

А.А. Королев

**СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ  
ФОРМООБРАЗУЮЩЕГО  
СУПЕРФИНИШИРОВАНИЯ  
ПОВЕРХНОСТЕЙ  
ДЕТАЛЕЙ ВРАЩЕНИЯ СЛОЖНОГО  
ПРОФИЛЯ**

Министерство образования Российской Федерации

Саратовский государственный технический университет

**А.А. КОРОЛЕВ**

**СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ  
ФОРМООБРАЗУЮЩЕГО  
СУПЕРФИНИШИРОВАНИЯ  
ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ВРАЩЕНИЯ  
СЛОЖНОГО ПРОФИЛЯ**

Саратов 2001

УДК 621.75  
ББК 30.614  
К 66

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор А.М. Чистяков  
(Генеральный директор ОАО СПЗ)  
Доктор технических наук, профессор  
Саратовского государственного технического университета  
О.Ю. Давиденко

Одобрено  
редакционно-издательским советом  
Саратовского государственного технического университета

**Королев А.А.**

К 66 Современная технология формообразующего суперфиниширования поверхностей деталей сложного профиля. –Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2001. 156 с.  
ISBN 5-7433-0936-1

Излагаются основы формообразования заготовок при суперфинишировании с учетом сложной кинематики процесса, неравномерной степени засаливания инструмента, его износа и формообразования в процессе обработки.

Рассмотрена технология суперфиниширования заготовок с рациональной геометрической формой, приводятся результаты исследования технологических возможностей процесса формообразующего суперфиниширования деталей подшипников на суперфинишных автоматах последних модификаций.

Для научных и практических работников.

Табл. 12. Ил. 66. Библиогр. 127 наим.

УДК 621.75  
ББК 30.614

© Саратовский государственный  
технический университет, 2001  
© Королев А.А., 2001

ISBN 5-7433-0936-1

## Введение

Известно, что основой современного научно-технического прогресса является совершенствование технологий. Это положение прежде всего относится к подшипниковому производству, так как от качества подшипников и эффективности их изготовления зависит деятельность других отраслей народного хозяйства.

К числу эффективных методов обеспечения требуемого качества подшипников относится суперфиниширование. Однако несмотря на интенсивное развитие в последнее время технологии суперфиниширования, в промышленности все еще широко применяются способы, основанные на традиционной однобрусковой схеме. Хотя традиционные способы суперфиниширования и обеспечивают требуемую шероховатость и волнистость обрабатываемых поверхностей, но отличаются невысокой способностью исправлять низкочастотные погрешности продольного и поперечного сечений деталей: овальность, гранность, погрешность профиля. Наоборот даже, часто в процессе суперфиниширования образуется искажение профиля детали, что резко снижает эксплуатационные свойства подшипников.

Отечественными и зарубежными авторами разработаны основы совершенствования процессов суперфинишной обработки. К числу этих авторов относятся: А.И. Акимов, И.М. Брозголь, А.В. Гришкевич, О.Ю. Давиденко, Д.Г. Евсеев, А.В. Королев, З.И. Кремень, А.Н. Мартынов, М.С. Наерман, И.Е. Фрагин, И.Х. Чеповецкий, J.W. Kappel и др. В частности, большой вклад в теорию и практику суперфинишной обработки внесла саратовская школа технологов-машиностроителей.

Но, несмотря на это, некоторые вопросы теории и практики суперфинишной обработки остаются не решенными. В частности, остается нерешенной проблема обеспечения рациональных условий формирования заданного профиля внутренних поверхностей деталей типа

дорожек качения наружных колец подшипников, что ограничивает технологические возможности суперфинишной обработки, в том числе возможность стабильно получать заданный выпуклый профиль таких деталей. Не решена проблема эффективной обработки поверхностей заготовок большой кривизны, типа желобов колец шарикоподшипников. Остается нерешенной проблема формирования поверхностей сложной формы. Требуется решения ряд теоретических проблем: исследование степени засаливания инструмента в процесс суперфиниширования, его влияния на формирование профиля заготовки и др.

На решение указанных проблем и направлена данная работа.

Автор считает своим долгом выразить особую благодарность за ценные советы и многостороннюю помощь, оказанную при выполнении данной работы, Заслуженному деятелю науки РФ, доктору технических наук, профессору, академику РАН Ю.В. Чеботаревскому и доктору технических наук, профессору Д.Г. Евсееву, а также рецензентам данной работы - доктору технических наук, профессору А.М. Чистякову и доктору технических наук, профессору О.Ю. Давиденко.

## ГЛАВА 1.СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СУПЕРФИНИШИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТИПА КОЛЕЦ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

Известно, что эксплуатационные свойства изделий типа подшипников качения (износостойкость, долговечность, надежность и др.) во многом зависят от технологического процесса изготовления отдельных деталей, который определяет геометрические и физико-химические параметры поверхностного слоя: точность размеров, формы, шероховатость поверхности, ее топографию, твердость [1-10 и др.]. К технологическим процессам изготовления этих деталей предъявляются высокие требования: наследование лучших точностных параметров и показателей качества поверхности и поверхностного слоя предшествующих технологических операций, возможность исправлять погрешности размеров, формы, обеспечивать достижение заданной шероховатости поверхности и качественных показателей поверхностного слоя деталей, обеспечение высокой культуры производства и техники безопасности, высокая производительность, простота наладки и обслуживания технологического оборудования, возможность автоматизации процесса и др.

Значительное влияние на эксплуатационные свойства подшипников оказывает шероховатость рабочих поверхностей деталей [2,9,11-15 и др.], волнистость и другие отклонения от круглости деталей [9,12, 16-26 и др.], геометрическая форма профиля рабочих поверхностей деталей [26-41 и др.], обеспечиваемые на операциях суперфиниширования. Оптимальное значение шероховатости желобов колец шарикоподшипников составляет  $R_a=0,080-0,050$  мкм, а оптимальное значение шероховатости дорожек качения колец роликоподшипников составляет  $R_a=0,16-0,32$  мкм [2,12,42 и др.]. При более высоких значениях шероховатости существенно уменьшается долговечность подшипников, а при более низких - резко снижается производительность процесса обработки.

Волнистость поверхности наиболее существенно влияет на уровень вибрации подшипников [7,25 и др.] и является одним из наиболее важных суммарных показателей качества подшипников качения, характеризующих точность их изготовления и эксплуатