени двойного хода, равном $T_k/T_{\text{ц}}=0.7-0.9$ (рис. 2.8), и использовании мелкозернистых брусков. Применение мелкозернистых брусков позволяет одновременно обеспечить низкую шероховатость поверхности.

2. Прижим бруска к изделию через жесткие кинематические самотормозящиеся звенья. Это позволяет исправлять гармоники как высоких, так и низких номеров с шагом, большим ширины контакта бруска с изделием.

3. Применение возможно большего числа обрабатывающих брусков с жесткой кинематической связью между собой. Увеличение числа брусков приводит к повышению производительности снятия припуска и интенсификации исправления погрешностей геометрической формы изделия. Обеспечение жесткой кинематической связи между брусками позволяет уменьшить число промежуточных звеньев, оказывающих влияние на жесткость системы СПИД, и особенно интенсивно удалять гармоники, номера которых имеют наименьший общий делитель с числом обрабатывающих брусков.

4. Обеспечение траектории перемещения инструмента, не зависящей от формы обрабатываемого профиля. Это обеспечивает повышенный уровень универсальности и технологической гибкости процесса и делает возможным его использование не только в обычных производствах, но и в условиях гибких интегрированных производств.

Способ многобрускового суперфиниширования с прямолинейной осевой осцилляцией инструмента в полной мере удовлетворяет всем этим требованиям (рис. 5.1-5.3) [142,143,150].

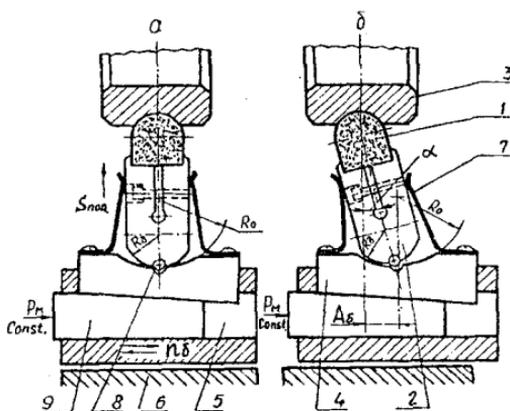


Рис. 5.1. Схема суперфиниширования криволинейных поверхностей вращения брусками, установленными в перекатывающихся держателях

Схема осуществления данного метода может иметь две разновидности. Первая разновидность характеризуется тем, что доводка осуществляется абразивными брусками, закрепленными в перекатывающих держателях (рис. 5.1). Вторая - в качающихся держателях (рис. 5.2).

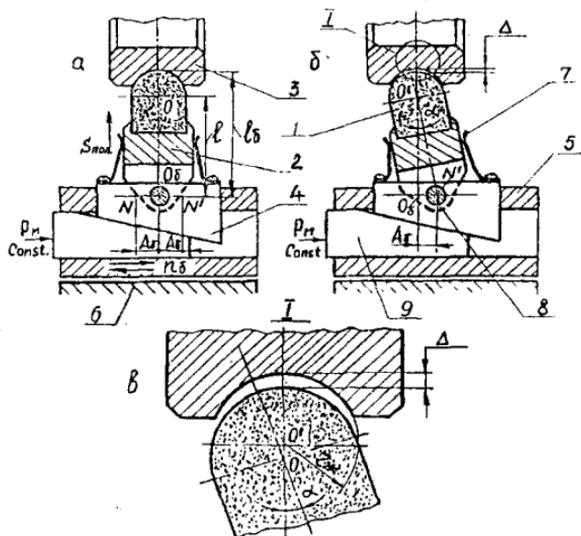


Рис. 5.2. Схема суперфиниширования криволинейных поверхностей вращения брусками, установленными в качающихся держателях

Осуществление способа заключается в следующем. Несколько абразивных брусков 1 в держателях 2 располагают вокруг оси вращения изделия 3 (рис. 5.1, 5.2) с заданным угловым шагом на опорных поверхностях ползушек 4 корпуса 5, который установлен в прямолинейных направляющих 6 и может свободно перемещаться в направлении оси вращения изделия 3. На ползушках 4 могут быть установлены упругие защитные кожухи 7 (например, резиновые с пружинным проволочным каркасом), которые удерживают держатели 2 от выпадания и предохраняют их от стружки и шлама. В держатели 2 устанавливают центрирующие ролики 8 (рис. 5.1) или оси (рис. 5.2). Внутри корпуса 5 установлен механизм подачи 9 с самотормозящимися

кинематическими звеньями, который сообщает ползушкам 4 с брусками 1 перемещение в радиальном направлении.

Перед началом обработки корпус 5 перемещают в направлении оси вращения изделия 3 до совмещения плоскости симметрии брусков 1 и держателей 2 с плоскостью симметрии криволинейного профиля обрабатываемой поверхности. Изделию 3 сообщают вращательное движение, а корпусу 5 - возвратно-поступательное осциллирующее движение в направлении оси вращения изделия 3 по направляющим 6 с заданной амплитудой A_6 . Одновременно механизм подачи 9 перемещает на заданную величину ползушки 4 с брусками 1 в держателях 2 по радиальным направляющим корпуса 5 при каждом двойном ходе последнего.

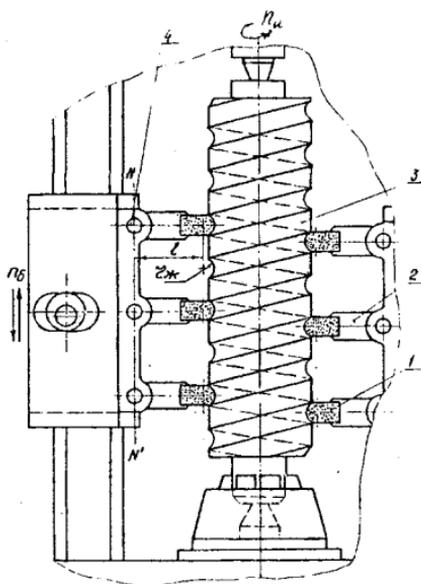


Рис. 5.3. Схема суперфиниширования дорожки качения винта шариковинтовой передачи: 1 - брусок; 2 - держатель; 3 - изделие; 4 - ось

Амплитуде A_6 (рис. 5.1, 5.2) соответствует поворот бруска 1 с держателями 2 на угол α и перекатывание концов держателей 2 радиусом R_d по вогнутым опорным поверхностям ползушек 4 радиусом R_0 (рис. 5.1)

или перемещение осей 8 держателей 2 вдоль прямой NN' (рис.5.2). Задавая определенные значения амплитуде A_6 , радиусам R_d , R_0 и расстоянию l , можно обеспечить прерывистый контакт брусков 1 с обрабатываемой поверхностью изделия 3.

Рассмотрим подробнее кинематику перемещения инструмента (рис.5.4). Введем подвижную $O'X'Y'$ систему декартовых координат с началом отсчета, расположенным в центре кривизны профиля рабочей поверхности бруска в произвольный момент времени T , и неподвижную OXY с началом отсчета в центре кривизны профиля желоба. Обозначим: $r_ж$ - радиус желоба, $l_ж$ - длина бруска от оси его крепления до периферии, A_6 - амплитуда возвратно-поступательного движения бруска, h_0 - перемещения центра качания O_6 бруска от центра возвратно-поступательного движения за время T .

В своем относительном движении точка M вращается вокруг центра O' . Проекция этого движения на оси $O'Y$ и $O'X'$:

$$\begin{cases} x' = h_0 \frac{r_ж}{l_6 - r_ж}; \\ y = r_ж \sqrt{1 - \frac{h_0^2}{(l_6 - r_ж)^2}} \approx r_ж \left[1 - \frac{h_0^2}{2(l_6 - r_ж)^2} \right]. \end{cases}$$

Пусть центр качания бруска O_6 перемещается во времени по синусоидальному закону:

$$h_0 = A_6 \sin(2\pi n_6 T). \quad (5.1)$$

Подставляя это значение в предыдущее равенство, получим:

$$\begin{cases} x' = A_6 \frac{r_ж}{l_6 - r_ж} \sin(2\pi n_6 T); \\ y = r_ж \left(1 - \frac{A_6^2}{2(l_6 - r_ж)^2} \right) \sin^2(2\pi n_6 T). \end{cases}$$

Дифференцируя по времени, определим:

$$\frac{dx'}{dT} = 2\pi n_6 A_6 \frac{r_ж}{l_6 - r_ж} \cos(2\pi n_6 T); \quad (5.2)$$

$$\frac{dy}{dT} = -\frac{2\pi r_{\text{ж}} A_6^2}{(l_6 - r_{\text{ж}})^2} n_6 \sin(2\pi n_6 T) \cos(2\pi n_6 T). \quad (5.3)$$

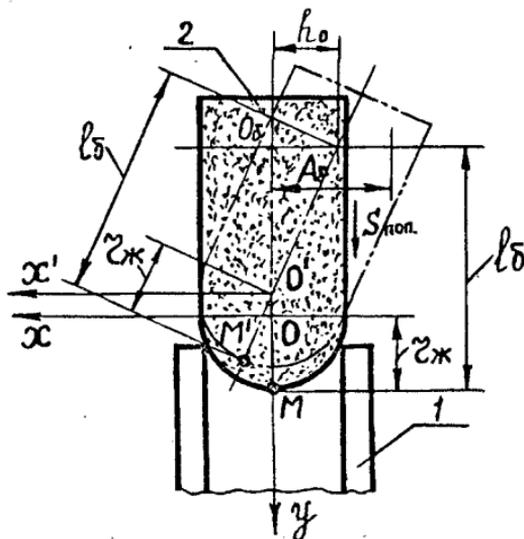


Рис. 5.4. Кинематика движения бруска

Выражения (5.2) и (5.3) определяют проекцию относительной скорости точки M на оси координат. Найдем переносную скорость точки M . Из рис. 5.4 имеем:

$$OO' = -\frac{h_0^2}{2(l_6 - r_{\text{ж}})}.$$

Подставляя в это выражение значение h_0 (5.1), получим:

$$O'O = \frac{A_6^2}{2(l_6 - r_{\text{ж}})} \sin^2(2\pi n_6 T).$$

Дифференцируя по времени, определим переносную скорость V_n точки M :

$$V_n = -\frac{2\pi A_6^2}{(l_6 - r_{\text{ж}})} n_6 \sin(2\pi n_6 T) \cos(2\pi n_6 T). \quad (5.4)$$

В таком случае проекция абсолютной скорости точки М на оси ОХ и ОУ будет равна:

$$V_{M_x} = 2\pi n_6 A_6 \frac{r_{ж}}{l_6 - r_{ж}} \cos(2\pi n_6 T); \quad (5.5)$$

$$V_{M_y} = -2\pi A_6^2 n_6 \frac{n_6}{(l_6 - r_{ж})^2} \sin(2\pi n_6 T) \cos(2\pi n_6 T). \quad (5.6)$$

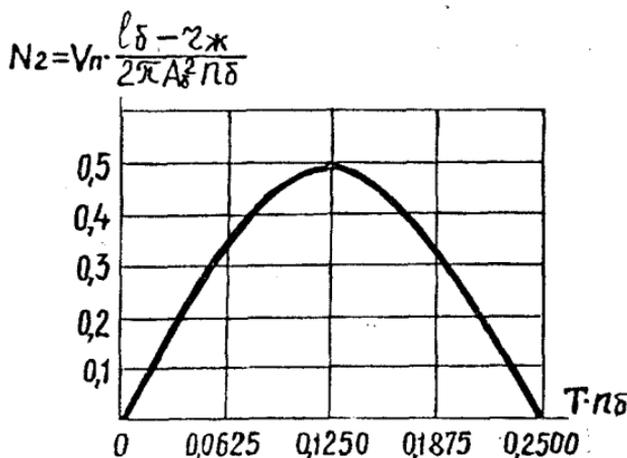


Рис. 5.5. Зависимость коэффициента N_2 от Tn_6

Как видно из рис.5.5, переносная скорость на отрезке 1/8 времени двойного хода возрастает, а затем снова падает.

Полученные выражения позволяют рассчитать среднюю скорость осциллирования бруска $V_{б.ср.}$ и необходимую скорость поперечной подачи бруска $S_{поп.}$, тогда относительное нормальное перемещение бруска по отношению к изделию будет иметь зависимость, изображенную на рис.5.6.

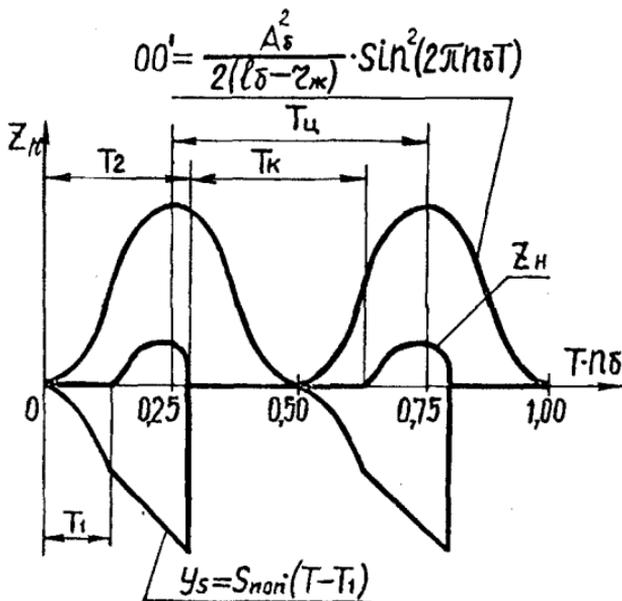


Рис. 5.6. Относительное нормальное перемещение бруска z_H в процессе одного двойного хода

В начальный момент времени T_1 от смещения оси качания бруска относительно центра его качания, брусок под действием силы P контактирует с изделием. Как только скорость переносного движения бруска V_{II} (5.4) станет больше скорости его поперечной подачи $S_{ноп}$, брусок оторвется от изделия. Из условия: $S_{ноп} + V_n = 0$ найдем время $(T_2 - T_1)$. Используя равенство (5.4), получим:

$$S_{ноп} - \frac{2\pi A_6^2}{l_6 - r_{ж}} n_6 \sin(2\pi n_6 T_1) \cos(2\pi n_6 T_1) = 0. \quad (5.7)$$

Брусок вновь войдет в контакт с поверхностью обработки при условии

$$O'O(T_2) = S_{ноп}(T_2 - T_1) + O'O(T_1)$$

или

$$\frac{A_6^2}{2(l_6 - r_{ж})} \sin^2 2\pi n_6 T_2 = S_{ноп}(T_2 - T_1) + \frac{A_6^2}{2(l_6 - r_{ж})} \sin^2(2\pi n_6 T). \quad (5.8)$$

Решая совместно равенства (5.7) и (5.8), можно найти время отрыва бруска от изделия ($T_2 - T_1$):

$$\begin{cases} S_{\text{поп}}(T_2 - T_1) - \frac{A_6^2}{2(l_6 - r_{\text{ж}})} [\sin^2(2\pi n_6 T_2) - \sin(2\pi n_6 T_1)] = 0; \\ S_{\text{поп}} - \frac{2\pi A_6^2}{l_6 - r_{\text{ж}}} n_6 \sin(2\pi n_6 T_1) \cos(2\pi n_6 T_1) = 0. \end{cases} \quad (5.9)$$

Мы отмечали в гл.2, что при прерывистом характере контакта бруска с изделием отношение времени контакта T_k ко времени цикла T_u должно быть в пределах $C = T_k/T_u = 0.7-0.9$. Отсюда:

$$(T_2 - T_1) = (1 - C)T_u = (1 - C) \frac{0.5}{n_6}. \quad (5.10)$$

В табл.5.1 представлено решение уравнений (5.9) и (5.10). Подставляя выражение (5.10) в систему (5.9) и решая ее при указанных значениях C , определим:

$$\begin{cases} T_1 = (0.076 \div 0.110) \frac{1}{n_6}; \\ T_2 = (0.160 \div 0.226) \frac{1}{n_6}. \end{cases} \quad (5.11)$$

Тогда

$$S_{\text{поп}} = (2.550 \div 3.086) \frac{A_6^2}{l_6 - r_{\text{ж}}} n_6. \quad (5.12)$$

Таблица 5.1
Зависимость отношения C времени контакта бруска с изделием
ко времени цикла от режима суперфиниширования

| | | | | | | | | | | | |
|---------------|----------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| | 0 | 0.05 | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.40 | 0.45 | 0.5 |
| $C = T_k/T_u$ | 0 | 0.19 | 0.27 | 0.34 | 0.41 | 0.47 | 0.54 | 0.64 | 0.68 | 0.79 | 1.0 |
| N_v | ∞ | 9.47 | 6.76 | 6.406 | 5.868 | 5.339 | 4.520 | 3.680 | 2.881 | 0.777 | 0.5 |

Величина максимального зазора между бруском и поверхностью изделия будет соответствовать времени $T = 0.125/n_6$, при котором скорость переносного движения бруска максимальна (рис.5.5) и определяется выражением:

$$\Delta = \frac{A_6^2}{l_6 - r_{ж}} \left[0.308 - 0.5 \sin^2(2\pi n_6 T_1) \right] - S_{\text{поп}} \left(\frac{0.125}{n_6} - T_1 \right).$$

Подставляя в это равенство значение $S_{\text{поп}}$ из выражения (5.12), определим:

$$\Delta \approx (0.06 \div 0.07) \frac{A_6^2}{(l_6 - r_{ж})}. \quad (5.13)$$

Например, пусть $r_{ж} = 5$ мм, $l_{ж} = 30$ мм, $A_6 = 0.5$ мм, $n_6 = 1000$ дв.х./мин.:

$$\Delta = (0.06 \div 0.07) \frac{0.5^2}{30 - 5} = (6 \div 7) \cdot 10^{-4} \text{ мм};$$

$$S_{\text{поп}} = (26 \div 31) \frac{\text{мм}}{\text{мин}}.$$

Значения l_6 , A_6 и n_6 выбираются исходя из конструктивных соображений так, чтобы n_6 по возможности, было максимально, а l_6 , A_6 - минимально.

Средняя скорость осцилляции бруска:

$$V_{\text{б.ср.}} = \frac{1}{T_k} \left[\int_0^{T_1} V_{M_x} dT + \int_{T_2}^{\frac{1}{2n_6}} V_{M_x} dT \right] = \frac{2\pi}{T_k} n_6 A_6 \frac{r_{ж}}{l_6 - r_{ж}} \times$$

$$\times \left[\int_0^{T_1} \cos(2\pi n_6 T) dT + \int_{T_2}^{\frac{1}{2n_6}} \cos(2\pi n_6 T) dT \right] = \frac{A_6 r_{ж} n_6}{l_6 - r_{ж}} N_v, \quad (5.14)$$

$$\text{где } N_v = \frac{1}{T_k n_6} \left[\sin(2\pi n_6 T_1) + \sin(2\pi n_6 T_2) \right].$$

Значения коэффициента N_v представлены в табл. 5.1

Подставляя значение скорости $V_{б.ср.}$ осцилляции бруска в равенство (2.30) и выражения (2.93), (2.120), можно определить съем металла и степень исправления погрешности геометрической формы изделия (2.124). Примеры таких расчетов представлены в приложении 2.

5.2. Условия проведения экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования производили в соответствии с методикой, изложенной в гл.3. В качестве объекта исследований использовали внутренние кольца (рис. 5.7) радиального шарикового подшипника 206, изготовленные из стали ШХ-15 и термически обработанные до твердости HRC_3 61...65.

Образцы были обработаны окончательно по всем поверхностям по 6 классу точности, кроме дорожки качения. Дорожка качения имела следующие показатели качества: $R_a=0.60-0.32$ мкм, волнистость $W_z=0.4-0.8$ мкм, отклонение от круглости $\Delta_{кр.}=1.8-2.5$ мкм.

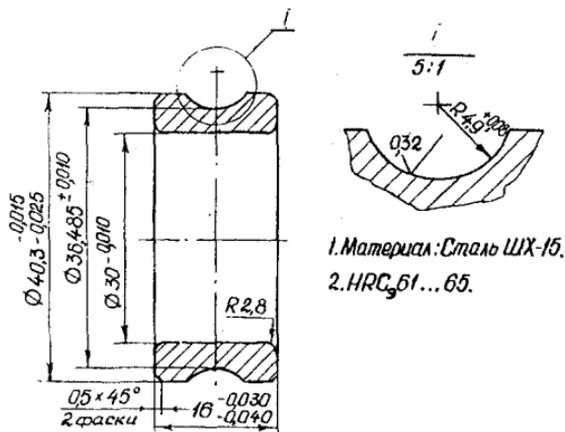


Рис. 5.7. Внутреннее кольцо радиального шарикоподшипника 206

Весь цикл экспериментальных исследований осуществляли на автомате МФ-1 для многобрусковой доводки рабочих поверхностей колец

подшипников. При этом использовали трехбрусковую инструментальную головку (рис.5.8), которая содержит корпус 1, где в радиальных пазах установлены ползушки 2. Ползушки 2 связаны с держателями 3 брусков 4 посредством осей 5. Возвратные пружины 6 и 7 смонтированы в корпусе 1. Шток подачи 8 установлен в центральном отверстии корпуса 1. Упоры 9 жестко связаны с корпусом 1.

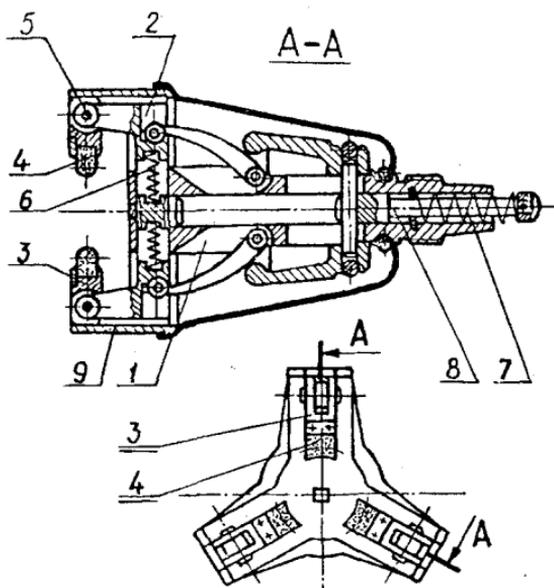


Рис 5.8 Головка инструментальная для суперфиниширования рабочих поверхностей внутренних колец подшипников

Подачу брусков к изделию осуществляют следующим образом. Перемещают шток 8 вдоль корпуса 1, преодолевая сопротивление пружин 6 и 7. Через систему жестких кинематических звеньев ползушки 2 вместе с брусками 4 в державках 3 на осях 5 перемещаются от упоров 9 в радиальных направляющих корпуса 1 к обрабатываемой поверхности. При освобождении штока 8 от нагрузки возвратные пружины 6 и 7 возвращают шток 8 и ползушки 2 с держателями в исходное положение. Держатели 5

благодаря упорам 9 устанавливаются в положение, показанное на рис.5.8. Инструментальные головки закрепляют в штоссель механизма осцилляции, который позволяет поддерживать в процессе обработки заданную величину отрыва бруска от изделия автоматическим изменением амплитуды осцилляции инструментальной головки.

Для поддержания заданной величины отрыва брусков от обрабатываемой поверхности изделия с учетом износа брусков служит устройство автоматической компенсации износа брусков.

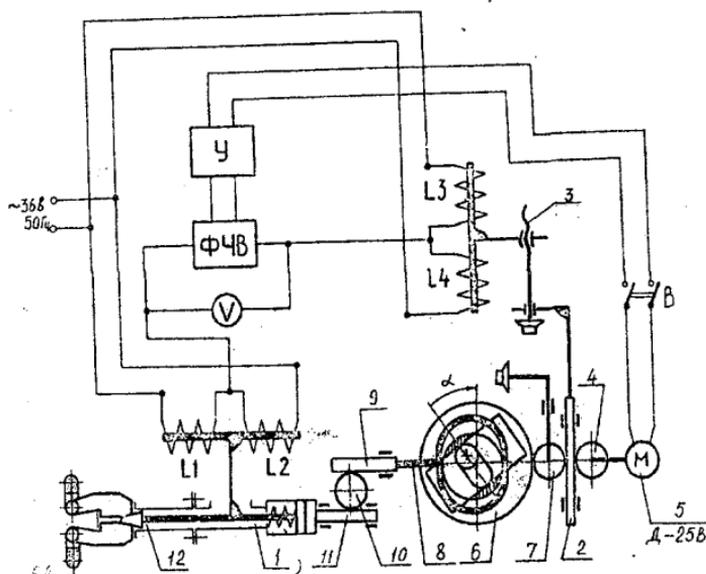


Рис.5.9. Электрокинематическая схема устройства автоматической компенсации износа брусков станка модели МФ-1

Устройство (рис.5.9) содержит дифференциальные индуктивные датчики L1-L2, L3-L4, которые включены в мостовую схему. шток механизма подачи 1 жестко соединен с якорем дифференциального датчика L1-L2, а рейка 2 исполнительного механизма через винтовую

пару 3 - с якорем датчика L3-L4. Рейка 2 исполнительного механизма зацепляется с шестерней 4 электродвигателя 5 и зубчатым колесом 6 посредством шестерни 7. Кулиса 8 соединена кинематическими звеньями 9, 10, 11 с инструментальной головкой 12. Вольтметр переменного тока V включен параллельно фазочувствительному выпрямителю ФЧВ. К выходу ФЧВ подключен усилитель у.

Устройство работает следующим образом. Отключают электродвигатель 5 поворотом выключателя В. Устанавливают заданную величину отрыва брусков от обрабатываемой поверхности изделия, изменяя амплитуду осцилляции инструментальной головки 12 вращением шестерни 7, которая поворачивает направляющие зубчатого колеса 6 на угол α . Зная угол α , определяют величину амплитуды осцилляции брусков. Управление заданной величиной отрыва брусков от обрабатываемой поверхности сводится к автоматическому регулированию амплитуды осцилляции в процессе обработки.

После установки амплитуды балансируют мост L1-L4, перемещая якорь датчика L3-L4 вращением винта 3 до тех пор, пока стрелка вольтметра V не остановится на нуле, и включают электродвигатель 5 поворотом выключателя В. В процессе обработки абразивные бруски инструментальной головки 12 изнашиваются. При этом шток механизма подачи 1 перемещается и перемещает якорь дифференциального датчика L1-L2. При перемещении якоря изменяется индуктивное сопротивление датчика L1-L2 и мост L1-L4 выйдет из состояния равновесия. Напряжение рассогласования подается на вход фазочувствительного выпрямителя (ФЧВ). На выходе ФЧВ напряжение рассогласования будет пропорционально линейному перемещению якоря L1-L2 и штока механизма подачи 1, а знак этого напряжения будет зависеть от направления этого перемещения. Напряжение рассогласования с выхода ФЧВ поступит на усилитель у и с него на электродвигатель 5. Вращение вала электродвигателя 5 с шестерней вызовет перемещение рейки 2,

шестерни 7 и зубчатого колеса 7 до тех пор, пока напряжение рассогласования на входе ФЧВ не будет равным нулю. При этом поворот зубчатого колеса 6 вызовет изменение амплитуды осцилляции кинематических звеньев 8, 9, 10, 11, а, следовательно, и инструментальной головки. Условия проведения экспериментальных исследований представлены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Условия проведения экспериментальных исследований

| Наименование факторов процесса | Численные значения факторов | Единицы измерения |
|--------------------------------|--|----------------------------------|
| Абразивный инструмент | МАЗ.БП12х863С.М7ПМ1К5А МАЗ.БП12х863С.М7ПСМ1К5А МАЗ.БП12х863С.М14ПМ1К5А МАЗ.БП12х863С.М14ПСМ1К5А | 3 шт. 3 шт. 3 шт. 3 шт. |
| Длина бруска с державкой | 30 | мм |
| Частота осцилляции брусков | 400-2000 | дв.х./мин |
| Давление брусков | 0.42-1.05 | МПа |
| Частота вращения изделия | 600-1700 | об/мин |
| Амплитуда осцилляции брусков | 0.1-1.0 | мм |
| Время врезания | 5-30 | с |
| Время выхаживания | 1-10 | с |
| Твердость абразивных брусков | 20-50 | HRA |
| Зернистость абразивных брусков | M7-M14 | мкм |

| | | |
|-------------------|---|-------|
| СОЖ | смесь из велосита (88%), керосина (10%), олеиновой кислоты (2%) | % |
| Способ подачи СОЖ | поливом | |
| Расход СОЖ | 20 | л/мин |

Контроль режимов и выходных параметров обработки осуществляли в соответствии с изложенной ранее, в гл.3, методикой.

По результатам предварительных опытов [105,106] для каждого из факторов процесса установили уровни варьирования (табл. 5.3).

Таблица 5.3

Уровни варьирования и кодовые обозначения режимных факторов суперфиниширования

| Уровни | Факторы процесса в единицах измерения | | | |
|--------------------------|---------------------------------------|----------------|-------------------|-------------|
| | n_6 (дв.х./мин) | P_6 (МПа) | n_u (об/мин) | A (мм) |
| Верхний | 2000 | 1.05 | 1700 | 1.0 |
| Нижний | 400 | 0.42 | 600 | 0.1 |
| Основной | 1200 | 0.735 | 1150 | 0.55 |
| Интервал варьирования | 800 | 0.315 | 550 | 0.45 |
| Кодовые обозначения | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 |

При исследовании влияния режимных факторов на выходные параметры процесса использовали бруски 63СМ7ПМ2К5А (HRA=28). Время обработки оставалось постоянным и составляло $T = 10$ с.

Вторая фаза экспериментов заключалась в исследовании влияния на производительность и точностные параметры обработки характеристики инструмента и времени рабочего цикла. Уровни варьирования исследуемых факторов представлены в табл. 5.4.

Во второй фазе экспериментов окружная скорость изделия, частота осцилляции брусков и давление брусков на обрабатываемую поверхность оставались постоянными и составляли $V_n = 160$ м/мин, $n_6 = 1300$ дв.х./мин, $P_6 = 0.42$ МПа.

На первом и на втором этапах исследований ставили полный факторный эксперимент типа 2^4 . Обработку экспериментальных данных производили по стандартной методике, изложенной в гл.3, а результаты расчетов заносили в журналы планирования экспериментов.

Таблица 5.4

Уровни варьирования и кодовые обозначения факторов второй фазы экспериментов

| Уровни | Факторы процесса в единицах измерения | | | |
|-----------------------|---------------------------------------|---------------|----------|------------|
| | $T_{вр.}, c$ | $T_{вык.}, c$ | HRA, ед. | $Z, \mu m$ |
| Верхний | 30 | 10 | 50 | 14 |
| Нижний | 5 | 1 | 20 | 7 |
| Основной | 17.5 | 5.5 | 35 | 10.5 |
| Интервал варьирования | 12.5 | 4.5 | 15 | 3.5 |
| Кодовые обозначения | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 |

5.3. Исследование влияния режимных факторов доводки на ее результаты

После обработки результатов экспериментов получили следующие зависимости:

$$\left\{ \begin{array}{l} q = 0.0185 n_6^{0.509} P_6^{0.307} n_u^{0.381} A_6^{0.358}, \\ R_a = 1.323 \frac{n_6^{0.243} P_6^{0.665} A_6^{0.082}}{n_u^{0.490}}, \\ W_z = 366.5 \frac{P_6^{0.716}}{n_6^{0.316} n_u^{0.848} A_6^{0.077}}, \\ \Delta_{кр.} = 2913.178 \frac{P_6^{1.025}}{n_6^{0.201} n_u^{0.943} A_6^{0.075}}. \end{array} \right. \quad (5.15)$$

Результаты исследования влияния частоты осцилляции брусков при различной величине их давления на величину съема металла, шероховатость, волнистость и отклонение от круглости представлены на рис. 5.10 и 5.11. Полученные зависимости соответствуют частоте вращения изделия $n_6=1700$ об/мин, амплитуде осцилляции брусков $A_6=0.5$ мм, времени врезания $T_{вр.}=10$ с.

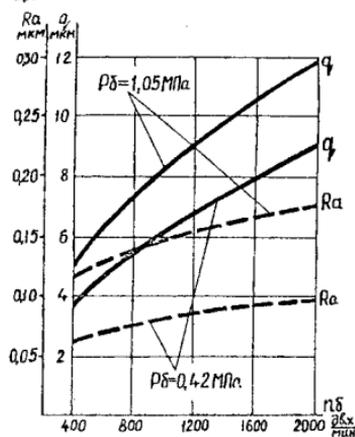


Рис. 5.10. Зависимость величины съема металла (q) и шероховатости (R_a) от частоты осцилляции брусков (n_δ) и давления брусков (P_δ): $A_6=0.5$ мм, $n_u=1700$ об/мин, $T_{вр.}=10$ с.

Экспериментальная проверка теоретических предпосылок показала, что, действительно, с повышением частоты осцилляции брусков и давления значительно увеличивается съём металла даже при использовании мелкозернистых брусков (рис.5.10). Это объясняется тем, что повышение частоты колебания брусков уменьшает время T_k их непрерывного контакта с поверхностью изделия, что способствует лучшей очистке режущей поверхности от стружки и шлама и повышает режущие свойства инструмента. При этом возрастает глубина внедрения зерен в обрабатываемую поверхность и, как следствие, возрастает шероховатость поверхности обработки.

С увеличением съема металла q возрастает и способность процесса исправлять исходные волнистость и отклонение от круглости (рис. 5.11), что хорошо согласуется с результатами теоретических исследований и не противоречит общепринятым представлениям [38,39,64,165].

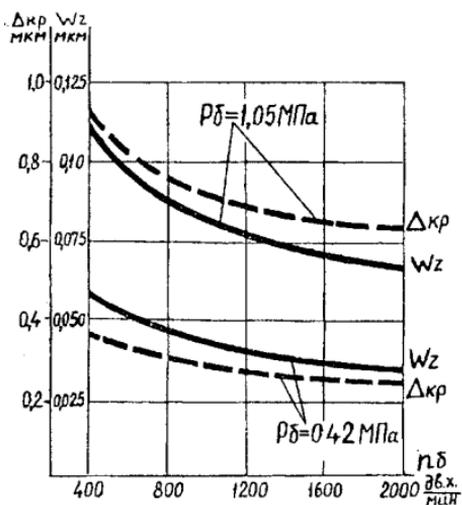


Рис. 5.11. Зависимость волнистости (W) и отклонений от круглости ($\Delta_{кр}$) обработанной поверхности от частоты осцилляции (n_δ) и давления (P_δ) брусков:
 $A_0 = 0,5 \text{ мм}$, $n_u = 1700 \text{ об/мин}$, $T_{пр} = 10 \text{ с}$.

На рис. 5.12 и 5.13 показана зависимость параметров обработки от давления на брусок и амплитуды осцилляции инструмента. Зависимости построены при частоте осцилляции брусков $n_6=2000$ дв.х./мин, частоте вращения изделия $n_u=1700$ об/мин и времени обработки $T_{np.}=10$ с.

Как видно, с повышением давления бруска на изделие при амплитуде осцилляции 0.1 мм величина съема металла увеличивается. Однако это увеличение незначительно, так как при малой амплитуде рабочие поверхности брусков практически не отрываются от изделия, самозатачивания брусков не происходит, продукты резания из зоны обработки не отводятся. Но с возрастанием амплитуды осцилляции брусков съем резко увеличивается, так как бруски начинают отрываться от изделия, интенсивно самозатачиваться, продукты резания лучше удаляются из зоны обработки.

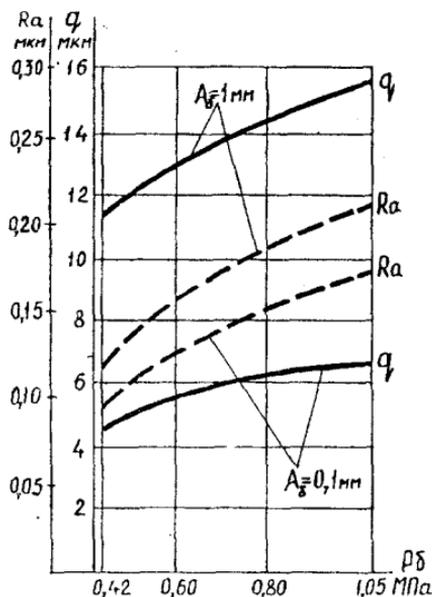


Рис. 5.12. Зависимость величины съема металла (q) и шероховатости (Ra) обработанной поверхности от давления (P_δ) и амплитуды осцилляции (A_δ) брусков: $n_6=2000$ дв.х./мин, $n_u=1700$ об/мин, $T_{np.}=10$ с.

С возрастанием давления и амплитуды осцилляции увеличивается глубина внедрения абразивных зерен в обрабатываемую поверхность, и шероховатость повышается. Возрастание давления ведет к увеличению волнистости и отклонений от круглости обработанной поверхности (рис.5.13). Это объясняется тем, что с возрастания давления брусков приращение давления, вызванное упругой деформацией системы СПИД под действием неровностей с шагом, большим длины контакта брусков $l_k > L$, составляет незначительную долю, от этого исправляющая способность процесса снижается, что также согласуется с результатами экспериментальных исследований.

С повышением давления брусков, очевидно, проявляется эффект "жемчужного кольца" [166], который состоит в том, что неиспользованные частицы абразива выкрашиваются из структуры бруска и прокатываются между поверхностями бруска и изделия. На инструменте и изделии образуются вырывы, что повышает шероховатость обработанной поверхности (рис. 5.12)

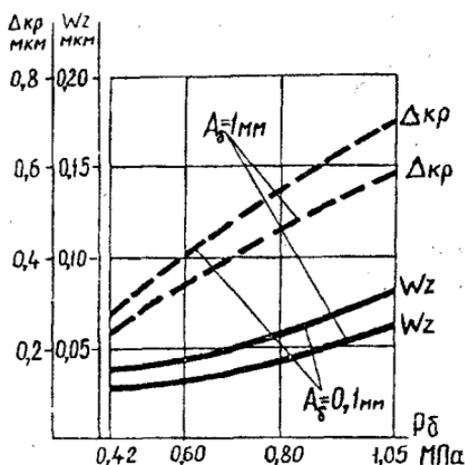


Рис. 5.13. Зависимость волнистости (Wz) и отклонений от круглости ($\Delta_{кр}$) обработанной поверхности от давления (P_δ) и амплитуды осцилляции (A_δ) брусков: $n_0 = 2000$ дв.х./мин, $n_s = 1700$ об/мин, $T_{sp} = 10$ с.

На рис. 5.14 и 5.15 показано влияние частоты вращения изделия и частоты осцилляции брусков на съем металла, шероховатость, волнистость и отклонение от круглости обрабатываемой поверхности.

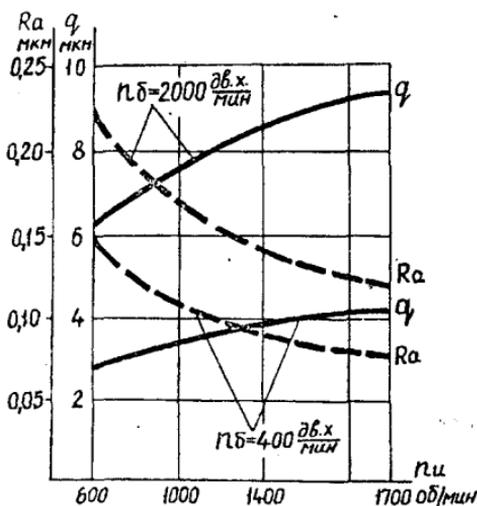


Рис. 5.14. Зависимость величины съема металла (q) и шероховатости (Ra) обработанной поверхности от частот вращения изделия (n) и осцилляции брусков (n_δ): $P_0=0.5$ МПа, $A_0=0.5$ мм, $T_{\text{сп.}}=10$ с.

Зависимости построены при давлении $P_0=0.5$ МПа и амплитуде осцилляции $A_0=0.5$ мм. С повышением частоты вращения изделия до 1400 об/мин интенсивность съема металла снижается. С повышением частоты осцилляции брусков до 2000 д.в.х./мин интенсивность съема металла возрастает в 2.5 раза, а шероховатость, волнистость и отклонение от круглости резко снижаются. С повышением частоты вращения изделия более 1600 об/мин интенсивность уменьшения шероховатости, волнистости и отклонений от круглости заметно снижается. Это согласуется с результатами теоретических исследований и подтверждает то, что с увеличением окружной скорости изделия исправляющая способность процесса возрастает (рис. 5.15).

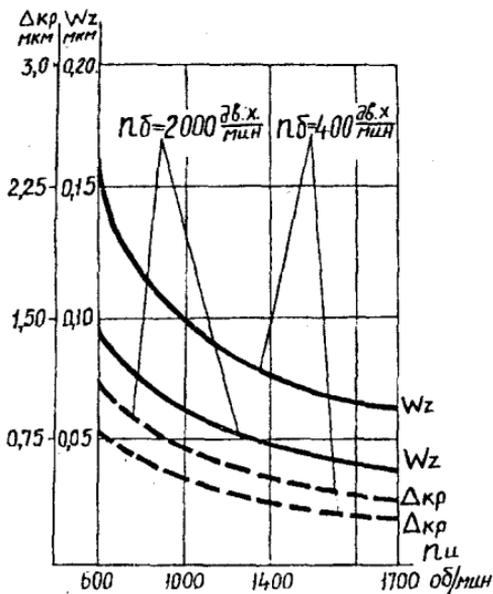


Рис. 5.15. Зависимость волнистости (W_z) и отклонений от круглости ($\Delta_{кр}$) обработанной поверхности от частот вращения изделия (n) и осцилляции брусков ($n\delta$): $P_6=0.5$ МПа, $A_6=0.5$ мм, $T_{сп}=10$ с.

Влияние амплитуды и частоты осцилляции брусков на эффективность процесса обработки показано на рис. 5.16 и 5.17. Результаты исследования получены при частоте вращения изделия $n_u=1700$ об/мин и давлении бруска на обрабатываемую поверхность $P_6=0.73$ Мпа.

Из графиков, представленных на рис. 5.16 и 5.17, видно, что с увеличением амплитуды и частоты осцилляции брусков величина съема металла повышается, так как уменьшается время T_k их непрерывного контакта с изделием и улучшаются условия самозатачивания инструмента. Кроме того, с повышением амплитуды осцилляции инструмента возрастает величина отрыва рабочей поверхности брусков от поверхности изделия. При этом отвод продуктов резания из зоны обработки улучшается, и съем металла возрастает.

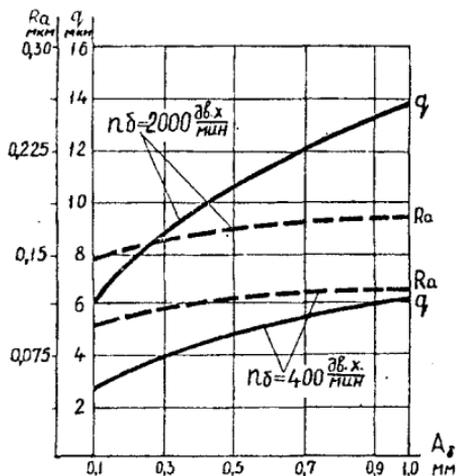


Рис. 5.16. Зависимость величины съема металла (q) и шероховатости (R_a) обработанной поверхности от амплитуды (A_δ) и частоты осцилляции инструмента (n_δ): $n_u = 1700$ об/мин., $P_0 = 0.73$ МПа, $T_{\text{сп}} = 10$ с.

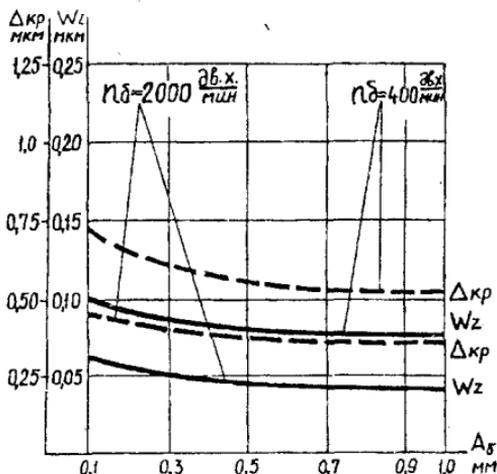


Рис. 5.17. Зависимость волнистости (W_z) и отклонений от круглости ($\Delta_{\text{кр}}$) обработанной поверхности от амплитуды (A_δ) и частоты осцилляции (n_δ) брусков: $n_u = 1700$ об/мин., $P_0 = 0.73$ МПа, $T_{\text{сп}} = 10$ с.

Увеличение глубины внедрения абразивных зерен в обрабатываемую поверхность изделия вызывает возрастание шероховатости поверхности (рис. 5.16). Однако с увеличением амплитуды свыше 0,6 мм съем металла возрастает менее интенсивно, так как при этом отношение времени контакта T_k ко времени одного двойного хода $T_{\Pi}=1/n_6$ приближается к оптимальному значению 0.7-0.9. С увеличением съема припуска исправляющая способность процесса возрастает, т.е. снижается волнистость и отклонение от круглости обработанной поверхности. Это особенно заметно при амплитуде осцилляции брусков до 0.5 мм. При больших значениях амплитуды осцилляции инструмента волнистость и отклонение от круглости снижаются менее интенсивно (рис. 5.17), что подтверждается результатами теоретических расчетов.

5.4. Влияние характеристики инструмента

В результате обработки экспериментальных данных были получены следующие уравнения регрессии:

$$\left\{ \begin{array}{l} q = 1.726 \frac{T_{\text{вр.}}^{0.418} T_{\text{вых.}}^{0.138} Z^{0.636}}{\text{HRA}^{0.338}}, \\ R_a = 0.034 \frac{\text{HRA}^{0.152} Z^{0.780}}{T_{\text{вр.}}^{0.270} T_{\text{вых.}}^{0.260}}, \\ W_z = 0.6312 \frac{\text{HRA}^{0.560}}{T_{\text{вр.}}^{0.600} T_{\text{вых.}}^{0.274} Z^{0.821}}, \\ \Delta_{\text{кр.}} = 0.496 \frac{\text{HRA}^{0.760}}{T_{\text{вр.}}^{0.320} T_{\text{вых.}}^{0.078} Z^{0.550}}. \end{array} \right. \quad (5.16)$$

Графические зависимости показателей обработки от времени врезания и времени выхаживания инструмента представлены на рис. 5.18 и 5.19. Неизменными параметрами обработки оставались окружная скорость изделия $V_u=160$ м/мин, частота осцилляции брусков $n_6=1300$ дв.х./мин, давление брусков на обрабатываемую поверхность $P_6=0.5$ МПа, амплитуда осцилляции брусков $A_6=0.6$ мм.

Анализ кривых (рис. 5.18, 5.19) показывает, что с увеличением времени врезания до 10-15 с интенсивность съема металла плавно уменьшается, а затем стабилизируется. Это объясняется тем, что в начальный момент обработки по мере снятия микронеровностей исходной поверхности изделия фактическая площадь контакта брусков с изделием увеличивается и уменьшается фактическое давление брусков на поверхность изделия, что подтверждается результатами теоретических исследований. После снятия с поверхности изделия микронеровностей от предшествующей обработки фактическая площадь контакта брусков с изделием в течение дальнейшей обработки остается неизменной и интенсивность съема металла стабилизируется. При суперфинишировании остановленными брусками, когда сила давления на самотормозящиеся кинематические звенья механизма подачи брусков равна нулю, при $T_{\text{вых.}}=1-5$ с, за счет сил упругой деформации системы СПИД съем металла продолжается, а в дальнейшем, когда упругие силы в системе СПИД снижаются, увеличение времени выхаживания не приводит к значительному съему металла.

Шероховатость, волнистость и отклонения от круглости обрабатываемой поверхности резко снижаются при увеличении времени врезания и с возрастанием времени выхаживания от 1 до 5 с. При дальнейшем увеличении времени выхаживания изменение шероховатости, волнистости и отклонений от круглости обрабатываемой поверхности почти не выявляется (рис. 5.18, 5.19).

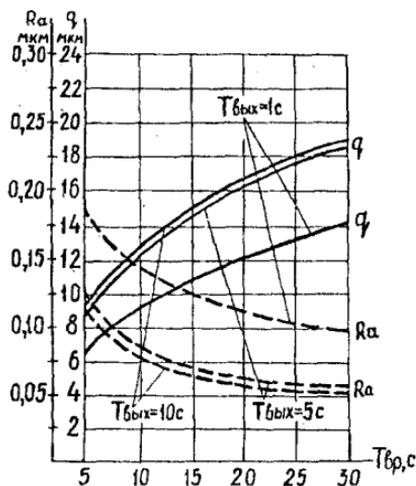


Рис. 5.18. Зависимость величины съема (q) металла и шероховатости (R_a) обработанной поверхности от времени работы брусков в режимах врезания ($T_{вр}$) и выхода ($T_{вых}$): $P_0=0.5$ МПа, $V_u=160$ м/мин, $n_0=1300$ дв.х./мин, $A_0=0.6$ мм.

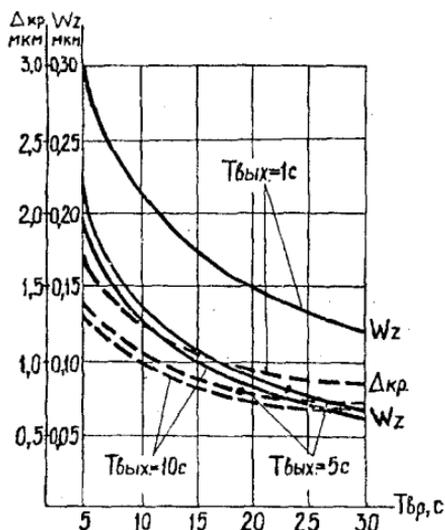


Рис. 5.19. Зависимость волнистости (W_z) и отклонений от круглости ($\Delta_{кр}$) обработанной поверхности от времени работы брусков в режимах врезания ($T_{вр}$) и выхода ($T_{вых}$): $P_0=0.5$ МПа, $V_u=160$ м/мин, $n_0=1300$ дв.х./мин, $A_0=0.6$ мм.

На рис. 5.20 и 5.21 представлены зависимости показателей обработки от твердости брусков и времени их врезания в обрабатываемую поверхность при окружной скорости изделия $V_u=160$ м/мин, частоте осцилляции брусков $n_6=1300$ дв.х./мин, времени выхаживания $T_{\text{вых.}}=5$ с, давлении брусков $P_6=0.5$ МПа, зернистости брусков $Z=M7$. Анализируя представленные зависимости, можно сделать вывод, что с повышением твердости брусков съем металла снижается. Это объясняется плохой прирабатываемостью более твердых брусков к обрабатываемой поверхности, когда число активных режущих зерен резко снижается. Такие бруски хуже самозатачиваются и очищаются от стружки и шлама. На рабочих поверхностях инструмента заметны наростообразования, которые приводят к значительному снижению точности геометрической формы обрабатываемой поверхности.

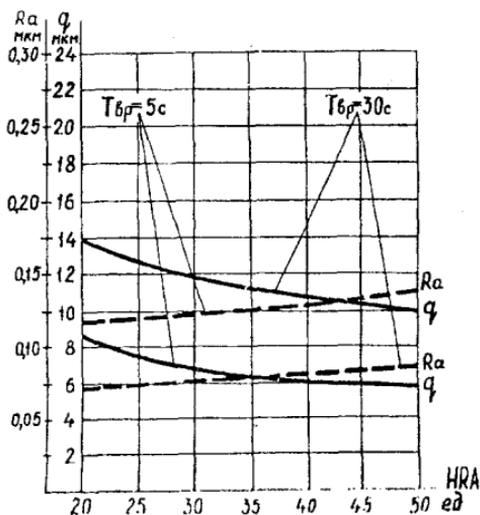


Рис. 5.20. Зависимость величины съема металла (q) и шероховатости R_a обработанной поверхности от твердости брусков (HRA) и времени работы брусков в режиме врезания (T_{6p}): $V_u=160$ м/мин, $n_6=1300$ дв.х./мин, $P_6=0.5$ МПа, $Z=M7$

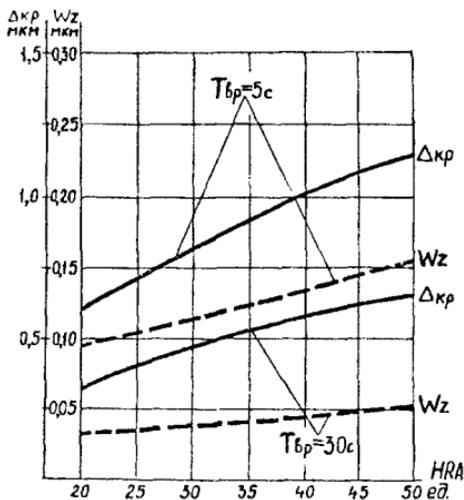


Рис. 5.21. Зависимость волнистости (W_z) и отклонений от круглости ($\Delta_{кр}$) обработанной поверхности от твердости брусков (HRA) и времени работы брусков в режиме активного резания ($T_{бр}$): $V_u=160$ м/мин, $n_s=1300$ об.х./мин, $P_c=0.5$ МПа, $Z=M7$

Влияние зернистости брусков и времени их врезания в обрабатываемую поверхность на эффективность обработки показано на рис. 5.22 и 5.23. Как видно, с увеличением зернистости и времени врезания инструмента величина съема металла резко увеличивается, а волнистость и отклонение от круглости интенсивно уменьшаются. Шероховатость поверхности изделия снижается с увеличением времени врезания и уменьшением зернистости брусков.

Это объясняется тем, что с возрастанием зернистости инструмента увеличивается глубина внедрения абразивных зерен в металл, а следовательно, и толщина срезаемой стружки. При этом величина съема и шероховатость возрастают, а волнистость и отклонение от круглости снижаются.

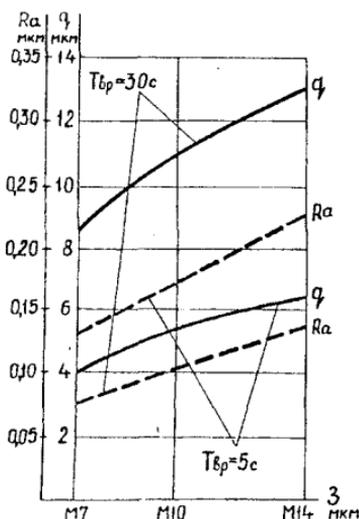


Рис. 5.22. Зависимость величины съема металла (q) и шероховатости (R_a) обработанной поверхности от зернистости брусков (Z) и времени их работы в режиме активного резания ($T_{бр}$): $V_u = 160$ м/мин, $n_0 = 1300$ дв.х./мин, $A = 0.6$ мм, $P_0 = 0.5$ МПа, $T_{max} = 3$ с, $HRA = 35$ ед.

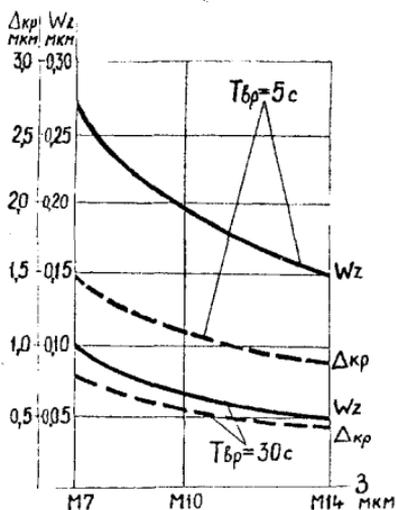


Рис. 5.23. Зависимость волнистости (W_z) и отклонений от круглости ($\Delta_{кр}$) обработанной поверхности от зернистости брусков (Z) и времени их работы в режиме активного резания ($T_{бр}$): $V_u = 160$ м/мин, $n_0 = 1300$ дв.х./мин, $A = 0.6$ мм, $T_{max} = 3$ с, $HRA = 35$ ед.

Результаты данных исследований подтверждают также сделанный ранее в гл. 3 вывод о том, что процесс суперфиниширования с прерывистым контактом брусков с обрабатываемой поверхностью особенно эффективен в случае использования мелкозернистых брусков. При этом обеспечивается минимальная шероховатость обработанной поверхности и достаточно высокий съем металла, а следовательно, и высокая производительность процесса обработки. Это позволяет производить окончательную обработку деталей на одной позиции, что, в целом, приводит к повышению производительности суперфинишной операции, несмотря на некоторое снижение интенсивности съема металла.

5.5. Оптимизация режимов обработки

Введем технические ограничения режимов обработки и представим их в виде функциональных связей между параметрами и показателями процесса. Перепишем выражения (5.15) с учетом вводимых ограничений:

$$\left\{ \begin{array}{l} q \leq 0.0185 n_6^{0.509} P_6^{0.307} n_u^{0.381} A_6^{0.358}, \\ R_a \geq 1.323 \frac{n_6^{0.243} P_6^{0.665} A_6^{0.082}}{n_u^{0.490}}, \\ W_z \geq 366.5 \frac{P_6^{0.716}}{n_6^{0.316} n_u^{0.848} A_6^{0.077}}, \\ \Delta_{кр.} \geq 2913.178 \frac{P_6^{1.021}}{n_6^{0.201} n_u^{0.943} A_6^{0.075}}. \end{array} \right. \quad (5.17)$$

Как отмечалось в гл. 4, на производительность доводки данным методом наибольшее влияние оказывает частота осцилляции брусков. Для формирования оценочной функции установим взаимосвязь между линейной скоростью и частотой вращения изделия по общеизвестной формуле:

$$n_u = \frac{1000V_u}{\pi D_u}, \quad (5.18)$$

где D_u - диаметр обрабатываемой поверхности изделия.

Подставляя формулу (5.18) в выражение (5.17) и выделяя $n_6 A_6$ в левую часть, получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} n_6^{0.509} A_6^{0.358} \leq \frac{q D_u^{0.381}}{0.166 V_u^{0.381} P_6^{0.307}}, \\ n_6^{0.243} A_6^{0.082} \geq \frac{12.73 V_u^{0.490} R_a}{P_6^{0.665} D_u^{0.490}}, \\ n_6^{0.316} A_6^{0.077} \geq \frac{2.76 P_6^{0.716} D_u^{0.848}}{V_u^{0.848} W_z}, \\ n_6^{0.201} A_6^{0.075} \geq \frac{12.7 P_6^{1.021} D_u^{0.943}}{V_u^{0.943} \Delta_{кр.}} \end{array} \right. \quad (5.19)$$

Оценочная функция будет иметь вид:

$$n_6 A_6 \geq 500 V_u. \quad (5.20)$$

Введем ограничения для A_6 и n_6 с учетом технологических возможностей оборудования:

$$0.1 \text{ мм} \leq A_6 \leq 1.0 \text{ мм}, \quad (5.21)$$

$$400 \frac{\text{ДВ. Х.}}{\text{МИН}} \leq n_6 \leq 2000 \frac{\text{ДВ. Х.}}{\text{МИН}}. \quad (5.22)$$

Перепишем выражение (5.19) с учетом ограничений:

$$\left\{ \begin{array}{l} n_6^{0.509} A_6^{0.358} \leq \frac{q D_u^{0.381}}{0.166 V_u^{0.381} P_6^{0.307}}, \\ n_6^{0.243} A_6^{0.082} \geq \frac{12.73 V_u^{0.490} R_a}{P_6^{0.665} D_u^{0.490}}, \\ n_6^{0.316} A_6^{0.077} \geq \frac{2.76 P_6^{1.021} D_u^{0.943}}{V_u^{0.943} \Delta_{кр.}}, \\ n_6 \geq 400, \\ n_6 \leq 2000, \\ A_6 \geq 0.1, A_6 \leq 1.0, \\ n_6 A_6 \geq 500 V_u \end{array} \right. \quad (5.23)$$

Прологарифмируем левые и правые части выражения (5.23) и обозначим $\ln n_6 = X_1$, $\ln 100A_6 = X_2$, а правые части через b_1, b_2, \dots, b_8 . После подстановки получим математическую модель процесса доводки:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0.509X_1 + 0.358X_2 \leq b_1 \\ 0.243X_1 + 0.082X_2 \geq b_2 \\ 0.316X_1 + 0.077X_2 \geq b_3 \\ 0.201X_1 + 0.075X_2 \geq b_4 \\ X_1 \geq b_5 \\ X_1 \leq b_6 \\ X_2 \geq b_7 \\ X_2 \leq b_8 \end{array} \right. \quad (5.24)$$

$$X_1 + X_2 \geq F \quad (5.25)$$

Специфика условий обработки учитывается составом свободных членов ($b_1=4.11$; $b_2=1.15$; $b_3=2.54$; $b_4=1.63$; $b_5=5.99$; $b_6=7.6$; $b_7=2.3$; $b_8=4.6$) и величиной коэффициентов при неизвестных членах. Решая систему (5.24), получаем допустимые значения, которые сравниваем с оценочной функцией (5.25):

$$n_{6,\text{опт}} = 1635 \text{ дв.х./мин}, A_{6,\text{опт}} = 0.447 \text{ мм.}$$

Определим оптимальную величину отрыва рабочих поверхностей брусков от изделия с учетом длины бруска с державкой $l_6=30$ мм (табл.5.2) по формуле (5.13):

$$\Delta_{\text{опт}} = 0.07 \frac{A_{6,\text{опт}}^2}{l_6 - r_{\text{ж}}} = 0.07 \frac{0.447^2}{30 - 49} \approx 0.001 \text{ мм.}$$

Таким образом, оптимальная величина отрыва рабочих поверхностей брусков составляет $\Delta_{\text{опт}}=0.001$ мм. Так как в процессе обработки бруски изнашиваются, то непрерывно изменяется размер

бруска с державкой l_6 . Следовательно, непрерывно изменяется и величина отрыва бруска от изделия.

Поэтому для поддержания в процессе обработки оптимальной величины отрыва бруска от изделия необходимо регулировать амплитуду осцилляции брусков. Определим закон изменения амплитуды. Для этого подставим оптимальные значения величины отрыва брусков в уравнение (5.13) и решим относительно A_6 :

$$A_6 = \sqrt{14.28 \Delta_{\text{опт}} (l_6 - r_{\text{ж}})}.$$

На рис. 5.24 представлена зависимость амплитуды колебания брусков от изменения длины бруска с державкой при $\Delta_{\text{опт}} = 0.001$ мм.

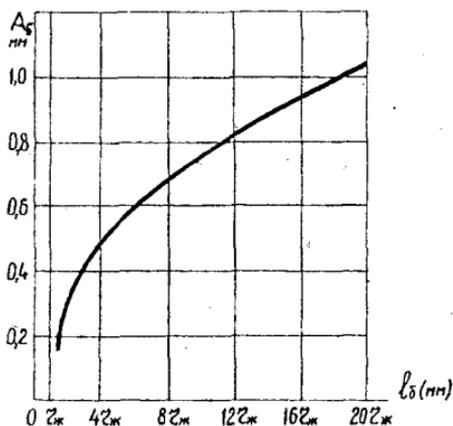


Рис. 5.24. Зависимость амплитуды колебания брусков от изменения длины бруска при $\Delta_{\text{опт}} = 0.001$ мм

При этом длина бруска с державкой выражена в долях значений радиуса обрабатываемой поверхности изделия. Подобным же образом нашли оптимальные характеристику инструмента, время врезания и время выхаживания при обработке. После обработки на ЭВМ имеем: $Z_{\text{опт}} = M10$, $T_{\text{вр.опт}} = 6$ с, $T_{\text{вых.опт}} = 2$ с.

5.6. Статистический анализ точности формообразования

Анализ точности суперфиниширования производили на Саратовском подшипниковом заводе. Последовательность испытаний состояла в следующем:

1. С желобошлифовального автомата модели ЛЗ-190, настроенного на окончательное шлифование желобов внутренних колец шарикоподшипников 206, взяли текущую выборку объемом 400 штук.
2. Произвели 100% контроль шероховатости, волнистости, отклонений от круглости, гранности и погрешности профиля желобов данной партии колец шарикоподшипников.
3. Отобранные изделия разделили случайным образом на две одинаковые партии по 200 штук в каждой.
4. Одну партию колец обработали на многобрусковом автомате с рациональными режимами, другую - на микрофинишном станке типа КМ-1 фирмы "Эрнст Тиленхаус" с режимами, принятыми на СПЗ-3.
5. После суперфиниширования произвели 100% контроль шероховатости, волнистости, гранности, отклонений от круглости и погрешности профиля желобов обеих партий колец шарикоподшипников.

При статистической обработке полученных данных использовали известную методику [164], согласно которой построены кривые распределения для обеих партий изделий. Результаты обработки данных представлены в таблицах 5.5-5.8 и на рис. 5.25, 5.26.

Как видно из рисунков, предложенный способ суперфиниширования обеспечивает в 1.5 раза меньше волнистость и отклонения от круглости желобов колец шарикоподшипников по сравнению с обработкой, осуществляемой на станках фирмы "Эрнст Тиленхаус". При этом снижается машинное время обработки примерно в 2 раза.

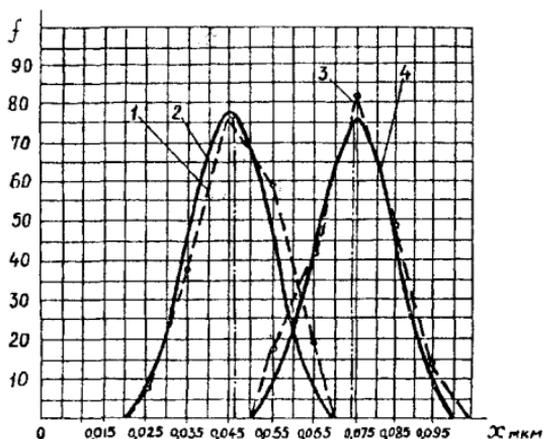


Рис. 5.25. Кривые нормального распределения волнистости желобов колец шарикоподшипников: 1 - эмпирическая; 2 - теоретическая после обработки на многобрусковом автомате; 3 - эмпирическая; 4 - теоретическая после обработки на станке КМ-1 (ФРГ)

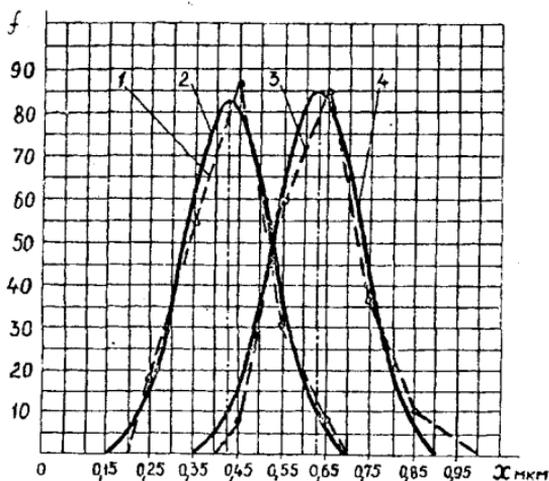


Рис. 5.26. Кривые нормального распределения отклонения от круглости желобов колец шарикоподшипников: 1 - эмпирическая; 2 - теоретическая после обработки на многобрусковом автомате; 3 - эмпирическая; 4 - теоретическая после обработки на станке КМ-1 (ФРГ)

Представляет практический интерес исследование характера влияния величины исходной погрешности формы профиля обрабатываемой поверхности на ее точность после суперфиниширования. На основании полученных данных установили корреляционную связь между отклонениями криволинейного профиля желобов колец до обработки и после обработки на многобрусковом автомате.

При изучении корреляционных связей возникают три основных вопроса: наличие связи, форма связи и сила связи. Для получения ответов на эти вопросы вычислили коэффициент корреляции и корреляционное отношение. На основании полученных данных составили табл. 5.9. Статистические значения частот n_x отклонений криволинейного профиля до суперфиниширования и статистические значения частот m_y этих отклонений после суперфиниширования записывали в табл. 5.9. Используя данные табл. 5.9, вычисляли статистические характеристики распределений исходных погрешностей криволинейного профиля:

$$\bar{x} = \frac{\sum n_x x}{\sum n_x} = \frac{434}{200} = 2.17 \text{ мкм};$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum n_x x^2}{\sum n_x} - \bar{x}^2} = \frac{1140}{200} - (2.17)^2 = 0.995 \text{ мкм},$$

где \bar{X} - среднее арифметическое значение отклонений профиля до суперфиниширования;

σ_x - среднее квадратическое отклонение значений x_i от среднего \bar{X} .

Для определения статистических характеристик распределений отклонений профиля желоба после суперфиниширования использовали формулы [64]:

$$\bar{y} = \frac{\sum m_y y}{\sum m_y} = \frac{370}{200} = 1.85 \text{ мм},$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum m_y y^2}{\sum m_y} - \bar{y}^2} = \frac{870}{200} - (1.85)^2 = 0.963 \text{ мкм},$$

Таблица 5.5

Статистическая обработка величины волнистости желобов партии колец шарикоподшипников, обработанных на экспериментальной установке

| Разряды x_i | x_i | f_i | $\frac{x_i - a_{ц}}{C_p}$ | $\frac{(x_i - a_{ц})^2}{C_p^2}$ | $ t $ | Z_t | $\frac{n_1 C_p Z_t}{S}$ | f'_i | N_x | N'_x | $ N_x - N'_x $ | $ f_i - f'_i $ | $\frac{(f_i - f'_i)^2}{f'_i}$ |
|---------------|-------|----------------|---------------------------|---------------------------------|-------|--------|-------------------------|-----------------|-------|--------|----------------|----------------|-------------------------------|
| | | | | | | | | | | | | | |
| 0.02 | 0.025 | 8 | -2 | -16 | 2.255 | 0.0317 | 6.56 | 7 | 8 | 6.56 | 1.44 | 1 | 0.14 |
| 0.03 | 0.035 | 38 | -1 | -38 | 1.234 | 0.1872 | 38.2 | 38 | 46 | 44.76 | 1.24 | 0 | 0 |
| 0.04 | 0.045 | 76 | 0 | 0 | 0.214 | 0.390 | 79.63 | 80 | 122 | 124.39 | 2.39 | 4 | 0.2 |
| 0.05 | 0.05 | 59 | 1 | 59 | 0.806 | 0.289 | 59.12 | 59 | 181 | 183.51 | 2.51 | 0 | 0 |
| 0.06 | 0.065 | 19 | 2 | 38 | 1.82 | 0.0761 | 15.53 | 16 | 200 | 200 | 0 | 3 | 0.56 |
| $a_H=0.045$ | | $\Sigma f_i =$ | | | | | | $\Sigma f'_i =$ | | | | | $\chi^2 =$ |
| $C_p=0.01$ | | $=200$ | | | | | | $=200$ | | | | | $=0.902$ |

Таблица 5.6

Статистическая обработка отклонений величин волнистости желобов партии колец шарикоподшипников, обработанных на станке-автомате типа КМ-1 фирмы "Эрнст Тилехауз"

| Разряды x_i | x_i | f_i | $\frac{x_i - a_H}{C_p}$ | $\frac{(x_i - a_H) \cdot x_i}{C_p}$ | $\frac{(x_i - a_H)^2}{C_p^2}$ | $ t $ | Z_t | $\frac{n_i C_p Z_t}{S}$ | f'_i | N_x | N'_i | $ N_x - N'_i $ | $ f_i - f'_i $ | $\frac{(f_i - f'_i)^2}{f'_i}$ |
|---------------|-------|----------------|-------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-------|--------|-------------------------|-----------------|-------|--------|----------------|----------------|-------------------------------|
| | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.05 | 0.055 | 17 | -2 | -34 | 68 | 1.941 | 0.0608 | 11.92 | 12 | 17 | 11.92 | 5.08 | 5 | 2.08 |
| 0.06 | 0.065 | 42 | -1 | -42 | 42 | 0.960 | 0.2516 | 49.63 | 50 | 59 | 61.55 | 2.55 | 8 | 1.28 |
| 0.07 | 0.075 | 82 | 0 | 0 | 0 | 0.019 | 0.398 | 78.83 | 79 | 141 | 140.38 | 0.62 | 3 | 0.113 |
| 0.08 | 0.085 | 45 | 1 | 45 | 45 | 1.0 | 0.242 | 47.65 | 48 | 186 | 188.03 | 2.03 | 3 | 0.187 |
| 0.09 | 0.095 | 14 | 2 | 28 | 56 | 1.98 | 0.0562 | 11.01 | 11 | 200 | 200 | 0 | 3 | 0.818 |
| $a_H=0.075$ | | $\Sigma f_i =$ | | | | | | | $\Sigma f'_i =$ | | | | | $\chi^2 =$ |
| $C_p=0.01$ | | $=200$ | | | | | | | $=200$ | | | | | $=4.473$ |

Расчет коэффициента корреляции r_{xy}

| Значения у, мкм | Значения х, мкм | | | | | Номера столбцов | | |
|-----------------------|-----------------|------|------|------|------|-----------------|----------|-----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 |
| | Частоты х | | | | | m_y | m_{xy} | m_{y^2} |
| 1 | 50 | 40 | — | — | — | 90 | 90 | 90 |
| 2 | 5 | 25 | 35 | — | — | 65 | 130 | 260 |
| 3 | 1 | 10 | 21 | 3 | — | 35 | 105 | 315 |
| 4 | — | — | — | 2 | 3 | 5 | 20 | 80 |
| 5 | — | — | — | — | 5 | 5 | 25 | 125 |
| n_x | 56 | 75 | 56 | 5 | 8 | 200 | 370 | 870 |
| $n_x x$ | 56 | 150 | 168 | 20 | 40 | 434 | — | — |
| $n_x x^2$ | 56 | 300 | 504 | 80 | 200 | 1140 | — | — |
| $n_{xy} y$ | 63 | 120 | 133 | 17 | 37 | 370 | — | — |
| $x \sum n_{xy} y$ | 63 | 240 | 399 | 68 | 185 | 955 | — | — |
| \bar{y}_x | 1.12 | 1.60 | 2.37 | 3.40 | 4.37 | — | — | — |

где \bar{y} - среднее арифметическое значение отклонений профиля после суперфиниширования;

σ_y - среднее квадратическое отклонение значений y_i от средней \bar{y} .

Величину ковариации x и y определяли из выражения:

$$C_{xy} = \frac{\sum (x \sum n_{xy} y)}{\sum n_x} - \bar{x} \bar{y} = \frac{955}{200} - 2.17 \cdot 1.85 = 0.7605,$$

где C_{xy} - ковариация x и y .

Коэффициент корреляции находили по формуле:

$$r_{xy} = \frac{C_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{0.7605}{0.995 \cdot 0.963} = 0.793,$$

где r_{xy} - коэффициент корреляции x и y .

Близость коэффициента корреляции к единице указывает на довольно тесную прямолинейную корреляционную связь между x и y . Для определения уравнения регрессии $\bar{y}_x = f(x)$ составили табл.5.10.

Таблица 5.10

Расчет среднего квадратичного отклонения $\sigma_{\bar{y}_x}$ значений частной средней \bar{y}_x от общей средней \bar{y}

| x | n_x | \bar{y}_x | $\bar{y}_x - \bar{y}$ | $(\bar{y}_x - \bar{y})^2$ | $n_x(\bar{y}_x - \bar{y})^2$ |
|------------------|-------|-------------|-----------------------|---------------------------|---|
| 1 | 56 | 1.12 | -0.725 | 0.525 | 29.435 |
| 2 | 75 | 1.6 | -0.25 | 0.0625 | 4.687 |
| 3 | 56 | 2.37 | 0.52 | 0.2704 | 15.142 |
| 4 | 5 | 3.40 | 1.55 | 2.402 | 12.012 |
| 5 | 8 | 4.35 | 2.77 | 7.67 | 61.383 |
| $\sum n_x = 200$ | | | | | $\sum n_x(\bar{y}_x - \bar{y})^2 = 122.659$ |

Используя данные табл. 5.10, определили:

$$\sigma_{\bar{y}_x} = \sqrt{\frac{\sum n_x(\bar{y}_x - \bar{y})^2}{\sum n_x}} = \frac{122.659}{200} = 0.783,$$

$$\eta_y = \frac{\sigma_{\bar{y}_x}}{\sigma_y} = \frac{0.783}{0.963} = 0.801,$$

где η_y - корреляционное отношение.

Таким образом, $\eta_y \approx r_{xy}$. Это равенство указывает на наличие точной линейной регрессии y от x .

На основании этого заключения уравнение линейной регрессии можно представить в виде [164]:

$$\bar{y}_x = a_c + b_c x,$$

где a_c - величина погрешности, возникающей на данной операции;

b_c - коэффициент регрессии, показывающий, какая часть погрешности входа перенесена на погрешность выхода.

Для составления уравнения связи вычислены значения b_c и a_c :

$$b_c = r_{xy} \frac{\sigma_y}{\sigma} = 0.793 \frac{0.963}{0.995} = 0.767,$$

$$a_c = \bar{y} - b_c \bar{x} = 1.85 - 0.767 \cdot 2.11 = 0.19 \text{ мкм.}$$

Подставляя найденные значения в уравнение (5.25), получим:

$$\bar{y}_x = 0.19 + 0.767x. \quad (5.26)$$

Следовательно, средняя погрешность профиля на выходе складывается из двух компонентов: из исправленной в 0.233 раза погрешности входа и погрешности, возникшей на данной операции и равной 0.19 мкм.

На рис. 5.27 представлен график линейной связи погрешности \bar{y}_x геометрической формы профиля суперфинишированных желобов колец шарикоподшипников от исходной погрешности x .

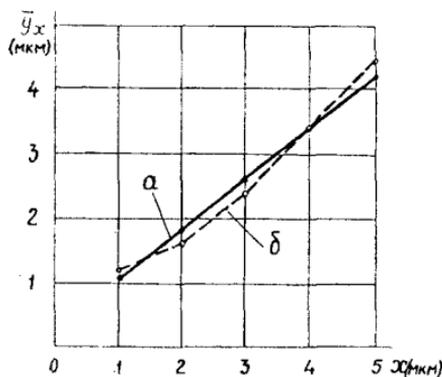


Рис. 5.27. График линейной корреляционной связи исходной погрешности x профиля желобов колец шарикоподшипников с выходной \bar{y}_x после суперфиниширования: а - теоретическая; б - эмпирическая линия регрессии.

После вычисления дисперсий собственных случайных погрешностей данной операции σ_{yx}^2 и дисперсии погрешностей входа $b_c \sigma_x^2$ имеем:

$$\sigma_{yx}^2 = \sigma_y^2 (1 - r_{xy}) = 0.963^2 (1 - 0.793) = 0.344,$$

$$b_c \sigma_x^2 = 0.767^2 \cdot 0.995^2 = 0.582.$$

Определим величину допуска $2\delta_x$ профиля желоба на предшествующей операции, чтобы на данной операции суперфиниширования отклонения профиля не превосходили $2\delta_y=3$ мкм. Полагая, что распределение отклонений профиля на входе и на выходе является нормальным, необходимое значение σ_y на выходе определим из уравнения:

$$2\delta_y = 6\gamma_k \sigma_y,$$

откуда

$$\sigma_y = \frac{2\delta_y}{6\gamma_k} = \frac{3}{6 \cdot 1.098} = 0.455,$$

где коэффициент γ_k при доверительной вероятности $\alpha=0.95$ равен:

$$\gamma_k = 1 + \frac{t_\alpha}{\sqrt{2n_k}} = 1 + \frac{1.96}{\sqrt{2 \cdot 200}} = 1.098.$$

Дисперсию σ_x на входе определим по формуле:

$$\sigma_x = \sigma_y \frac{r_{xy}}{b_c} = 0.455 \frac{0.793}{0.767} = 0.481.$$

Допуск $2\delta_x$ профиля желоба кольца на предшествующей операции должен быть равен:

$$2\delta_x = 6\gamma_k \sigma_x = 6 \cdot 1.098 \cdot 0.481 = 3.2 \text{ мкм.}$$

Таким образом, установлено, что шероховатость и отклонения геометрических параметров обработанных желобов после многобрускового суперфиниширования осциллирующим инструментом с прерывистым контактом значительно меньше, чем при доводке традиционными методами суперфиниширования (рис.5.28-5.32).

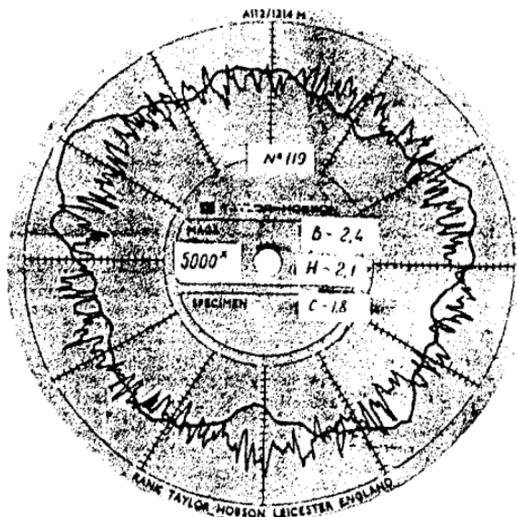


Рис. 5.28. Круглограмма исходной волнистости и некруглости желоба кольца № 206/02 шарикоподшипника



Рис. 5.29. Круглограмма волнистости и некруглости желоба кольца № 206/02 шарикоподшипника после многобрусковой доводки осциллирующим инструментом

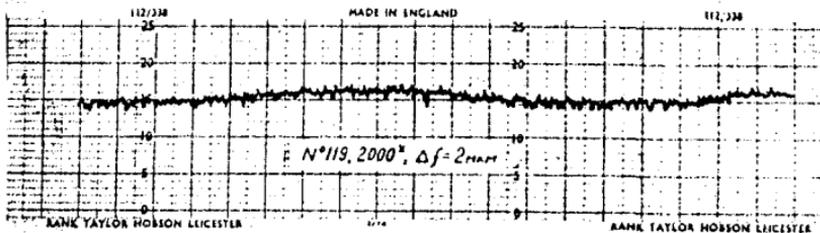
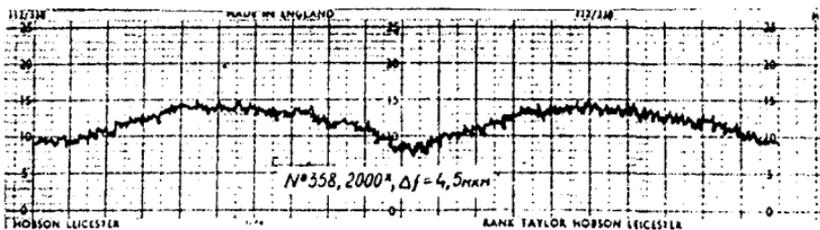


Рис. 5.30. Профилограммы исходного поперечного профиля дорожек качения колец № 206/02 шарикоподшипников

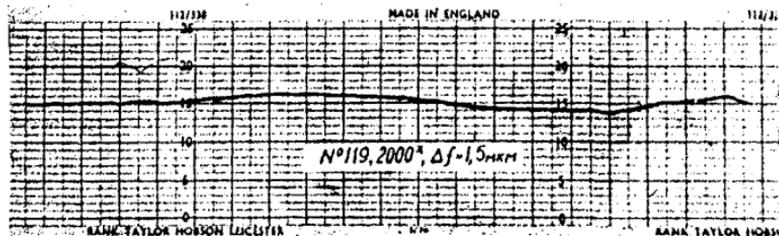
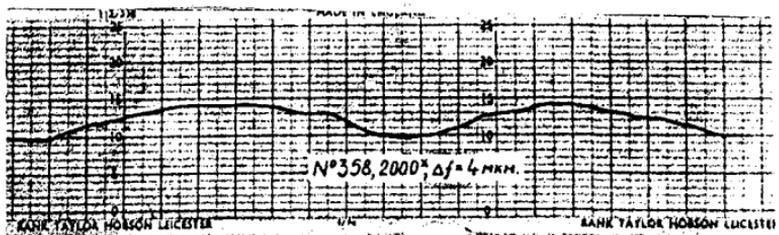
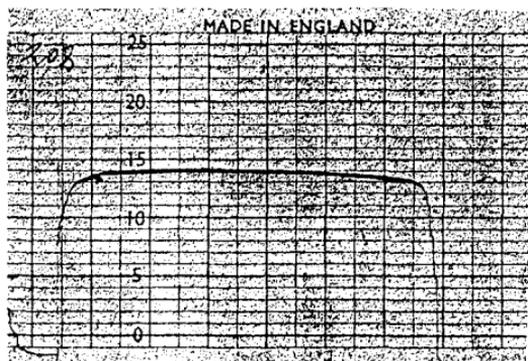
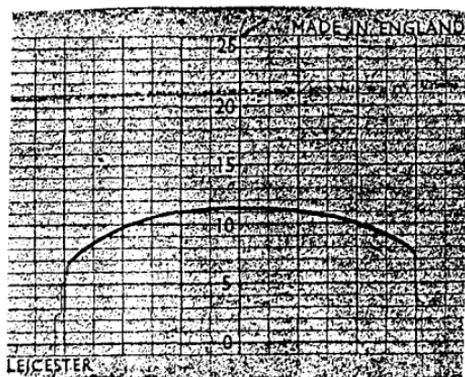


Рис. 5.31. Профилограммы поперечного сечения профиля дорожек колец №206/02 шарикоподшипников после многобрусковой доводки осциллирующим инструментом



а) $A = 2,5 \text{ мм}$, $n = 1740 \text{ дв.х./мин}$, $P = 0,27 \text{ Мпа}$, $n = 3654 \text{ об/мин}$, $T = 4 \text{ с}$, $T = 2 \text{ с}$



б) $A = 2,5 \text{ мм}$, $n = 760 \text{ дв.х./мин}$, $P = 0,27 \text{ Мпа}$, $n = 3654 \text{ об/мин}$, $T = 4 \text{ с}$, $T = 2 \text{ с}$

Рис. 5.32. Профилограммы роликовой дорожки наружного кольца роликоподшипника №42207, обработанной методом многобрускового суперфиниширования осциллирующим инструментом, при различных режимах осуществления процесса

Данный процесс обеспечивает в 1,5 раза меньшие значения волнистости и некруглости обрабатываемой поверхности по сравнению с классическим способом, реализованным, например, в суперфинишных станках фирмы "Теленхаус". При этом повышается производительность обработки за счет снижения машинного времени. С повышением частоты осцилляции и давления брусков резко увеличивается съем металла даже при использовании мелкозернистых брусков (M7, M10).

Для осуществления однопозиционной обработки желобов целесообразно расчлнить процесс доводки на 2 перехода: на первом переходе обеспечить интенсивное удаление дефектного слоя и исправление исходных погрешностей геометрической формы поверхности за счет работы с повышенными частотой и амплитудой осцилляции брусков в режиме врезания; на втором переходе - обеспечить формирование заданной величины шероховатости поверхности за счет снижения частоты осцилляции брусков и перевода их в режим выхаживания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной части публикуемой серии работ представлены теоретические основы многобрускового суперфиниширования прецизионных деталей с прерывистым и периодическим контактом брусков и поверхности обработки. На базе теоретико-вероятностного подхода исследован механизм формообразования профиля обрабатываемых поверхностей, выявлены закономерности исправления погрешностей геометрической формы заготовок в продольном и поперечном сечениях. Получены теоретические и эмпирические модели многобрускового суперфиниширования дорожек качения колец подшипников, отражающие влияние режимов суперфиниширования на производительность, точность и качество обработки, учитывающие технологическую схему доводки, кинематику перемещения инструмента, его характеристику, а также нестационарность режима резания. Показано, что многобрусковое суперфиниширование с локализацией контакта обеспечивает повышенную производительность и точность обработки по сравнению с традиционными методами однобрусковой доводки.

В последующих частях данной серии будут представлены оригинальные конструкции технологического оборудования для многобрускового суперфиниширования прецизионных деталей и результаты исследований его технологических возможностей.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

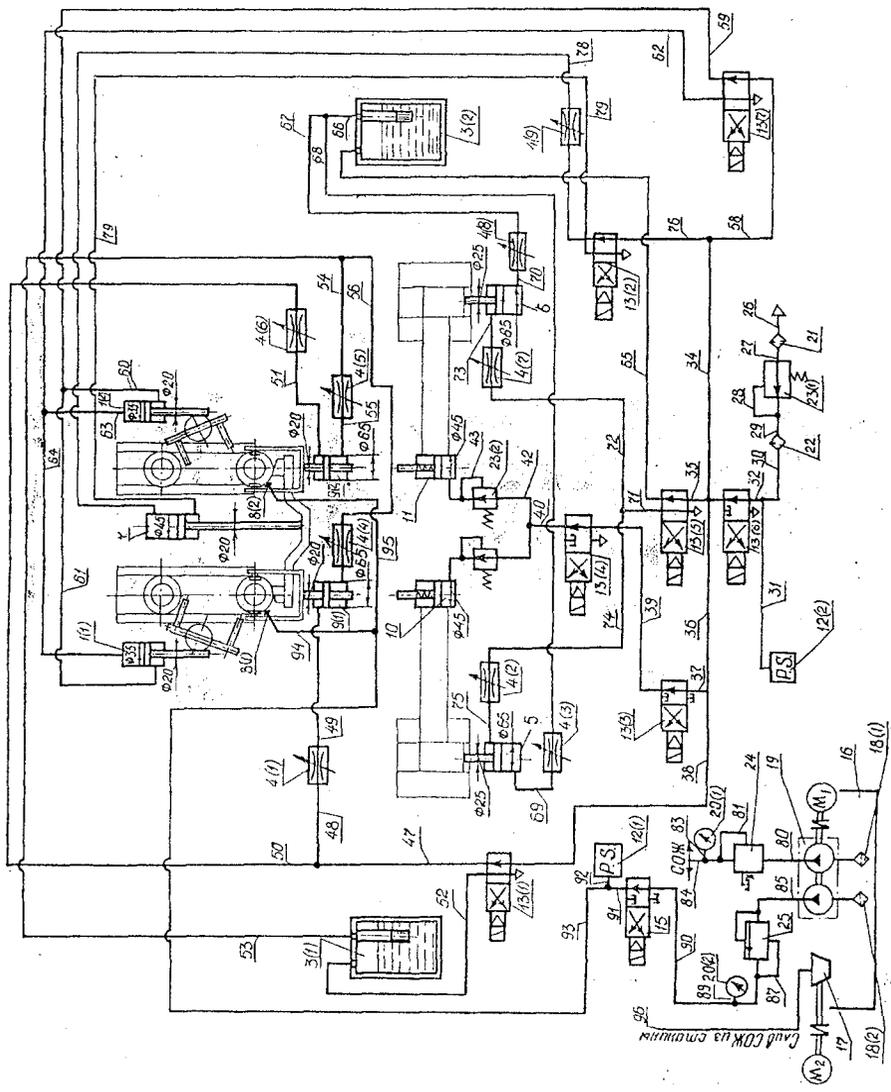


Схема пневмогидравлическая автомата модели МА-1

ЖУРНАЛ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

| КОНТРОЛИРУЕМЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ | | | А, мм | | ПРИЛОЖЕНИЕ 2 | | | | | | | | | | | | | Общая оценка | |
|--|----------------|--------------|-------|------|---|-----------|-----------|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|--------------------|
| | | | в, см | мм | $\varphi = f(p, P, p_{1,1}, A)$ | | | | | | | | | | | | | | |
| Верхний уровень | Нижний уровень | Осн. уровень | 1,700 | 1,0 | Оценки коэффициентов 1. уровня | | | | | | | | | | | | | Общие значения | |
| 8,00 | 4,00 | 2,000 | 1,05 | 0,1 | β_0 | β_1 | β_2 | β_3 | $\beta_{0,1}$ | $\beta_{0,2}$ | $\beta_{0,3}$ | $\beta_{1,2}$ | $\beta_{1,3}$ | $\beta_{2,3}$ | $\beta_{0,1,2}$ | $\beta_{0,1,3}$ | $\beta_{0,2,3}$ | $\beta_{0,1,2,3}$ | |
| 150 | 1180 | 550 | 1,735 | 0,55 | Результаты расчета дисперсии отклонения г.-измеря от средних значений | | | | | | | | | | | | | Общие значения | |
| 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,00236 | 0,00236 | 0,00236 | 0,00236 | 0,00097 | 0,00097 | 0,00097 | 0,00182 | 0,00182 | 0,00182 | 0,000336 | 0,000336 | 0,000336 | 0,000336 | |
| Центральная выборка | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ | | | | | | | | | | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ |
| Материал 1. Планирование по уровню | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ | | | | | | | | | | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ |
| факторного эксперимента в контрольных условиях | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ | | | | | | | | | | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ |
| параметры: Экспериментальные режимы, характеристики, факторы | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ | | | | | | | | | | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ |
| Материал: Контролируемые режимы, характеристики, факторы | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ | | | | | | | | | | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ |
| факторы: Контролируемые режимы, характеристики, факторы | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ | | | | | | | | | | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ |
| Материал: Контролируемые режимы, характеристики, факторы | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ | | | | | | | | | | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ |
| факторы: Контролируемые режимы, характеристики, факторы | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ | | | | | | | | | | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ |
| Материал: Контролируемые режимы, характеристики, факторы | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ | | | | | | | | | | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ |
| факторы: Контролируемые режимы, характеристики, факторы | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ | | | | | | | | | | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ |
| Материал: Контролируемые режимы, характеристики, факторы | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ | | | | | | | | | | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ |
| факторы: Контролируемые режимы, характеристики, факторы | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ | | | | | | | | | | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ |
| Материал: Контролируемые режимы, характеристики, факторы | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ | | | | | | | | | | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ |
| факторы: Контролируемые режимы, характеристики, факторы | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ | | | | | | | | | | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ |
| Материал: Контролируемые режимы, характеристики, факторы | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ | | | | | | | | | | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ |
| факторы: Контролируемые режимы, характеристики, факторы | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ | | | | | | | | | | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ |
| Материал: Контролируемые режимы, характеристики, факторы | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ | | | | | | | | | | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ |
| факторы: Контролируемые режимы, характеристики, факторы | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ | | | | | | | | | | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ |
| Материал: Контролируемые режимы, характеристики, факторы | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ | | | | | | | | | | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ |
| факторы: Контролируемые режимы, характеристики, факторы | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ | | | | | | | | | | | | | | $\sigma_{0,1,2,3}$ |

$$y = 1,565 + 0,41X_1 + 0,141X_2 + 0,199X_3 + 0,413X_4$$

Планы и дата выполнения / Планы и дата проведения:

ЖУРНАЛ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Условные обозначения:

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

$R_0 = f(P_{12}, P_6, P_{21}, A)$

| Порядок выполнения опыта | Планы | Факторы | | | | | | | | | | Уровни | Результаты эксперимента и дисперсии от средних значений | Результаты расчетов та для факторов и - дисперсии модели | Объемы указаний | | | | | | | |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|---|--|-----------------|-----------|----------|----------|----------|----------|-------------------|---------------------|
| | | X_0 | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | $X_1 X_2$ | $X_1 X_3$ | $X_1 X_4$ | $X_2 X_3$ | $X_2 X_4$ | | | | | $X_3 X_4$ | | | | | | |
| 1 | 10 | + | - | - | - | - | + | + | + | + | + | + | + | -2,205 | -2,159 | -2,125 | -2,160 | 0,01124 | -2,163 | 0,00020 | 1. Широколетов | |
| 2 | 9 | + | + | - | - | - | + | + | + | + | + | + | + | -1,765 | -1,577 | -1,369 | -1,368 | 0,03181 | -1,750 | 0,00032 | 2. Изымать на | |
| 3 | 12 | + | + | + | - | - | - | + | + | + | + | + | + | -1,489 | -1,615 | -1,454 | -1,550 | 0,00912 | -1,562 | 0,00104 | 3. Изменить на | |
| 4 | 11 | + | + | + | + | - | - | - | + | + | + | + | + | -1,460 | -0,992 | -1,153 | -1,153 | 0,02456 | -1,150 | 0,00081 | 4. Изменить на | |
| 5 | 9 | + | + | + | + | - | - | - | + | + | + | + | + | -2,668 | -2,579 | -2,751 | -2,670 | 0,01475 | -2,679 | 0,00081 | 5. Те же факторы | |
| 6 | 15 | + | + | + | - | - | - | - | + | + | + | + | + | -2,048 | -2,216 | -2,597 | -2,278 | 0,02264 | -2,210 | 0,00064 | 6. Те же факторы | |
| 7 | 4 | + | + | + | + | - | - | - | + | + | + | + | + | -2,054 | -1,930 | -2,190 | -2,260 | 0,01657 | -2,252 | 0,00064 | 7. План 5-го | |
| 8 | 7 | + | + | + | + | - | - | - | + | + | + | + | + | -1,810 | -1,952 | -1,884 | -1,668 | 0,03190 | -1,640 | 0,00104 | 8. План 100 | |
| 9 | 6 | + | + | + | + | - | - | - | + | + | + | + | + | -2,042 | -1,988 | -1,878 | -1,878 | 0,00847 | -1,960 | 0,00100 | 9. Изменить на | |
| 10 | 16 | + | + | + | - | - | - | - | + | + | + | + | + | -1,409 | -1,524 | -1,757 | -1,578 | 0,02842 | -1,570 | 0,00064 | 10. Те же факторы | |
| 11 | 1 | + | + | + | - | - | - | - | + | + | + | + | + | -1,358 | -1,242 | -1,471 | -1,360 | 0,01472 | -1,359 | 0,00025 | 11. Те же факторы | |
| 12 | 5 | + | + | + | + | - | - | - | + | + | + | + | + | -0,965 | -0,800 | -1,136 | -0,968 | 0,02825 | -0,960 | 0,00064 | 12. Те же факторы | |
| 13 | 2 | + | + | + | + | - | - | - | + | + | + | + | + | -1,870 | -1,988 | -1,774 | -1,871 | 0,00941 | -1,865 | 0,00025 | 13. План 5-го | |
| 14 | 13 | + | + | + | - | - | - | - | + | + | + | + | + | -2,090 | -1,994 | -2,162 | -2,048 | 0,01096 | -2,040 | 0,00064 | 14. План 100 | |
| 15 | 3 | + | + | + | + | - | - | - | + | + | + | + | + | -1,766 | -1,870 | -1,944 | -1,820 | 0,00598 | -1,817 | 0,00064 | 15. Те же факторы | |
| 16 | 14 | + | + | + | + | - | - | - | + | + | + | + | + | -1,676 | -1,476 | -1,350 | -1,478 | 0,01490 | -1,478 | 0,00064 | 16. Те же факторы | |
| 17 | 17 | + | + | + | + | - | - | - | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| 18 | 18 | + | + | + | + | - | - | - | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| Коэффициенты | b_1 | 0,187 | 0,196 | 0,205 | 0,208 | 0,218 | 0,208 | 0,205 | 0,205 | 0,205 | 0,205 | 0,205 | 0,205 | 0,32899 | 0,32899 | 0,32899 | 0,32899 | 0,32899 | 0,32899 | 0,32899 | 0,32899 | Результаты расчетов |
| Проверка значимости коэффициентов | | | | | | | | | | | | | S^2 | 0,002204 | | | | | | | | |
| S^2 | 0,002204 | 0,002204 | 0,002204 | 0,002204 | 0,002204 | 0,002204 | 0,002204 | 0,002204 | 0,002204 | 0,002204 | 0,002204 | 0,002204 | 0,002204 | 0,002204 | 0,002204 | 0,002204 | 0,002204 | 0,002204 | 0,002204 | 0,002204 | 0,002204 | 0,002204 |
| $F_{0,95}$ | 5,99 | 5,99 | 5,99 | 5,99 | 5,99 | 5,99 | 5,99 | 5,99 | 5,99 | 5,99 | 5,99 | 5,99 | 5,99 | 5,99 | 5,99 | 5,99 | 5,99 | 5,99 | 5,99 | 5,99 | 5,99 | 5,99 |
| $F_{0,99}$ | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 |
| $t_{0,95}$ | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 |
| $t_{0,99}$ | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 |
| $F_{0,95}$ | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 |
| $F_{0,99}$ | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 | 16,26 |
| $t_{0,95}$ | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 |
| $t_{0,99}$ | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 |
| Выход | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 |
| Уравнение регрессии (неполная квадратичная модель) | | | | | | | | | | | | | $F_{0,95}$ | 16,26 | | | | | | | | |
| Уравнение регрессии (линейная модель) | | | | | | | | | | | | | $F_{0,95}$ | 16,26 | | | | | | | | |
| Уравнение регрессии (линейная модель) | | | | | | | | | | | | | $F_{0,95}$ | 16,26 | | | | | | | | |
| Уравнение регрессии (линейная модель) | | | | | | | | | | | | | $F_{0,95}$ | 16,26 | | | | | | | | |
| Уравнение регрессии (линейная модель) | | | | | | | | | | | | | $F_{0,95}$ | 16,26 | | | | | | | | |
| Уравнение регрессии (линейная модель) | | | | | | | | | | | | | $F_{0,95}$ | 16,26 | | | | | | | | |
| Уравнение регрессии (линейная модель) | | | | | | | | | | | | | $F_{0,95}$ | 16,26 | | | | | | | | |

$$y = -1,819 + 0,196 X_1 + 0,305 X_2 - 0,255 X_3 + 0,095 X_4$$

Получено и дата испытания: _____

ЖУРНАЛ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Удобрения, мелиорация

Водоудерживающие вещества

1962

Приложение 4
 $\Delta \rho = f(\rho_1, \rho_2, \rho_3, A)$

| Аграрные условия | Оценка координатной функции |
|------------------------------------|-----------------------------|
| 1. Вредные вредители | $\rho_0 \rightarrow \rho_0$ |
| 2. Влажность почвы | $\rho_1 \rightarrow \rho_1$ |
| 3. Приборный метод обработки почвы | $\rho_2 \rightarrow \rho_2$ |
| 4. Сухая саратов, 1974 - 1976 | $\rho_3 \rightarrow \rho_3$ |
| 5. Числовой и л. вкладки | $\rho_4 \rightarrow \rho_4$ |
| 6. Числовой и л. вкладки | $\rho_5 \rightarrow \rho_5$ |
| 7. Методы обработки почвы | $\rho_6 \rightarrow \rho_6$ |
| 8. Методы обработки почвы | $\rho_7 \rightarrow \rho_7$ |

| Результаты эксперимента и дисперсии отклонений фактора от средних значений | | | | | Результаты дисперсии отклонения фактора от средних значений | | | | | Результаты дисперсии отклонения фактора от средних значений | | | | |
|--|------------|------------|------------|------------|---|------------|------------|------------|------------|---|------------|------------|------------|------------|
| (ρ_1) | (ρ_2) | (ρ_3) | (ρ_4) | (ρ_5) | (ρ_1) | (ρ_2) | (ρ_3) | (ρ_4) | (ρ_5) | (ρ_1) | (ρ_2) | (ρ_3) | (ρ_4) | (ρ_5) |
| 0,128 | 0,154 | 0,072 | 0,113 | 0,0189 | 0,079 | 0,001150 | 0,001150 | 0,001150 | 0,001150 | 0,001150 | 0,001150 | 0,001150 | 0,001150 | 0,001150 |
| -0,23 | -0,257 | -0,316 | -0,233 | 0,000850 | -0,205 | 0,001780 | 0,001780 | 0,001780 | 0,001780 | 0,001780 | 0,001780 | 0,001780 | 0,001780 | 0,001780 |
| 1,025 | 1,074 | 1,075 | 1,084 | 0,00254 | 1,045 | 0,00080 | 0,00080 | 0,00080 | 0,00080 | 0,00080 | 0,00080 | 0,00080 | 0,00080 | 0,00080 |
| 0,690 | 0,727 | 0,638 | 0,680 | 0,00170 | 0,641 | 0,00120 | 0,00120 | 0,00120 | 0,00120 | 0,00120 | 0,00120 | 0,00120 | 0,00120 | 0,00120 |
| -0,915 | -0,876 | -0,955 | -0,916 | 0,00159 | -0,895 | 0,00140 | 0,00140 | 0,00140 | 0,00140 | 0,00140 | 0,00140 | 0,00140 | 0,00140 | 0,00140 |
| -1,244 | -1,328 | -1,160 | -1,244 | 0,00106 | -1,219 | 0,00120 | 0,00120 | 0,00120 | 0,00120 | 0,00120 | 0,00120 | 0,00120 | 0,00120 | 0,00120 |
| 0,049 | 0,035 | 0,045 | 0,032 | 0,00021 | 0,041 | 0,00008 | 0,00008 | 0,00008 | 0,00008 | 0,00008 | 0,00008 | 0,00008 | 0,00008 | 0,00008 |
| -0,222 | -0,190 | -0,234 | -0,223 | 0,00097 | -0,223 | 0,00130 | 0,00130 | 0,00130 | 0,00130 | 0,00130 | 0,00130 | 0,00130 | 0,00130 | 0,00130 |
| -0,071 | -0,058 | -0,072 | -0,072 | 0,00100 | -0,065 | 0,00052 | 0,00052 | 0,00052 | 0,00052 | 0,00052 | 0,00052 | 0,00052 | 0,00052 | 0,00052 |
| -0,391 | -0,350 | -0,424 | -0,392 | 0,00100 | -0,419 | 0,00120 | 0,00120 | 0,00120 | 0,00120 | 0,00120 | 0,00120 | 0,00120 | 0,00120 | 0,00120 |
| 0,747 | 0,802 | 0,660 | 0,704 | 0,00139 | 0,741 | 0,00125 | 0,00125 | 0,00125 | 0,00125 | 0,00125 | 0,00125 | 0,00125 | 0,00125 | 0,00125 |
| 0,511 | 0,466 | 0,557 | 0,512 | 0,00210 | 0,517 | 0,00025 | 0,00025 | 0,00025 | 0,00025 | 0,00025 | 0,00025 | 0,00025 | 0,00025 | 0,00025 |
| -1,067 | -1,019 | -1,116 | -1,058 | 0,00230 | -1,059 | 0,00001 | 0,00001 | 0,00001 | 0,00001 | 0,00001 | 0,00001 | 0,00001 | 0,00001 | 0,00001 |
| 1,308 | 1,330 | 1,165 | 1,308 | 0,00162 | 1,303 | 0,00025 | 0,00025 | 0,00025 | 0,00025 | 0,00025 | 0,00025 | 0,00025 | 0,00025 | 0,00025 |
| -0,157 | -0,107 | -0,188 | -0,158 | 0,00092 | -0,153 | 0,00002 | 0,00002 | 0,00002 | 0,00002 | 0,00002 | 0,00002 | 0,00002 | 0,00002 | 0,00002 |
| -0,595 | -0,462 | -0,518 | -0,462 | 0,00093 | -0,457 | 0,00025 | 0,00025 | 0,00025 | 0,00025 | 0,00025 | 0,00025 | 0,00025 | 0,00025 | 0,00025 |
| 0,032 | 0,048 | 0,032 | 0,032 | 0,00131 | 0,033 | 0,00001 | 0,00001 | 0,00001 | 0,00001 | 0,00001 | 0,00001 | 0,00001 | 0,00001 | 0,00001 |

| Средние значения | |
|-------------------|-----------|
| S^2_{max} | 0,007106 |
| F | 2,058 |
| $\chi^2_{ad}, \%$ | 5% |
| V_1, ad | 16-5=11 |
| V_2, ad | 32 |
| F _{кр} | 2,105 |
| F-F _{кр} | -0,047 |
| выбор | наблюдать |

Уравнение регрессии (линейная модель)
 $Y = -0,819 - 0,162 X_1 + 0,468 X_2 - 0,487 X_3 - 0,087 X_4$

| Аграрные условия | | | Оценки координатной функции | | |
|------------------|----------|----------|-----------------------------|----------|----------|
| ρ_0 | ρ_1 | ρ_2 | ρ_3 | ρ_4 | ρ_5 |
| 0,000 | 1,000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 400 | 0,42 | 600 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| 1200 | 0,735 | 1150 | 0,55 | 0,55 | 0,55 |
| 800 | 0,315 | 550 | 0,45 | 0,45 | 0,45 |

| Матрица планирования фактора эксперимента или фактора эксперимента в комбинации факторов | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Матрица планирования фактора эксперимента в комбинации факторов | | | | | | | | | | | | | | |
| X_0 | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | X_5 | X_6 | X_7 | X_8 | X_9 | X_{10} | X_{11} | X_{12} | X_{13} | X_{14} |
| + | + | - | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| + | - | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| - | + | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| - | - | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| + | + | + | + | - | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| + | + | + | + | - | - | + | - | - | - | - | - | - | - | - |
| + | + | + | + | - | - | - | + | - | - | - | - | - | - | - |
| + | + | + | + | - | - | - | - | + | - | - | - | - | - | - |
| + | + | + | + | - | - | - | - | - | + | - | - | - | - | - |
| + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | + | - | - | - | - |
| + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | - | + | - | - | - |
| + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | - | - | + | - | - |
| + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | + | - |
| + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | + |
| + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

| Проверка значимости координатной функции | |
|--|-----------|
| S^2_{max} | 0,007106 |
| G | 0,219 |
| $\chi^2_{ad}, \%$ | 5% |
| V_1, ad | 3-1=2 |
| V_2, ad | 16 |
| G _{кр} | 0,315 |
| G - G _{кр} | -0,096 |
| выбор | наблюдать |

Уравнение регрессии (неполная квадратичная модель)
 $Y = e^{-0,201 \ln \rho_1 + 1,021 \ln \rho_2 - 0,943 \ln \rho_3 - 0,075 \ln A}$

ЖУРНАЛ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

| Контрольные параметры | | Факторы | | Матрица | |
|--|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
| № п/п | № п/п | № п/п | № п/п | № п/п | № п/п | № п/п | № п/п | № п/п | № п/п | № п/п | № п/п | № п/п | № п/п | № п/п | № п/п | № п/п | № п/п | № п/п | № п/п | № п/п | № п/п |
| Верхний уровень | 2000 | 1,05 | 1,700 | 1,0 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Нижний уровень | 400 | 0,42 | 600 | 0,1 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Основной уровень | 1200 | 0,735 | 1150 | 0,55 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Центральный уровень | 800 | 0,315 | 550 | 0,45 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Материал планирования полного факторного эксперимента или факторного эксперимента в методах обозначения параметров | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Контролируемые режимы, параметры, факторы | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Параметр, режим | Фактор | Фактор | Фактор |
| № п/п | № п/п | № п/п | № п/п | № п/п | № п/п | № п/п | № п/п | № п/п | № п/п | № п/п | № п/п | № п/п | № п/п | № п/п | № п/п | № п/п | № п/п | № п/п | № п/п | № п/п | № п/п |
| 1 | 10 | 9 | 1 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 2 | 7 | 11 | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 3 | 12 | 6 | 9 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 4 | 11 | 12 | 7 | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 5 | 9 | 10 | 10 | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 6 | 15 | 5 | 8 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 7 | 4 | 15 | 6 | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 8 | 7 | 8 | 2 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 9 | 6 | 2 | 3 | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 10 | 16 | 7 | 4 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 11 | 1 | 4 | 14 | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 12 | 5 | 13 | 3 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 13 | 2 | 11 | 13 | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 14 | 13 | 14 | 15 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 15 | 3 | 14 | 12 | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 16 | 14 | 16 | 12 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 16 | 14 | 16 | 12 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |

Проверка значимости коэффициентов

S^2_{max} 0,028576 S^2_{ed} 0,000915

G 0,008229 F 0,572

$q, \%$ 5% $q_{ad}, \%$ 5%

$V_{i,6}$ 3-1-2 $V_{i,ed}$ 16-5-11

$V_{i,8}$ $M=16$ $V_{i,ed}$ 3,2

$G_{i,0}$ 0,315 $F_{i,0}$ 2,105

$G_{i,0,0}$ -0,027 $F_{i,0,0}$ 1,592

Выбор дисперсии одной фактор

Уравнение регрессии (линейная модель)

$Y = -2,322x_1 - 0,255x_2 + 0,328x_3 - 0,442x_4 - 0,089x_5$

Получен и дата испытания: Получен и дата разработки:

| Испытуемые параметры | T, C | Тек | НВА | З | Исходные значения | Оценки коэффициентов уравнения |
|----------------------|--------|-----|-----|------|---|---|
| Верхний уровень | 30 | 10 | 50 | 14 | 1. Король А.В. Векторные производные элементов ч. 66. | $\beta_0 \rightarrow \beta_0$ $\beta_1 \rightarrow \beta_1$ $\beta_2 \rightarrow \beta_2$ $\beta_3 \rightarrow \beta_3$ $\beta_4 \rightarrow \beta_4$ |
| Нижний уровень | 5 | 1 | 20 | 7 | Матрица элементов ч. 66. | $\beta_{2,3} \rightarrow \beta_{2,3}$ $\beta_{2,4} \rightarrow \beta_{2,4}$ $\beta_{3,4} \rightarrow \beta_{3,4}$ $\beta_{3,5} \rightarrow \beta_{3,5}$ $\beta_{2,3,4} \rightarrow \beta_{2,3,4}$ |
| Основной уровень | 17,5 | 5,5 | 3,5 | 10,5 | Дополнение к матрице элементов ч. 66. | |
| Центральный уровень | 12,5 | 4,5 | 1,5 | 3,5 | Полная матрица элементов ч. 66. | |

Материал планирования полного факторного эксперимента или факторного эксперимента в методах обозначения переменных

Контролируемые режимы, характеристики, факторы

| Имя фактора | Уровни | Контролируемые режимы, характеристики, факторы | | | | | | | | | | | | | | | | Результаты расчета для факторных взаимодействий модели | Особые указания | | | | | |
|-------------|--------|--|-------|-------|-------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------|--|-----------------|-------|----------|-------|----------|--------------------------|
| | | X_0 | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | $X_1 X_2$ | $X_1 X_3$ | $X_1 X_4$ | $X_2 X_3$ | $X_2 X_4$ | $X_3 X_4$ | $X_1 X_2 X_3$ | $X_1 X_2 X_4$ | $X_1 X_3 X_4$ | $X_2 X_3 X_4$ | | | | | | | | |
| 1 | 10 | 9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,430 | 1,803 | 1,176 | 1,440 | 0,001302 | 1,435 | 0,000225 | 1. Величина градиента |
| 2 | 3 | 12 | 6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2,189 | 2,275 | 2,149 | 2,140 | 0,000854 | 2,195 | 0,000225 | Металлическая модель |
| 3 | 4 | 1 | 12 | 7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,785 | 1,828 | 1,759 | 1,784 | 0,001953 | 1,760 | 0,000576 | Роль на практике в 48,8% |
| 4 | 5 | 9 | 10 | 10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2,523 | 2,520 | 2,444 | 2,504 | 0,003376 | 2,510 | 0,000236 | Роль на практике в 48,8% |
| 5 | 6 | 15 | 5 | 8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,128 | 1,085 | 1,175 | 1,130 | 0,002034 | 1,150 | 0,000810 | Роль на практике в 48,8% |
| 6 | 7 | 5 | 8 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,885 | 1,853 | 1,916 | 1,885 | 0,000410 | 1,880 | 0,000225 | Роль на практике в 48,8% |
| 7 | 4 | 15 | 6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,475 | 1,514 | 1,433 | 1,474 | 0,004603 | 1,455 | 0,000361 | Металлическая модель |
| 8 | 7 | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2,201 | 2,166 | 2,185 | 2,184 | 0,000302 | 2,215 | 0,000461 | Роль на практике в 48,8% |
| 9 | 6 | 2 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,870 | 1,850 | 1,892 | 1,872 | 0,000420 | 1,875 | 0,000209 | Роль на практике в 48,8% |
| 10 | 16 | 7 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2,640 | 2,565 | 2,718 | 2,642 | 0,005902 | 2,630 | 0,000144 | Роль на практике в 48,8% |
| 11 | 1 | 4 | 14 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2,186 | 2,128 | 2,243 | 2,166 | 0,003310 | 2,200 | 0,000144 | Роль на практике в 48,8% |
| 12 | 5 | 13 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2,986 | 2,952 | 3,023 | 2,988 | 0,002290 | 2,946 | 0,001819 | Роль на практике в 48,8% |
| 13 | 2 | 11 | 13 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,544 | 1,581 | 1,580 | 1,582 | 0,000290 | 1,575 | 0,000169 | Роль на практике в 48,8% |
| 14 | 13 | 14 | 15 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2,320 | 2,362 | 2,362 | 2,322 | 0,001670 | 2,325 | 0,000210 | Роль на практике в 48,8% |
| 15 | 3 | 16 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,908 | 1,880 | 1,837 | 1,909 | 0,000830 | 1,895 | 0,000210 | Роль на практике в 48,8% |
| 16 | 14 | 16 | 12 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2,658 | 2,708 | 2,803 | 2,656 | 0,002514 | 2,642 | 0,000196 | Роль на практике в 48,8% |

Корреляционные коэффициенты

| | |
|-------------|-------|
| ρ_{01} | 0,195 |
| ρ_{02} | 0,200 |
| ρ_{03} | 0,200 |
| ρ_{04} | 0,200 |
| ρ_{05} | 0,200 |
| ρ_{06} | 0,200 |
| ρ_{07} | 0,200 |
| ρ_{08} | 0,200 |
| ρ_{09} | 0,200 |
| ρ_{10} | 0,200 |
| ρ_{11} | 0,200 |
| ρ_{12} | 0,200 |
| ρ_{13} | 0,200 |
| ρ_{14} | 0,200 |
| ρ_{15} | 0,200 |
| ρ_{16} | 0,200 |
| ρ_{17} | 0,200 |
| ρ_{18} | 0,200 |
| ρ_{19} | 0,200 |
| ρ_{20} | 0,200 |
| ρ_{21} | 0,200 |
| ρ_{22} | 0,200 |
| ρ_{23} | 0,200 |
| ρ_{24} | 0,200 |
| ρ_{25} | 0,200 |
| ρ_{26} | 0,200 |
| ρ_{27} | 0,200 |
| ρ_{28} | 0,200 |
| ρ_{29} | 0,200 |
| ρ_{30} | 0,200 |
| ρ_{31} | 0,200 |
| ρ_{32} | 0,200 |
| ρ_{33} | 0,200 |
| ρ_{34} | 0,200 |
| ρ_{35} | 0,200 |
| ρ_{36} | 0,200 |
| ρ_{37} | 0,200 |
| ρ_{38} | 0,200 |
| ρ_{39} | 0,200 |
| ρ_{40} | 0,200 |
| ρ_{41} | 0,200 |
| ρ_{42} | 0,200 |
| ρ_{43} | 0,200 |
| ρ_{44} | 0,200 |
| ρ_{45} | 0,200 |
| ρ_{46} | 0,200 |
| ρ_{47} | 0,200 |
| ρ_{48} | 0,200 |
| ρ_{49} | 0,200 |
| ρ_{50} | 0,200 |

Проверка значимости коэффициентов

| | |
|--|-------|
| S^2 | 0,005 |
| $S^2 \{b_i\}$ | 0,005 |
| $S^2 \{b_i^2\}$ | 0,005 |
| $S^2 \{b_i b_j\}$ | 0,005 |
| $S^2 \{b_i b_j b_k\}$ | 0,005 |
| $S^2 \{b_i b_j b_k b_l\}$ | 0,005 |
| $S^2 \{b_i b_j b_k b_l b_m\}$ | 0,005 |
| $S^2 \{b_i b_j b_k b_l b_m b_n\}$ | 0,005 |
| $S^2 \{b_i b_j b_k b_l b_m b_n b_o\}$ | 0,005 |
| $S^2 \{b_i b_j b_k b_l b_m b_n b_o b_p\}$ | 0,005 |
| $S^2 \{b_i b_j b_k b_l b_m b_n b_o b_p b_q\}$ | 0,005 |
| $S^2 \{b_i b_j b_k b_l b_m b_n b_o b_p b_q b_r\}$ | 0,005 |
| $S^2 \{b_i b_j b_k b_l b_m b_n b_o b_p b_q b_r b_s\}$ | 0,005 |
| $S^2 \{b_i b_j b_k b_l b_m b_n b_o b_p b_q b_r b_s b_t\}$ | 0,005 |
| $S^2 \{b_i b_j b_k b_l b_m b_n b_o b_p b_q b_r b_s b_t b_u\}$ | 0,005 |
| $S^2 \{b_i b_j b_k b_l b_m b_n b_o b_p b_q b_r b_s b_t b_u b_v\}$ | 0,005 |
| $S^2 \{b_i b_j b_k b_l b_m b_n b_o b_p b_q b_r b_s b_t b_u b_v b_w\}$ | 0,005 |
| $S^2 \{b_i b_j b_k b_l b_m b_n b_o b_p b_q b_r b_s b_t b_u b_v b_w b_x\}$ | 0,005 |
| $S^2 \{b_i b_j b_k b_l b_m b_n b_o b_p b_q b_r b_s b_t b_u b_v b_w b_x b_y\}$ | 0,005 |
| $S^2 \{b_i b_j b_k b_l b_m b_n b_o b_p b_q b_r b_s b_t b_u b_v b_w b_x b_y b_z\}$ | 0,005 |
| $S^2 \{b_i b_j b_k b_l b_m b_n b_o b_p b_q b_r b_s b_t b_u b_v b_w b_x b_y b_z b_{10}\}$ | 0,005 |

Уравнение регрессии (линейная модель)

$$y = 2,045 + 0,375 X_1 + 0,16 X_2 - 0,155 X_3 + 0,221 X_4$$

Подписи и дата составления (подпись и дата руководства)

ЖУРНАЛ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

УЧЕТНЫЕ ЛИСТЫ
СВЯЗАННЫЕ С РАБОТОЙ

0123456789

Формула

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

$R_0 = f(T_{\text{гн}}, \text{Тем. НРА})$

| Контролируемые параметры | $T_{\text{гн}}$ | Тем НРА | 3 мн | 14 | 7 | 10,5 | 3,5 |
|--------------------------|-----------------|---------|------|------|---|------|-----|
| Верхний урожай | 30 | 10 | 50 | 14 | 7 | 10,5 | 3,5 |
| Нижний урожай | 5 | 1 | 20 | 7 | | | |
| Основной урожай | 17,5 | 5,5 | 35 | 10,5 | | | |
| Штатная бархадань | 12,5 | 4,5 | 15 | 3,5 | | | |

Материал планирования почного факторного эксперимента или грабана факторного эксперимента в кордовых обозначениях переменных

Контролируемые режимы, характеристики, факторы

| Планируемые параметры | Контролируемые режимы, характеристики, факторы | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|
| | X_0 | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | X_5 | X_6 | X_7 | X_8 | X_9 | X_{10} | X_{11} | X_{12} | X_{13} |
| 1 | 10 | 9 | 1 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 2 | 8 | 1 | 11 | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 3 | 12 | 6 | 9 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 4 | 11 | 12 | 7 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 5 | 9 | 10 | 10 | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 6 | 15 | 5 | 8 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 7 | 4 | 15 | 6 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 8 | 7 | 2 | 2 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 9 | 7 | 2 | 2 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 10 | 16 | 7 | 14 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 11 | 7 | 4 | 4 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 12 | 5 | 13 | 3 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 13 | 2 | 11 | 13 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 14 | 13 | 14 | 15 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 15 | 3 | 3 | 16 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 16 | 14 | 16 | 12 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |

| Контролируемые параметры | Проверка значимости коэффициентов | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|-----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 15000 | 10000 | 4000 | 2000 | 1000 | 500 | 200 | 100 | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 1 |
| S^2 | 15000 | 10000 | 4000 | 2000 | 1000 | 500 | 200 | 100 | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 1 |
| 9% | 5% | 5% | 5% | 5% | 5% | 5% | 5% | 5% | 5% | 5% | 5% | 5% | 5% | 5% |
| V_{3n} | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 |
| t_{α} | t_{α} | t_{α} | t_{α} | t_{α} | t_{α} | t_{α} | t_{α} | t_{α} | t_{α} | t_{α} | t_{α} | t_{α} | t_{α} | t_{α} |
| Выход | Выход | Выход | Выход | Выход | Выход | Выход | Выход | Выход | Выход | Выход | Выход | Выход | Выход | Выход |

Уравнение регрессии (линейная модель)

$$y = -2,05 - 0,241X_1 - 0,5X_2 + 0,07X_3 + 0,27X_4$$

Полные и дата исполнения (Полные и дата выполнения)

ЖУРНАЛ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

УТВЕРЖАЮЩИЙ: _____
 СОСТАВИТЕЛЬ: _____
 АДРЕС: _____

| Контролируемые параметры | Тер. экв. | Тем. экв. | МДЧ экв. | З. м. экв. | Алгоритмы и условия проведения эксперимента | Время коэффициентов уравнения | Размеры матрицы для расчета оптимальности метода | Размеры уравнения | | | | | | | | | |
|---|-----------|-----------|----------|------------|---|--|--|-------------------------------------|--------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Верхний уровень | 30 | 10 | 50 | 14 | 1. Карман А. Исследование влияния температуры на скорость и качество взаимодействия металлов при образовании оксидов - см. отчеты 1974 - 1975 г.г. Число выходов из цикла - 10. | $\beta_0 \rightarrow \beta_0$ | $\beta_3 \rightarrow \beta_3$ | | | | | | | | | | |
| Нижний уровень | 5 | 1 | 20 | 7 | | $\beta_1 \rightarrow \beta_1$ | $\beta_4 \rightarrow \beta_4$ | $\beta_4 \rightarrow \beta_4$ | | | | | | | | | |
| Основной уровень | 17,5 | 5,5 | 35 | 10,5 | 2. Число выходов из цикла - 10. | $\beta_2 \rightarrow \beta_2$ | $\beta_5 \rightarrow \beta_5$ | | | | | | | | | | |
| Интервал дробления | 12,5 | 4,5 | 15 | 3,5 | | $\beta_3 \rightarrow \beta_3$ | $\beta_6 \rightarrow \beta_6$ | $\beta_{11} \rightarrow \beta_{11}$ | | | | | | | | | |
| Материал планирования полного факторного эксперимента или дробного факторного эксперимента в заданных обозначениях переменных | | | | | Результаты эксперимента и дисперсии отклонений от оптимальности | Размеры матрицы для расчета оптимальности метода | Размеры уравнения | | | | | | | | | | |
| Порядок рега: Контролируемые режимы, характеристики, факторы | | | | | От средних значений | | | | | | | | | | | | |
| Параметр | X_0 | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | X_5 | X_6 | X_7 | X_8 | X_9 | X_{10} | X_{11} | X_{12} | X_{13} | X_{14} | X_{15} | X_{16} |
| 1 | 10 | 1 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 2 | 8 | 1 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 3 | 12 | 6 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 4 | 11 | 2 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 5 | 9 | 10 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 6 | 15 | 5 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 7 | 4 | 15 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 8 | 7 | 8 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 9 | 6 | 2 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 10 | 16 | 7 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 11 | 1 | 4 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 12 | 5 | 13 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 13 | 2 | 11 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 14 | 3 | 14 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 15 | 3 | 3 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 16 | 14 | 16 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| Коэффициенты β_i | 0,205 | 0,028 | 0,055 | 0,105 | 0,150 | 0,200 | 0,250 | 0,300 | 0,350 | 0,400 | 0,450 | 0,500 | 0,550 | 0,600 | 0,650 | 0,700 | 0,750 |
| Проверка значимости коэффициентов | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| S^2 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| $S^2 \beta_i$ | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| $S^2 S$ | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| t_i | 36,03 | 49,82 | 15,5 | 60,34 | 33,27 | 0,94 | 1,13 | 1,01 | 0,86 | 1,03 | 1,37 | 1,72 | 2,07 | 2,42 | 2,77 | 3,12 | 3,47 |
| $V_{3n} = 32$ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| t_{α} | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $S_{0,01}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Выбор | знач. | знач. | знач. | знач. | знач. | знач. | кат. | кат. | кат. | кат. | кат. | кат. | кат. | кат. | кат. | кат. | кат. |
| Уравнение регрессии (исходная квадратичная модель) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $y = -0,209 - 0,289x_1 - 0,09x_2 + 0,35x_3 - 0,19x_4$ | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Подпись и дата составления: _____

ЖУРНАЛ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

ПРИЛОЖЕНИЕ 9

Величина коэффициентов градуса

$W_{\Sigma} = f(T_{гр}, T_{тем}, HBA, 3)$

| Исходные данные | Контролируемые факторы | | | | | | | Величина коэффициентов градуса | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--|--|--|--|---|---|---|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|---|---|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|---|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|---|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|---|---|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|---|---|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|--------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Т _{гр} | Т _{тем} | HBA | Э | Мем | У | В | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Верхний уровень | 30 | 40 | 50 | 14 | | | | $v_0 \rightarrow \beta_0$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Нижний уровень | 5 | 1 | 20 | 7 | | | | $v_1 \rightarrow \beta_1$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Основной уровень | 17,5 | 5,5 | 35 | 10,5 | | | | $v_2 \rightarrow \beta_2$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Штатный барьеров | 12,5 | 4,5 | 15 | 3,5 | | | | $v_3 \rightarrow \beta_3$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Материал планирования полного факторного эксперимента или градуса факторного эксперимента в годовых обозначениях параметров | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th>Контролируемые факторы</th> <th>Х₀</th> <th>Х₁</th> <th>Х₂</th> <th>Х₃</th> <th>Х₄</th> <th>Х₁Х₂</th> <th>Х₁Х₃</th> <th>Х₁Х₄</th> <th>Х₂Х₃</th> <th>Х₂Х₄</th> <th>Х₃Х₄</th> <th>Х₁Х₂Х₃</th> <th>Х₁Х₂Х₄</th> <th>Х₁Х₃Х₄</th> <th>Х₂Х₃Х₄</th> <th>Х₁Х₂Х₃Х₄</th> </tr> <tr> <td>1</td> <td>10</td> <td>9</td> <td>1</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>+</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>12</td> <td>6</td> <td>9</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>11</td> <td>12</td> <td>7</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>9</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>15</td> <td>5</td> <td>8</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>14</td> <td>15</td> <td>6</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>7</td> <td>8</td> <td>2</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>6</td> <td>2</td> <td>5</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>16</td> <td>7</td> <td>4</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>11</td> <td>1</td> <td>4</td> <td>14</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>12</td> <td>5</td> <td>13</td> <td>5</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>13</td> <td>2</td> <td>11</td> <td>15</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>14</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>15</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>15</td> <td>3</td> <td>5</td> <td>16</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>16</td> <td>14</td> <td>16</td> <td>12</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Коэффициенты</td> <td>0,51</td> <td>0,19</td> <td>0,257</td> <td>0,316</td> <td>0,905</td> <td>0,002</td> <td>0,004</td> <td>0,009</td> <td>0,002</td> <td>0,002</td> <td>0,002</td> <td>0,002</td> <td>0,002</td> <td>0,002</td> <td>0,002</td> <td>0,002</td> <td>0,002</td> </tr> </table> | | | | | | | Контролируемые факторы | Х ₀ | Х ₁ | Х ₂ | Х ₃ | Х ₄ | Х ₁ Х ₂ | Х ₁ Х ₃ | Х ₁ Х ₄ | Х ₂ Х ₃ | Х ₂ Х ₄ | Х ₃ Х ₄ | Х ₁ Х ₂ Х ₃ | Х ₁ Х ₂ Х ₄ | Х ₁ Х ₃ Х ₄ | Х ₂ Х ₃ Х ₄ | Х ₁ Х ₂ Х ₃ Х ₄ | 1 | 10 | 9 | 1 | - | - | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | 2 | 12 | 6 | 9 | - | - | + | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | 3 | 11 | 12 | 7 | - | - | + | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | 4 | 10 | 10 | 10 | - | - | + | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | 5 | 9 | 10 | 10 | - | - | + | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | 6 | 15 | 5 | 8 | - | - | + | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | 7 | 14 | 15 | 6 | - | - | + | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | 8 | 7 | 8 | 2 | - | - | + | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | 9 | 6 | 2 | 5 | - | - | + | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | 10 | 16 | 7 | 4 | - | - | + | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | 11 | 1 | 4 | 14 | - | - | + | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | 12 | 5 | 13 | 5 | - | - | + | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | 13 | 2 | 11 | 15 | - | - | + | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | 14 | 3 | 4 | 15 | - | - | + | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | 15 | 3 | 5 | 16 | - | - | + | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | 16 | 14 | 16 | 12 | - | - | + | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | Коэффициенты | 0,51 | 0,19 | 0,257 | 0,316 | 0,905 | 0,002 | 0,004 | 0,009 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 |
| Контролируемые факторы | | | | | | | | Х ₀ | Х ₁ | Х ₂ | Х ₃ | Х ₄ | Х ₁ Х ₂ | Х ₁ Х ₃ | Х ₁ Х ₄ | Х ₂ Х ₃ | Х ₂ Х ₄ | Х ₃ Х ₄ | Х ₁ Х ₂ Х ₃ | Х ₁ Х ₂ Х ₄ | Х ₁ Х ₃ Х ₄ | Х ₂ Х ₃ Х ₄ | Х ₁ Х ₂ Х ₃ Х ₄ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 10 | 9 | 1 | - | - | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 12 | 6 | 9 | - | - | + | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 11 | 12 | 7 | - | - | + | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 10 | 10 | 10 | - | - | + | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 9 | 10 | 10 | - | - | + | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 15 | 5 | 8 | - | - | + | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | 14 | 15 | 6 | - | - | + | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 7 | 8 | 2 | - | - | + | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | 6 | 2 | 5 | - | - | + | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 16 | 7 | 4 | - | - | + | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | 1 | 4 | 14 | - | - | + | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 5 | 13 | 5 | - | - | + | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | 2 | 11 | 15 | - | - | + | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | 3 | 4 | 15 | - | - | + | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | 3 | 5 | 16 | - | - | + | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | 14 | 16 | 12 | - | - | + | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Коэффициенты | 0,51 | 0,19 | 0,257 | 0,316 | 0,905 | 0,002 | 0,004 | 0,009 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| Проверка значимости коэффициентов | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------| | С ² (b ₀) | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | | 9% S | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | | 5% S | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | | t _{гр} - t _{кр} | 840,19 | 2,117 | 23,92 | 100,78 | 11,76 | 0,06 | 0,86 | 1,816 | 0,098 | 0,86 | 1,76 | 0,98 | | | | | | | t _{тем} - t _{кр} | 868,15 | 203,7 | 12,188 | 98,7 | 109,72 | -1,83 | -1,17 | -0,02 | -1,93 | -1,17 | -0,27 | 1,05 | | | | | | | Выбод | Знач. | мет | мет | мет | мет | мет | | | | | | | |

Результаты эксперимента и дисперсионный анализ от средних значений

Результаты регрессии (линейная модель)

$Y = -2,219 - 0,54X_1 - 0,316X_2 + 0,257X_3 - 0,286X_4$

Уравнение регрессии (нелинейная квадратичная модель)

В_н W_Σ = e^{-0,96} - 0,599 ln T_{гр} - 0,274 ln T_{тем} + 0,316 ln HBA - 0,821 ln 3

Получено и дата испытания

ЖУРНАЛ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

| | | | |
|-------------------|-----------------|-------------------|---|
| Аграрные сведения | Время измерения | Условия измерения | Результаты расчетов для факторов оптимальности модели |
| Апримные сведения | Время измерения | Условия измерения | Результаты расчетов для факторов оптимальности модели |
| Апримные сведения | Время измерения | Условия измерения | Результаты расчетов для факторов оптимальности модели |
| Апримные сведения | Время измерения | Условия измерения | Результаты расчетов для факторов оптимальности модели |
| Апримные сведения | Время измерения | Условия измерения | Результаты расчетов для факторов оптимальности модели |

| | | | |
|-------------------|-----------------|-------------------|---|
| Апримные сведения | Время измерения | Условия измерения | Результаты расчетов для факторов оптимальности модели |
| Апримные сведения | Время измерения | Условия измерения | Результаты расчетов для факторов оптимальности модели |
| Апримные сведения | Время измерения | Условия измерения | Результаты расчетов для факторов оптимальности модели |
| Апримные сведения | Время измерения | Условия измерения | Результаты расчетов для факторов оптимальности модели |
| Апримные сведения | Время измерения | Условия измерения | Результаты расчетов для факторов оптимальности модели |

Результаты регрессии (линейная модель)

$$\hat{y} = 1,47 - 0,265 X_1 - 0,125 X_2 - 0,276 X_3 + 0,134 X_4$$

Получено и дата измерения: 10.05.1960

Уравнение регрессии (неполная квадратичная модель)

$$\hat{y} = 2,735 - 1,037 L_2 A_5 - 0,379 L_2 A_3 - 0,493 L_2 A_2 + 0,276 A_4$$

Получено и дата измерения: 10.05.1960

Получено и дата измерения: 10.05.1960

ЖУРНАЛ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Ученый секретарь: *И.И. Иванов*
 Руководитель: *И.И. Иванов*
 Оценка коэффициентов: $\sigma = f(\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta t)$
 Адрес: *ул. Ленина, 10*
 Дата: *15.05.2024*

| | | | | |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|
| Планируемые параметры | $\Delta x, \text{мм}$ | $\Delta y, \text{мм}$ | $\Delta z, \text{мм}$ | $\Delta t, \text{с/мин}$ |
| Верхний уровень | 2,5 | 1,470 | 0,820 | 36,540 |
| Нижний уровень | 1,5 | 760 | 0,270 | 106,10 |
| Основной уровень | 2,0 | 1115 | 0,545 | 23,570 |
| Центральная точка | 0,5 | 3,55 | 0,275 | 129,6,5 |

Материал планирования: *позволяет эксперименту или фактору*
 факторизация эксперимента в коробках обозначенных переменных

| № п/п | Факторы | | | | | | | | | | | | | | | | Результаты экспериментов и дисперсии отклонений | Результаты расчета для факторизации дисперсии | Область изучения | | |
|-------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---|---|------------------|----------|-------|
| | X_0 | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | X_5 | X_6 | X_7 | X_8 | X_9 | X_{10} | X_{11} | X_{12} | X_{13} | X_{14} | X_{15} | | | | X_{16} | S^2 |
| 1 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| 2 | 8 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 |
| 3 | 12 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 0,009 | 0,009 | 0,009 | 0,009 |
| 4 | 7 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 |
| 5 | 0 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 0,009 | 0,009 | 0,009 | 0,009 |
| 6 | 15 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| 7 | 4 | 15 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 |
| 8 | 7 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 0,009 | 0,009 | 0,009 | 0,009 |
| 9 | 6 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 |
| 10 | 16 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 0,009 | 0,009 | 0,009 | 0,009 |
| 11 | 7 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 |
| 12 | 5 | 13 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 0,009 | 0,009 | 0,009 | 0,009 |
| 13 | 2 | 11 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 |
| 14 | 13 | 14 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 0,009 | 0,009 | 0,009 | 0,009 |
| 15 | 3 | 3 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 |
| 16 | 14 | 16 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 0,009 | 0,009 | 0,009 | 0,009 |

Контрольные значения: $S^2_{\text{max}} = 0,337309$
 $G = 0,161$
 $q, \% = 5\%$
 $V_{1,0} = 3-1=2$
 $V_{2,0} = N-16$
 $G - \bar{G}_{\text{вход}} = 0,315$
 $F_{\text{вход}} = 2,105$
 $F - F_{\text{вход}} = -0,027$
 Вывод: *использовать аппарат*

Проверка значимости коэффициентов: $S^2_{\text{max}} = 0,337309$
 $G = 0,161$
 $q, \% = 5\%$
 $V_{1,0} = 3-1=2$
 $V_{2,0} = N-16$
 $G - \bar{G}_{\text{вход}} = 0,315$
 $F_{\text{вход}} = 2,105$
 $F - F_{\text{вход}} = -0,027$
 Вывод: *использовать аппарат*

| | | | | | | | | | |
|--|---|-------------|---------------|-------------------|------------------|-------------------------------------|---------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| Проверка значимости коэффициентов | $S^2_{\text{max}} = 0,337309$ | $G = 0,161$ | $q, \% = 5\%$ | $V_{1,0} = 3-1=2$ | $V_{2,0} = N-16$ | $G - \bar{G}_{\text{вход}} = 0,315$ | $F_{\text{вход}} = 2,105$ | $F - F_{\text{вход}} = -0,027$ | Вывод: <i>использовать аппарат</i> |
| Уравнение регрессии (используя модель) | $\hat{y} = 1,572 + 0,337X_1 + 0,221X_2 + 0,267X_3 - 0,222X_4$ | | | | | | | | |

Получено и дата испытания: *15.05.2024*
 Подпись и дата: *И.И. Иванов*
 Подпись: *И.И. Иванов*

ЖУРНАЛ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Область: Калининская, индустриальный район: Дзержинский

Изм. № 12 $\varphi = f(\Delta r, \Delta t, \Delta \rho, \Delta \rho_1, \Delta \rho_2)$

| | | |
|---|----------------------|---------|
| Аппаратные условия | Оценки коэффициентов | Уровень |
| И. Купцев, А. В. Давыдович | 0,820 | 0,270 |
| Часовой оборотный выработка чугуна и железа при работе индукционной печи при работе на углеводороде, СВЧЧ, 1984, -1976. | 0,545 | 0,235 |

| | | |
|---|----------------------|---------|
| Аппаратные условия | Оценки коэффициентов | Уровень |
| И. Купцев, А. В. Давыдович | 0,820 | 0,270 |
| Часовой оборотный выработка чугуна и железа при работе индукционной печи при работе на углеводороде, СВЧЧ, 1984, -1976. | 0,545 | 0,235 |

| Контролируемые факторы | X ₀ | X ₁ | X ₂ | X ₃ | X ₄ | X ₅ | X ₆ | X ₇ | X ₈ | X ₉ | Коэффициенты регрессии | | | |
|------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | | | | | | | | | S ₁ | S ₂ | S ₃ | S ₄ |
| 1 | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 2 | 2 | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 3 | 3 | 1 | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 4 | 4 | 1 | 1 | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 5 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 6 | 6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 7 | 7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | - | - | - | - | - | - | - |
| 8 | 8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | - | - | - | - | - | - |
| 9 | 9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | - | - | - | - | - |
| 10 | 10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | - | - | - | - |
| 11 | 11 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | - | - | - |
| 12 | 12 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | - | - |
| 13 | 13 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | - |
| 14 | 14 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 15 | 15 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 16 | 16 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

| | | | |
|-------------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Результаты эксперимента и дисперсии | Средние значения | Средние значения | Средние значения |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---|
| Материал планирования факторного эксперимента или факторного плана эксперимента в виде обозначений факторных уровней | Х ₀ | Х ₁ | Х ₂ | Х ₃ | Х ₄ | Х ₅ | Х ₆ | Х ₇ | Х ₈ | Х ₉ | Х ₁₀ | Х ₁₁ | Х ₁₂ | Х ₁₃ | Х ₁₄ | Х ₁₅ | Х ₁₆ | Х ₁₇ | Х ₁₈ | Х ₁₉ | Х ₂₀ | |
| Контролируемые режимы, горизонтальные факторы | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

| | | | |
|-------------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Результаты эксперимента и дисперсии | Средние значения | Средние значения | Средние значения |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |

| | | | |
|-----------------------------|----------------------|------------------|------------------|
| Корреляционные коэффициенты | Результаты регрессии | Средние значения | Средние значения |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |

| | | | |
|---|-------------------|------------------|------------------|
| Удобные регрессии (используемая модель) | Удобные регрессии | Средние значения | Средние значения |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |
| Средняя выработка чугуна | 123,5 | 123,5 | 123,5 |

Удобные регрессии (используемая модель)

$Y = 2,702 + 0,205 X_1 + 0,449 X_2 + 0,688 X_3 + 0,198 X_4$

Полнос и дата испытаний

По завершению

ЖУРНАЛ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследовательская группа: ИЗВЕЩАНИЕ И4
 Дата проведения эксперимента: 12.5.74 (16.16.НРА.8)

| | | | | | |
|---------------------------|--------------------|--------------------|---------|-------|--|
| Контролируемые переменные | Т _в , с | Т _в , с | НРА, сВ | З, мм | |
| Верхний уровень | 20 | 10,0 | 50 | 74,0 | |
| Нижний уровень | 4 | 4,0 | 20 | 7,0 | |
| Основной уровень | 12 | 5,5 | 35 | 10,5 | |
| Центральная дробь | 8 | 4,5 | 15 | 3,5 | |

Априорные значения: Оценки дисперсий и ковариации

| Имя фактора | Контролируемые режимы, характеристики, факторы | | | | | | | | | | Результаты эксперимента и дисперсии от средних значений | Результат регрессии для фактора | Общие указания | | | | |
|-------------|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---|---------------------------------|----------------|-----------|-------|-----------|---------------|
| | X ₀ | X ₁ | X ₂ | X ₃ | X ₄ | X ₅ | X ₆ | X ₇ | X ₈ | X ₉ | | | | | | | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2,534 | 2,373 | 0,355 | 0,2260183 | 2,538 | 0,0332887 | Формы изделий |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,872 | 2,040 | 0,275 | 0,312274 | 1,988 | 0,0075769 | Материал |
| 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2,054 | 0,988 | 0,152 | 0,197383 | 2,344 | 0,027556 | Материал |
| 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,453 | 2,184 | 0,274 | 0,312383 | 1,814 | 0,0075769 | Материал |
| 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,504 | 1,775 | 0,267 | 0,197383 | 1,912 | 0,0075769 | Материал |
| 6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,024 | 1,723 | 0,226 | 0,1247414 | 1,262 | 0,027556 | Материал |
| 7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,141 | 2,116 | 0,382 | 0,214371 | 1,638 | 0,027556 | Материал |
| 8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,191 | 1,253 | 0,088 | 0,283371 | 1,288 | 0,0075769 | Материал |
| 9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,074 | 0,483 | 0,128 | 0,197383 | 1,254 | 0,027556 | Материал |
| 10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,110 | 0,917 | 0,156 | 0,197383 | 1,254 | 0,027556 | Материал |
| 11 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,335 | 2,008 | 0,270 | 0,197383 | 1,880 | 0,027556 | Материал |
| 12 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,604 | 1,244 | 0,244 | 0,152371 | 1,330 | 0,027556 | Материал |
| 13 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,783 | 1,024 | 0,201 | 0,152371 | 1,328 | 0,027556 | Материал |
| 14 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,336 | 0,918 | 0,588 | 0,214371 | 1,152 | 0,027556 | Материал |
| 15 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,336 | 0,254 | 0,355 | 0,0143825 | 0,604 | 0,027556 | Материал |
| 16 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,336 | 0,254 | 0,355 | 0,0143825 | 0,604 | 0,027556 | Материал |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|
| Контролируемые переменные | 1,571 | 0,225 | 0,087 | 0,363 | 0,212 | 0,054 | 0,024 | 0,036 | 0,040 | 0,026 | 0,076 | 0,057 | 0,5 | 0,380 | 0,716 | 0,380 | 0,716 |
| Проверка значимости дисперсий | Проверка значимости дисперсий | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Проверка значимости ковариаций | Проверка значимости ковариаций | | | | | | | | | | | | | | | | |
| S _в | S _в | | | | | | | | | | | | | | | | |
| q, % | q, % | | | | | | | | | | | | | | | | |
| V _в | V _в | | | | | | | | | | | | | | | | |
| t _в | t _в | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Выбор | Выбор | | | | | | | | | | | | | | | | |

Уравнение регрессии (линейная модель):

$$\hat{y} = 1,571 - 0,225 X_1 - 0,087 X_2 + 0,363 X_3 - 0,212 X_4 + 0,054 X_5 + 0,024 X_6 + 0,036 X_7 + 0,040 X_8 + 0,026 X_9 + 0,076 X_{10} + 0,057 X_{11} + 0,5 X_{12} + 0,380 X_{13} + 0,716 X_{14}$$

Дата и дата окончания: 12.5.74 / 16.16.НРА.8

ЖУРНАЛ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Общая характеристика эксперимента: Инициаторное определение

ПРИЛОЖЕНИЕ 15

| | | | | | | |
|---------------------------|--------|--------|----|------|----------------------|--------|
| Контролируемые переменные | Тем. С | НРА ФЭ | 3 | Мен | Оценка коэффициентов | уровня |
| Верхний уровень | 20 | 40.0 | 50 | 140 | | |
| Нижний уровень | 4 | 1.0 | 20 | 7.0 | | |
| Основной уровень | 12 | 5.5 | 35 | 10.5 | | |
| Центральный уровень | 8 | 4.5 | 45 | 3.5 | | |

Материал планирования данного факторного эксперимента или проведения факторного эксперимента в любых обобщающих переменных

Контролируемые режимы, факторности, факторы

Порядок реализации опыта

Планы опыта

| Планы опыта | | X ₀ | | X ₁ | | X ₂ | | X ₃ | | X ₄ | | X ₁ X ₂ | | X ₁ X ₃ | | X ₁ X ₄ | | X ₂ X ₃ | | X ₂ X ₄ | | X ₃ X ₄ | | X ₁ X ₂ X ₃ | | X ₁ X ₂ X ₄ | | X ₁ X ₃ X ₄ | | X ₂ X ₃ X ₄ | | X ₁ X ₂ X ₃ X ₄ | | |
|-------------|----|----------------|----|----------------|---|----------------|---|----------------|---|----------------|---|-------------------------------|---|-------------------------------|---|-------------------------------|---|-------------------------------|---|-------------------------------|---|-------------------------------|---|--|---|--|---|--|---|--|---|---|---|---|
| 1 | 10 | 9 | 1 | - | + | + | + | + | + | - | - | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| 2 | 8 | 7 | 1 | + | - | - | - | + | + | - | + | - | - | - | - | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| 3 | 12 | 6 | 9 | + | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 4 | 11 | 12 | 7 | + | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 5 | 9 | 10 | 10 | + | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 6 | 15 | 5 | 8 | + | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 7 | 14 | 15 | 6 | + | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 8 | 7 | 8 | 2 | + | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 9 | 16 | 7 | 4 | + | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 10 | 16 | 7 | 4 | + | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 11 | 7 | 14 | 14 | + | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 12 | 5 | 13 | 3 | + | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 13 | 2 | 11 | 13 | + | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 14 | 3 | 14 | 12 | + | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 15 | 5 | 3 | 16 | + | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 16 | 14 | 16 | 12 | + | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 17 | 14 | 16 | 12 | + | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

Корреляционные

Проверка значимости коэффициентов

| | | | | | | |
|-------------------------|-------------------------|-------------|-------------|-----|---------------|---------------|
| S^2_{Σ} (общ.) | S^2_{Σ} (ф. ст.) | S^2_{max} | S^2_{adj} | F | $F_{ad, 5\%}$ | $F_{ad, 5\%}$ |
| S^2_{Σ} (ф. ст.) | S^2_{Σ} (ф. ст.) | G | G | F | $F_{ad, 5\%}$ | $F_{ad, 5\%}$ |
| S^2_{Σ} (ф. ст.) | S^2_{Σ} (ф. ст.) | G | G | F | $F_{ad, 5\%}$ | $F_{ad, 5\%}$ |
| S^2_{Σ} (ф. ст.) | S^2_{Σ} (ф. ст.) | G | G | F | $F_{ad, 5\%}$ | $F_{ad, 5\%}$ |
| S^2_{Σ} (ф. ст.) | S^2_{Σ} (ф. ст.) | G | G | F | $F_{ad, 5\%}$ | $F_{ad, 5\%}$ |
| S^2_{Σ} (ф. ст.) | S^2_{Σ} (ф. ст.) | G | G | F | $F_{ad, 5\%}$ | $F_{ad, 5\%}$ |

Уравнение регрессии (линейная модель)

$$\ln \delta = e^{-3.585} + 0.515 \ln T_F + 0.444 \ln T_E + 0.496 \ln NRA + 0.900 \ln z$$

Подпись и дата составления: Подпись и дата руковода

Цели эксперимента: Инициаторное определение

Объем задания

Результаты расчетов для проверки соответствия модели

| | | | | | | | |
|---|-------------------------|-------------------------|-------------|-------------|-----|---------------|-----------------------------|
| Результаты эксперимента и дисперсии от средних значений | S^2_{Σ} (общ.) | S^2_{Σ} (ф. ст.) | S^2_{max} | S^2_{adj} | F | $F_{ad, 5\%}$ | Формы уравнений регрессии |
| | S^2_{Σ} (ф. ст.) | S^2_{Σ} (ф. ст.) | G | G | F | $F_{ad, 5\%}$ | Корреляционные коэффициенты |

| | | | | | |
|-------------------------|-------------------------|-------------|-------------|-----|---------------|
| S^2_{Σ} (общ.) | S^2_{Σ} (ф. ст.) | S^2_{max} | S^2_{adj} | F | $F_{ad, 5\%}$ |
| S^2_{Σ} (ф. ст.) | S^2_{Σ} (ф. ст.) | G | G | F | $F_{ad, 5\%}$ |
| S^2_{Σ} (ф. ст.) | S^2_{Σ} (ф. ст.) | G | G | F | $F_{ad, 5\%}$ |
| S^2_{Σ} (ф. ст.) | S^2_{Σ} (ф. ст.) | G | G | F | $F_{ad, 5\%}$ |
| S^2_{Σ} (ф. ст.) | S^2_{Σ} (ф. ст.) | G | G | F | $F_{ad, 5\%}$ |

Уравнение регрессии (линейная модель)

$$\hat{y} = 2.051 + 0.414X_1 + 0.289X_2 + 0.227X_3 + 0.312X_4$$

Подпись и дата составления: Подпись и дата руковода

ЖУРНАЛ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследовательская группа: С.В. Зинченко, И.В. Паниченко
 Приложение I7 $R_a = f(X_1, X_2, X_3, X_4)$

| Контролируемые переменные | Т _в , с | Т _с , с | HRM, ед | З, мм | Амплитуда колебаний | | Результаты эксперимента и дисперсии от средних значений | Результаты регрессии для факторов частоты моды | Объемы указаний | | | | | | | | |
|--|--|--------------------|----------------|----------------|---------------------|-------------------------------|---|--|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--|--|--|--|---|---|
| | | | | | Верхний уровень | Нижний уровень | | | | | | | | | | | |
| Верхний уровень | 20 | 10,0 | 50 | 14,0 | | | | | | | | | | | | | |
| Нижний уровень | 4 | 1,0 | 20 | 7,0 | | | | | | | | | | | | | |
| Основной уровень | 12 | 5,5 | 35 | 10,5 | | | | | | | | | | | | | |
| Интервал варьирования | 8 | 4,5 | 15 | 3,5 | | | | | | | | | | | | | |
| Материал планирования по методу факторного эксперимента или факторного факторного эксперимента в латинских обозначениях переменных | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Планирование | Контролируемые режимы, характеристики, факторы | | | | Л | | | | | | | | | | | | |
| Индикатор | X ₀ | X ₁ | X ₂ | X ₃ | X ₄ | X ₁ X ₂ | X ₁ X ₃ | X ₁ X ₄ | X ₂ X ₃ | X ₂ X ₄ | X ₃ X ₄ | X ₁ X ₂ X ₃ | X ₁ X ₂ X ₄ | X ₁ X ₃ X ₄ | X ₂ X ₃ X ₄ | X ₁ X ₂ X ₃ X ₄ | |
| 1 | + | + | - | - | - | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 2 | + | + | - | - | - | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 3 | + | + | - | - | - | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 4 | + | + | - | - | - | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 5 | + | + | - | - | - | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 6 | + | + | - | - | - | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 7 | + | + | - | - | - | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 8 | + | + | - | - | - | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 9 | + | + | - | - | - | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 10 | + | + | - | - | - | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 11 | + | + | - | - | - | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 12 | + | + | - | - | - | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 13 | + | + | - | - | - | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 14 | + | + | - | - | - | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 15 | + | + | - | - | - | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 16 | + | + | - | - | - | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| Корреляционные | $S^2_{\text{рег}} = 2,051 - 0,241X_1 - 0,307X_2 + 0,271X_3 + 0,002X_4$ | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Проверка значимости коэффициентов | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $S^2_{\text{рег}}$ | $S^2_{\text{рег}} = 2,051$ | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $S^2_{\text{факт}}$ | $S^2_{\text{факт}} = 0,001281$ | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $F_{0,95}$ | $F_{0,95} = 5,99$ | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $F_{0,99}$ | $F_{0,99} = 16,26$ | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $V_{0,95}$ | $V_{0,95} = 3,1$ | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $t_{0,95}$ | $t_{0,95} = 1,96$ | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $t_{0,99}$ | $t_{0,99} = 2,58$ | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Вывод | Вывод | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Уравнение регрессии (линейная модель) | | | | | | | | | | | | | | | | | |

$R_a R_a = e - 0,299X_1 + 0,460X_2 - 0,153X_3 + 0,153X_4 + 0,27X_5$
 $f' = -2,05 - 0,241X_1 - 0,3X_2 + 0,01X_3 + 0,27X_4$

Подпись и дата исполнения: _____
 Подпись и дата разработки: _____

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Королев А.В. Выбор оптимальной геометрической формы контактирующих поверхностей деталей машин и приборов. - Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1972. - 134 с.
2. Яхин Б.А. Прогрессивные конструкции подшипников качения // Тр.ин-та / ВНИПП. - М., 1981. №4. - С. 1-4.
3. Пинегин С.В., Орлов А.В., Табачников Ю.Б. Прецизионные опоры качения и опоры с газовой смазкой. - М.: Машиностроение, 1984. - С. 18.
4. Королев А.В., Давиденко О.Ю. Влияние геометрической формы дорожки качения роликоподшипника на его долговечность // Расчеты и испытания на контактную усталость материалов и деталей машин: Тез.докл. Всесоюзн. семинара. - М.: Госком. СССР по стандартам, 1984. - С. 85-86.
5. Welterentwickelte DKFDDR Zylinderrollenlager in leistung gesteigerter Ausfuhrung ("E"-Lager)// Hansa. - 1985. - 122. - №5. - P.487-488.
6. Спришевский А.И. Подшипники качения. - М.: Машиностроение, 1969. - 631с.
7. Галахов М.А. Влияние перекоса колец на распределение давления вдоль образующей цилиндрического ролика //Тр.ин-та/ ВНИПП. - М., 1974. - №5. - С.73-80.
8. Галахов М.А., Фланман Я.Ш. Оптимальная форма бомбинированного ролика //Вестн.машиностроения.- 1976. - №7. - С.36-37.
9. Саверский А.С. и др. Влияние перекоса колец на работоспособность подшипников качения: Обзор. - М.: НИИНАвтопром, 1976. - 55 с.
10. Батенков С.В. Влияние перекоса на долговечность роликоподшипников: Обзор.- М.: НИИНАвтопром, 1981. - 46 с.
11. Батенков С.В. Оптимизация конструкций цилиндрических роликоподшипников //Тр. ин-та/ВНИПП. - М., 1982. - №3(113). - С. 28-37.

12. Бережинский В.М. Влияние перекоса колец бомбинированного конического роликоподшипника на характер контакта торца ролика с опорными бортами //Тр.ин-та / ВНИПП. - М., 1981.- №2. С.28-30.
13. Schehaude В. Optimale Walehorpoprofilierung von Zylinderrollenlagern //Konstruktion. - 1980. - 32, №1. - S. 19-25.
14. Tellian T. The tribology of roller bearings //Design Engineering. - 1984. - X. - P. 77-89.
15. Kamata K. Teknology of roller bearings//Kekay no kandy. - 1984. -T. 36. № 9. - P. 981-985.
16. Kugellager-Zeitschrift 230. Fachzeitschrift für die lagertechnik. Jahrgang, 62. SKF, Göteborg, 1989. - 36 S.
17. Kannel J.W. Comparison between predicted and measured asial pressure distribution between cylinders //Trans.ASK8.-1974.- (Suly).-P.508-514.
18. Филатова Р.М., Битюцкий Ю.И., Матюшин С.И. Новые методы расчета цилиндрических роликовых подшипников//Некоторые проблемы современной математики и их приложения к задачам математической физики: Сб.статей. - М.:Изд-во МФТИ, 1985. - С.137-143.
19. Лейках Л.М. Исправление скрещивания осей роликов и колец в роликоподшипниках //Вестн.машиностроения. - 1978. - №10. - С.27-29.
20. А.с. 800450 СССР, МКИ 16С 33/34. Ролик для подшипников качения / В.Э. Новиков.// Открытия. Изобретения. 1981. №4. - С.118.
21. Пат. 12.48.411П ФРГ, МКИ 16С 19/52, 33/34. Цилиндрический роликоподшипник.//РЖ. Машиностроительные материалы, конструкции и расчет деталей машин. Гидропривод. - 1984. №12. - С.9.
22. Орлов А.В. Опоры качения с поверхностями сложной формы. - М.: Наука, 1983. - 125 с.
23. Орлов А.В. Оптимизация рабочих поверхностей опор качения. - М.: Наука, 1973.- 83 с.

24. А.с. 320655 СССР, МКИ F 16 C 19/06. Шарикоподшипник/ А.В. Королев, С.Г. Редько // Открытия. Изобретения. 1971. №34. - С. 87.

25. А.с. 1141237 СССР, МКИ F 16 C 19/06. Подшипник качения/ А.В. Королев // Открытия. Изобретения. 1985. №7. - С. 114.

26. Брозголь И.М., Алакшин Б.В. Влияние доводочных рисок на долговечность подшипников//Подшипниковая промышленность.-1972. - №11. - С.18-23.

27. Брозголь И.М. Влияние доводки желобов колец на качество подшипников:Обзор.-М.:НИИНАвтопром,1973.-С.46-52.

28. Прилуцкий В.А. Технологические методы снижения волнистости поверхностей. - М.: Машиностроение, 1978.-136с.

29. Маталин А.А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин.-Киев: Техника, 1971.-144с.

30. Абразивная и алмазная обработка материалов /Под ред. А.Н.Резникова.-М.:Машиностроение, 1977.-391 с.

31. А.с. 475255 СССР, МКИ В 24В 1/100, 35/00. Способ отделочной обработки цилиндрических поверхностей, ограниченных бургами./ А.В. Гришкевич, А.В. Ступина// Открытия. Изобретения. 1975. №24. - С.33.

32. Акилов А.И. Исследование нестационарных режимов процесса суперфинишной обработки шеек коленчатых валов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. - Харьков, 1979. - 19 с.

33. Бочкарева И.И. Исследование процессов образования выпуклой поверхности цилиндрических роликов при бесцентровом суперфинишировании с продольной подачей: Дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. - Саратов, 1974. - 179 с.

34. Прогрессивные методы хонингования /С.И.Куликов, Ф.Ф. Ризванов и др. - М.: Машиностроение, 1983. - 136 с.

35. Заявка №3007314 ФРГ. Способ суперфиниширования дорожек качения колец с буртиками и устройство для его осуществления //

Выдержки из патентных заявок для всеобщего ознакомления.-1982.-С.13-14.

36. А.с. 837773 СССР, МКИ В24В 1/00, 19/00. Способ суперфиниширования беговых дорожек подшипников качения /В.А.Петров, А.Н.Рузанов // Открытия. Изобретения.1981.№22. - С.76.

37. Абразивная и алмазная обработка материалов/ Под. ред. А.Н. Резникова. - М.: Машиностроение, 1977. - 391 с.

38. Чеповецкий И.А. Основы финишной алмазной обработки.-Киев: Наукова думка,1980.-467с.

39. Ing. W. Klemm. Flinziehschleifen von Wözlager-Zaufrillen // Fertigungstechnik und Betrieb. 1965. №9. S. 536-540.

40. Корчак С.Н. Исследование обрабатываемости сталей при шлифовании кругами разной характеристики: Дис. ... канд.техн.наук:05.02.08.-М.,1962.-16 с.

41. Королев А.В., Новоселов Ю.К. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Часть 1.Состояние рабочей поверхности абразивного инструмента. - Саратов: Изд-во Саратов. ун-та,1987.-106 с.

42. Стратиевский И.Х. Глубина внедрения зерен бруска в поверхность бруска при суперфинишировании//Резание и инструмент.- 1980. - С.15-18.

43. Евсеев Д.Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке. - Саратов: Изд-во СГУ, 1979. - 247 с.

44. Прилуцкий В.А. Исследование инерционных сил при абразивной обработке поверхностей вращения // СТИН.- 1996.-№3.- С. 21-24.

45. Черневский Л.В. Основные направления повышения качества и долговечности подшипников на основе совершенствования технологии шлифовально-доводочной обработки рабочих поверхностей деталей // Труды ВНИПП. - 1980. - № 4 (106). - С. 7-17.

46. Совершенствование технологии финишной обработки колец подшипников / Б.М.Бродский, А.Л.Черневский, А.И.Алферов и др.: Обзор. - М.: ВНИИП. - 1990. - 66 с.

47. Колтунов И.Б. и др. Прогрессивные процессы абразивной алмазной и эльборовоой обработки в подшипниковом производстве.- М.: Машиностроение, 1976.-30 с.

48. Наерман М.С., ПоповС.А. Прецизионная обработка деталей алмазными и абразивными брусками.-М.:Машиностроение,1971.-222 с.

49. Редько С.Г., Королев А.В., Плотников В.М. Исследование процесса суперфиниширования с дополнительным движением бруска//Финишная обработка абразивно-алмазными инструментами.- М.,1973.- С.83-85.

50. А.с.292755 СССР, МКИ В 24В 33/00. Способ обработки дорожки качения шарикоподшипника/С.Г. Редько, А.В. Королев, А.И. Спришевский // Открытия. Изобретения, 1972, №8.- С.92.

51. Корьячев А.Н., Косов М.Г., Лысанов Л.Г. Контактное взаимодействие бруска с желобом кольца подшипника при суперфинишировании // Технология, организация и экономика машиностроительного производства.-1981.-№6.- С. 34-39.

52. Корьячев А.Н. Влияние характера движения бруска и параметров процесса на стружкообразование при суперфинишировании //Технология производства, НОТ и управление.- 1979.-№7.- С.18-24.

53. Королев А.В., Капulyник С.И., Евсеев Д.Г. Комбинированный способ шлифования -доводки качающимся кругом. - Саратов: Изд-во Саратов. ун-та,1983.-96 с.

54. Королев А.В., Новоселов Ю.К. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Часть 2. Взаимодействие инструмента и заготовки при абразивной обработке.- Саратов: Изд-во Саратов. ун-та,1989.-160 с.

55. Чекалин В.К., Давиденко О.Ю. Устройство для осуществления способа шлифования-доводки качающимся кругом//Чистовая обработка деталей машин: Межвуз. сб. - Саратов, 1983. - С. 16.

56. Бычков В.С., Березняк Р.А., Давиденко О.Ю. Устройство для правки шлифовального круга//Чистовая обработка деталей машин: Межвуз. сб. - Саратов, 1983. - С. 29.

57. А.с. 317490 СССР, МКИ В24В 33/00. Способ суперфиниширования желобов колец шарикоподшипников / С.Ю. Палей // Открытия. Изобретения, 1976. №12. - С.54.

58. А.с. 283844 СССР, МКИ В24В 33/00. Способ финишной обработки желобов колец шарикоподшипников / С.Г. Мазин, И.М. Брозголь // Открытия. Изобретения.1969. №18. - С. 22.

59. Ройтерштейн Э.Х., Рахматулин Р.В. Микродоводка одно- и двухбортовых внутренних колец роликоподшипников // Подшипниковая промышленность. - М.: НИИНАвтопром, 1973. Вып. 4. - С. 15-23.

60. Таратынов О.В. Основы процесса суперфиниширования и пути повышения его производительности и качества. - М.: МАМИ, 1977. 86 с.

61. Доводочный автомат модели 91А/Техническое описание.-ГПЗ-4.-Куйбышев, 1979. - 42 с.

62. Ультразвуковое суперфиниширование абразивными и алмазными брусками / И.Д. Гебель, А.А. Зыков и др. - М.: Машиностроение, 1984.- 56 с.

63. Марков А.И. Ультразвуковая обработка материалов.-М.: Машиностроение,1980.-237с.

64. Кисилев В.Т. и др. Эффективность использования ультразвуковых колебаний.- Минск: Приборостроение,1980. №3.- С.34-38.

65. Романюк В.Ф. Интенсификация суперфиниширования путем применения ультразвуковых колебаний // Электрофизические и электрохимические методы обработки. 1982. №2.-С. 5-6.

66. Зыков А.А. и др. Малогабаритные устройства для ультразвуковой обработки.- Л.: ЛДНТП, 1981.- 20с.

67. А.с. 598736 СССР, МКИ В24В 19/06, 35/00. Способ чистовой обработки деталей типа колец подшипников качения /О.В. Таратынов // Открытия. Изобретения. 1978. №11.- С.41.

68. Derenthal R. Einfluss der Werkzeugagenschaften auf das Arbeitsergebnis beim Kurzhubhonen // Jnd-Anz , 1976. 89. №84. S. 184-186.

69. Кремень З.И. Влияние способа абразивной обработки на качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей//Прогрессивная технология абразивной обработки и абразивный инструмент.-Л.: ЛДНТН, 1980. С. 8-15.

70. Кулинич Л.П. Технологическое обеспечение точности формы и качества поверхности высокоточных деталей суперфинишированием: Автореф. дис. ... канд.техн.наук: 05.02.08.- М., 1980.-16 с.

71. Проников А.С. Технологическая надежность станков.- М.: Машиностроение, 1971.- 342 с.

72. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Исследование изнашивания металлов.- М.: Машиностроение, 1960. - 351с.

73. Кремень З.И. и др. Суперфиниширование высокоточных деталей.- М.: Машиностроение, 1974.- 114 с.

74. Худобин Л.В. Анализ геометрии абразивных зерен // Труды Ульяновского политехнического института.- М.: Машиностроение, 1966. Вып.1.- С.6-20.

75. Вульф А.М., Мурдасов А.В. Геометрические параметры режущих абразивных зерен шлифовального круга //Абразивы.1968. №1. - С. 19-24.

76. Королев А.В. Теоретико-вероятностные основы создания прогрессивных процессов абразивной обработки путем управления

состоянием инструмента и его механическим воздействием на деталь: Дис. ... докт.техн.наук: 05.02.08. - Саратов, 1977.- 348 с.

77. Редько С.Г. Процессы теплообразования при шлифовании металлов.- Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1962.- 231с

78. Торбило В.М., Евсин Е.А., Чигодаев В.Е. О трении алмазного индентера по стали// Машиностроение. 1976. №5. - С.103-109.

79. Королев А.В., Белов Г.И., Березняк Р.А. Способ стабилизации значений показателей качества шлифованных поверхностей деталей // Проблемы резания материалов в современных техпроцессах: Сб. тез.докл. междунар. семинара "Интерпартнер-91".-Харьков, 1991.- С.186-170.

80. Королев А.В., Болкунов В.В. Концепция гибкого технологического процесса и метод его проектирования // Резание и инструмент: Сб. докл. междунар. конф. "Интерпартнет-93".- Харьков, 1993.- С.134-137.

81. Королев А.В., Болкунов В.В., Потапов В.В. Основные принципы проектирования техпроцессов в гибких производственных системах// ИНТЕРТЕХНО - 90: Сб.докл. междунар.конф. - Будапешт, Венгрия, 1990.- С.289-305.

82. Королев А.В., Решетников М.К. Погрешности геометрической формы поверхности при различных схемах хонингования // Прогрессивные направления развития технологии машиностроения: Сб. тр.- Саратов, 1995.- С.14-19.

83. Королев А.В., Гулецкий Е.Н., Гуцин А.Ф. Влияние правки шлифовального круга на шероховатость поверхности // Алмазная и абразивная обработка деталей машин и инструмента.- Пенза: Пензенский политехнический ин-т,1980.-С.16-19.

84. Гуцин А.Ф., Гулецкий Е.Н. Исследование влияния условий правки и шлифования на шероховатость поверхности //Прогрессивные

процессы в машиностроении и повышение эффективности использования автотранспорта. -Саратов: Изд-во Сарат.ун-та, 1982.

85. Гуцин А.Ф., Гулецкий Е.Н. Исследование влияния геометрии алмазного правящего инструмента на микрорельеф шлифовального круга и детали//Чистовая обработка деталей машин/СПИ.-Саратов, 1982.

86. Королев А.В., Гуцин А.Ф. Влияние технологических факторов на параметры и стабильность микрорельефа шлифованной поверхности //Опыт и пути совершенствования методов чистовой обработки в машиностроении.-Л.: ЛДНТП, 1984.

87. Королев А.В. Гуцин А.Ф. Стохастическая модель образования регулярного микрорельефа шлифованной поверхности //Чистовая обработка деталей машин/СПИ.-Саратов, 1984.

88. Королев А.В., Гуцин А.Ф. Влияние регулярного микрорельефа дорожек качения подшипников на момент трения, износ и уровень вибрации // Расчеты и испытания на контактную усталость машин.- М.: Госстандарт СССР, 1984.

89. Гуцин А.Ф. Влияние геометрических параметров регулярного микрорельефа дорожек качения подшипников на размеры площадки контакта желоба и шара // Чистовая обработка деталей машин/СПИ.-Саратов, 1985.

90. Гуцин А.Ф. Исследование влияния регулярного микрорельефа на фактическую площадь контакта дорожек и тел качения, уровень вибрации и момент трения в подшипниках // Прогрессивные направления развития технологии машиностроения.- Саратов: СГТУ, 1996.

91. Королев А.В. Технология производства подшипников с повышенными эксплуатационными свойствами // Высокие технологии : Сб.тез.докл.междун.семинара "ИНТЕРПАРТНЕР-95". - Харьков, 1995.- С.18-23.

92. Давиденко О.Ю., Савин С.В. Многобрусковое суперфиниширование дорожек качения колец роликоподшипников // Чистовая обработка деталей машин: Сб. тр. - Саратов, 1985. - С. 51-54.

93. Королев А.В., Давиденко О.Ю. Прогрессивный метод профилирующего суперфиниширования поверхностей вращения // Информ. листок. - Саратов: ЦНТИ. - 1986. №48.-3 с.

94. Давиденко О.Ю. Повышение эффективности и качества доводки дорожек качения роликоподшипников применением многобрускового суперфиниширования: Автореф. дис. ... канд.техн.наук: 05.02.08.- Саратов, 1986.- 17 с.

95. А.с. 1337238 СССР,МКИ В24В 33/00. Способ чистовой обработки / А.В. Королев. О.Ю. Давиденко // Открытия. Изобретения. - 1987. №34.

96. Королев А.В., Давиденко О.Ю. Влияние геометрической формы дорожки качения роликоподшипника на его долговечность // Расчеты и испытания на контактную усталость материалов и деталей машин: Тез. докл. Всесоюзн. семинара. - М.: Госком. СССР по стандартам, 1984. - С. 85-86.

97. Давиденко О.Ю., Королев А.В. Повышение эффективности и качества отделочной обработки колец подшипников применением многобрускового суперфиниширования // Тез. докл. Всесоюзн. конф. - Ростов-на-Дону, 1988. - С. 39-41.

98. Королев А.В., Давиденко О.Ю. Многобрусковая абразивная обработка поверхностей тел вращения // Оптимшлифабразив-88: Тез. докл. Всесоюзн. конф. - Л., 1988. - С. 25-26.

99. Давиденко О.Ю., Чихирев А.Я., Решетников М.К. Способ многобрускового суперфиниширования поверхностей вращения с криволинейной образующей // Технологическое обеспечение профильной

алмазно-абразивной обработки: Тез. докл. Всесоюзн. конф. - Пенза, 1984. - С. 29-30.

100. Давиденко О.Ю., Елисеев А.Ю. Повышение гибкости технологического процесса доводки дорожек качения подшипников // Гибкие технологические процессы и системы в механосборочном производстве: Сб. тр. - Саратов, 1988. - С. 25-28.

101. Давиденко О.Ю., Гуськов А.В. Способ брусковой доводки с повышенной универсальностью и технологической гибкостью // Состояние и перспективы развития ГПС в условиях хозрасчета и самофинансирования: Тез. докл. Всесоюзн. конф. - Ижевск, 1988. - С. 21.

102. Патент 1706134. Способ чистовой обработки абразивными брусками / А.В. Королев, О.Ю. Давиденко, А.М. Чистяков // Открытия. Изобретения. - 1991.

103. Патент 1738605. Способ чистовой обработки / А.В. Королев, О.Ю. Давиденко и др. // Открытия. Изобретения. - 1992. - №21.

104. Давиденко О.Ю., Чистяков А.М., Королев А.А. Многобрусковая абразивная доводка дорожек качения подшипников // Повышение эффективности технологических процессов в гибком автоматизированном производстве: Сб. тр. - Саратов, 1991. - С. 31-35.

105. Чихирев А.Я., Давиденко О.Ю., Решетников М.К. Результаты экспериментальных исследований способа размерного суперфиниширования желобов колец шарикоподшипников // Чистовая обработка деталей машин: Сб. тр. - Саратов, 1984. - С. 59-65.

106. Давиденко О.Ю., Чихирев А.Я., Решетников М.К. Способ многобрускового суперфиниширования поверхностей вращения с криволинейной образующей // Технологическое обеспечение профильной алмазно-абразивной обработки: Тез. докл. Всесоюзн. конф. - Пенза, 1984. - С. 29-30.

107. Королев А.В., Давиденко О.Ю. Суперфинишный автомат для многобрусковой доводки дорожек качения колец подшипников // Информ.листок.-Саратов:ЦНТИ. - 1986. №31.- 3 с.

108. Королев А.В., Давиденко О.Ю., Чихирев А.Я. Инструментальные головки для суперфиниширования дорожек качения подшипников // Информ.листок.- Саратов: ЦНТИ.- 1988. №88-14.- 4 с.

109. Королев А.В., Давиденко О.Ю. Формообразующая абразивная обработка прецизионных деталей многобрусковыми инструментальными головками // 7 международная конференция по инструменту: Сб. докл. - Мишкольц, Венгрия, 1989. - С. 210-218.

110. Королев А.В., Давиденко О.Ю. Многобрусковая формообразующая доводка прецизионных поверхностей деталей // Технологические процессы и оборудование для эффективного использования металлических изделий: Сб. тез. докл. междуна. конф. - Албена, Болгария, 1989. - С. 26.

111. Давиденко О.Ю., Королева Н.И. Повышение точности технологического оборудования в ГАП применением простых фрикционных передач // Автоматизация механосборочных процессов в машино-приборостроении: Сб.тез.докл.научн.конф.- М.: НПО "Темп", 1989.- 28с.

112. Разработка и исследование способа многобрусковой формообразующей обработки колец подшипников. Отчет о НИР № 01880034899.- Саратов, 1990.- 70с.

113. Королев А.В., Давиденко О.Ю. Эффективность процесса многобрусковой доводки рабочих поверхностей деталей подшипников // Прогрессивные направления развития технологии машиностроения: Сб.тр. - Саратов, 1993. - С. 25-30.

114. Королев А.В., Давиденко О.Ю. Прецизионное профилирование деталей на финишных операциях абразивной обработки // Прогрессивные

направления развития технологии машиностроения: Сб. тр. - Саратов, 1995. - С. 9-14.

115. Давиденко О.Ю., Королев А.А. Формирование параболического профиля роликовой дорожки на стадии многобрусковой доводки // Прогрессивные направления развития технологии машиностроения: Сб. тр. - Саратов, 1995. - С. 20-25.

116. Давиденко О.Ю., Королев Ал.А. Повышение точности и качественных показателей брусковой обработки на основе оптимизации условий контактирования инструмента и заготовки // Актуальные проблемы анализа и обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем: Сб. докл. междунар. конф. - Пенза, 1996. - С. 102-103.

117. Давиденко О.Ю., Королев Ал.А. Технологические возможности многобрусковой абразивной обработки // Проблемы управления точностью автоматизированных производственных систем: Сб. докл. междунар. конф. - Пенза, 1996. - С. 182-186.

118. Королев А.В., Давиденко О.Ю., Королев Ал. А. Технологические особенности многобрусковой обработки рабочих поверхностей колец подшипников // Технология - 96: Тез. докл. междунар. конф. - Новгород, 1996. - С. 287.

119. Патент РФ 1823336. Станок для хонингования дорожек качения подшипников/ А.В. Королев, О.Ю. Давиденко и др. // Открытия. Изобретения. - 1993. - №22.

120. Патент РФ 2009859. Устройство для абразивной обработки / А.В. Королев и др. // Открытия. Изобретения. 1994.- №6.

121. Патент РФ 2024385. Способ чистовой обработки / А.В. Королев и др. // Открытия. Изобретения. 1994.- №23.

122. Патент РФ 2036773. Устройство для абразивной обработки / А.В. Королев и др. // Открытия. Изобретения. 1995.- №23.

123. Королев А.В., Давиденко О.Ю., Чистяков А.М. Технологическое обеспечение эффективного применения брусковой абразивной обработки в интегрированных производственных системах //ИНТЕРТЕХНО - 90: Сб.докл.междун.конф. - Будапешт, Венгрия, 1990.- С.653-658.

124. Brandin H. Werkstoffabtrag, Honsteinverschleiß und Oberflächengüte beim Kurzhubhonen /Schleifen, Honen, Zäppen und Polieren. Verfahr und Maschinen 50 Ausg., Essen, 1981. S. 376-385.

125. Лурье Г.Б. Шлифование металлов.-М.: Машиностроение, 1969. - 175 с.

126. Ипполитов Г.М. Абразивно-алмазная обработка. - М.: Машиностроение, 1969.- 335 с.

127. Гришкевич А.В., Капуста В.А., Топоров О.А. Способ отделочной обработки стальных закаленных деталей // Вестн. машиностроения. -1973.-№9.- С.55-57.

128. Фрагин И.Б. Научные основы повышения точности и производительности хонингования: Автореф.дис. ... докт.техн.наук: 05.02.08.- М.: 1975.- 55с.

129. Буторин Г.И. Влияние режима обработки и характеристики брусков на эффективность суперфиниширования //Станки и инструмент. - 1962. - №4. - С. 26-31.

130. А.с. 536947 СССР, МКИ В24В 33/00. Устройство для суперфиниширования/ А.И. Акилов //Открытия. Изобретения. 1978.-№10.

131. Давиденко О.Ю., Королев А.А. Влияние режимов формообразующей доводки дорожек качения подшипников на геометрические параметры обрабатываемого профиля // Прогрессивные направления развития технологии машиностроения: Сб.тр.- Саратов, 1996. - С. 11-16.

132. Рудзит Я.А. Микрогеометрия и контактное взаимодействие поверхностей. - Рига: Знание, 1975.-176 с.

133. Теория вероятностей: Справочник по теории вероятностей и математической статистике / Под.ред. В.С. Королюка.- Киев: Наукова думка, 1978.- 583 с.

134. Точность производства в машиностроении и приборостроении / Под ред. А.Н. Гаврилова.-М.: Машиностроение, 1973.- 567 с.

135. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика.-М.:Высшая школа, 1977.- 479 с.

136. Ящерицын П.И. Исследование механизма образования шлифованных поверхностей и их эксплуатационных свойств: Дис. ... докт.техн.наук : 05.02.08.- Минск, 1962.- 210 с.

137. Румшинский Я.З. Математическая обработка результатов эксперимента. - М.: Наука, 1971. - 192 с.

138. Методика выбора и оптимизации контролируемых параметров технологического процесса: РДМУ 109-77.- М.:Стандарты, 1976.-63 с.

139. Муцянюк В.И., Островский В.И. Планирование экспериментов при исследовании процессов шлифования // Абразивы и алмазы. - 1966.- №3. - С.27-33.

140. Шилакадзе В.А. Планирование эксперимента при суперфинишировании колец роликоподшипников // Подшипниковая промышленность. - 1981.- №1.- С.4-9.

141. А.с. 1199593 СССР, МКИ В24В 1/00, 19/06. Способ абразивной обработки поверхностей вращения / А.В. Королев //Открытия. Изобретения, 1985.- №47.- С.78.

142. А.с. 916268 СССР, МКИ В24В 35/00. Головка для суперфинишной обработки поверхностей вращения с криволинейной образующей / А.В. Королев, А.Я. Чихирев // Открытия. Изобретения. 1982.-№12.-С.77.

143. Королев А.В., Чихирев А.Я. Суперфинишные головки для доводки желобов колец шарикоподшипников // Чистовая обработка деталей машин: Межвуз. сб./СПИ. - Саратов, 1982. - С. 8-11.

144. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике.- М.: Наука, 1980.- 975 с.

145. Монахов В.М., Беляев Э.С., Краснер А.Я. Методы оптимизации.- М.: Просвещение, 1978.-175 с.

146. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Пер. с англ. - 2-е изд. - М.: Наука, 1978. - 832 с.

147. Горанский Г.К., Владимирова Е.В., Ламбин Л.Н. Автоматизация технического нормирования работ на металлорежущих станках с помощью ЭВМ.- М.: Машиностроение, 1970.-220 с.

148. Корьячев А.Н., Блохина Н.М. Оптимизация значения контролируемых параметров при обработке желобов колец шарикоподшипников способом винтовой осцилляции // Исследования в области технологии механической обработки и сборки. - Тула, 1982.- С. 66-81.

149. Чеповецкий И.Х. Основы финишной алмазной обработки. - Киев: Наукова думка, 1980.- 467 с.

150. Чихирев А.Я. Расчет кинематической зависимости при доводке поверхностей вращения с криволинейной образующей // Чистовая обработка деталей машин: Межвуз. сб./СПИ.- Саратов, 1982.- С.17-17.

151. Монахов В.М., Беляев Э.С., Краснер А.Я. Методы оптимизации.-М.:Просвещение, 1978.-175с.

152. Корьячев А.Н., Лысанов Л.Г., Митрофанов В.Г. Суперфиниширование желобов колец подшипников способом винтовой осцилляции. - М.: Машиностроение, 1983. - 49 с.

153. Горанский В.К., Владимирова Е.В., Ламбин Л.М. Автоматизация технического нормирования работ на металлорежущих станках с помощью ЭВМ.-М.: Машиностроение, 1970.-222с.

154. Корьячев А.Н., Блохина Н.М. Оптимизация значения контролируемых параметров при обработке желобов колец шарикоподшипников способом винтовой осцилляции // Исследования в области технологии механической обработки и сборки. -Тула, 1982.- С.66-71.

155. Чеповецкий И.Х. Основы финишной алмазной обработки.-Киев: Наук. думка, 1980.- 467с.

156. Чихирев А.Я. Расчет кинематической зависимости при доводке поверхностей вращения с криволинейной образующей //Чистовая обработка деталей машин: Сб. тр.- Саратов, 1982.-С.16-17.

157. Вениаминов Б.А., Василевский С.В. Влияние финишной операции на долговечность подшипников качения //Тр.ин-та/ВНИПП.- М., 1979.-№1.-С.3-23.

158. Прогрессивные процессы абразивной, алмазной и эльборовоой обработки в подшипниковом производстве/ И.Б. Колтунов и др.- М.: Машиностроение, 1976.-30с.

159. Кочетков А.М., Сандлер А.И. Прогрессивные процессы абразивной, алмазной и эльборовоой обработки в станкостроении.- М.:Машиностроение, 1976.-31с.

160. Суперфиниширование высокоточных деталей/З.И. Кремьень и др.-М.:Машиностроение, 1974.-114с.

161. Справочник металлиста / Под ред. А.Н. Малова.-М.: Машиностроение, 1976.-Т.1.- 570с.

162. Справочник металлиста / Под ред. А.Н. Малова.-М.: Машиностроение, 1977.-Т.4.-689с.

163. Инюземцев Г.Г., Виноградов А.Ю. Алмазные круги, полученные методом шаржирования накатным роликом // Алмазная и абразивная обработка деталей машин и инструмента: Сб. науч.тр.-Пенза, 1980. Вып.9.-С.35-37.

164. Виноградов А.Ю. Разработка метода изготовления шаржированных профильных кругов из сверхтвердых материалов и исследование их эксплуатационных характеристик: Дис. ... канд.техн.наук: 05.02.08.- Саратов, 1981.-210с.

165. Солонин И.С. Математическая статистика в технологии машиностроения.- М.: Машиностроение, 1972.-215с.

166. Станки металлообрабатывающие. Общие требования безопасности//ГОСТ 12.2.009-79.- М.: Стандарты, 1979.

167. Станки металлорежущие. Технические нормы шума/ОСТ 2.Н89-40-75.-М.: Стандарты, 1980.

168. Органы управления станков. Направление действия// ГОСТ 9146-73.-М.: Стандарты, 1980.

169. Станки металлообрабатывающие. Общие технические условия (СТ.СЭВ 2149-80)/ГОСТ 7599-80.- М.: Стандарты, 1982.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 3 |
| 1. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ | 6 |
| 1.1. Рациональная геометрическая форма рабочих поверхностей опор качения | 6 |
| 1.2. Технологии формообразования рабочих поверхностей деталей опор качения | 13 |
| 1.3. Классификация способов брусковой обработки | 30 |
| 2. МЕХАНИЗМ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ БРУСКОВОЙ ОБРАБОТКИ | 36 |
| 2.1. Взаимодействие инструмента и обрабатываемой поверхности | 31 |
| 2.2. Механизм исправления погрешностей геометрической формы изделия | 64 |
| 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ | 78 |
| 3.1. Методика проведения | 78 |
| 3.2. Методика проведения многофакторного эксперимента и обработки экспериментальных данных | 80 |
| 4. МНОГОбРУСКОВОЕ СУПЕРФИНИШИРОВАНИЕ КОЛЕЦ РОЛИКОПОДШИПНИКОВ С ЛОКАЛИЗАЦИЕЙ КОНТАКТА ИНСТРУМЕНТА И ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОСЕВОЙ ОСЦИЛЛЯЦИЕЙ СУПЕФИНИШНОЙ ГОЛОВКИ | 86 |
| 4.1. Сущность метода | 86 |
| 4.2. Объект и условия проведения экспериментальных исследований | 96 |

| | |
|---|------------|
| 4.3. Экспериментальное оборудование..... | 100 |
| 4.4. Исследование влияния режимов обработки на ее выходные параметры..... | 107 |
| 4.5. Исследование влияния продолжительности цикла обработки и характеристики инструмента на результаты суперфиниширования | 116 |
| 4.6. Выбор рациональных значений факторов процесса суперфиниширования | 124 |
| 5. СУПЕРФИНИШИРОВАНИЕ ЖЕЛОБОВ КОЛЕЦ ШАРИКОПОДШИПНИКОВ С ЛОКАЛИЗАЦИЕЙ КОНТАКТА ИНСТРУМЕНТА И ЗАГОТОВКИ ОСЕВОЙ ОСЦИЛЛЯЦИЕЙ СУПЕРФИНИШНОЙ ГОЛОВКИ | 129 |
| 5.1. Обоснование рациональной схемы обработки | 129 |
| 5.2. Условия проведения экспериментальных исследований | 139 |
| 5.3. Исследование влияния режимных факторов доводки на ее результаты..... | 146 |
| 5.4. Влияние характеристики инструмента | 153 |
| 5.5. Оптимизация режимов обработки..... | 159 |
| 5.6. Статистический анализ точности формообразования | 163 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 178 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ..... | 179 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК | 196 |

Научное издание

Королев Альберт Викторович
Чистяков Анатолий Михайлович
Давиденко Олег Юрьевич
Королев Александр Альбертович

**НОВЫЕ ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

**Ч.2.- Теоретические основы многобрускового
формообразующего суперфиниширования с локализацией
контакта инструмента и обрабатываемой поверхности**

Редактор З.И. Шевченко

Лицензия ЛР 020271 от 15.11.96

| | | |
|--------------------|---|-------------------|
| Подписано в печать | И7. I2.97 | Формат 60x84 1/16 |
| Бум. оберт. | Усл.печ.л. I2, 55 (I3, 5) Уч.- изд.л. I2, 5 | |
| Тираж 100 экз. | Заказ 346 | С 74 |

Саратовский государственный технический университет
410054 г. Саратов, ул. Политехническая, 77

Копипринтер СГТУ, 410054 г.Саратов, ул. Политехническая, 77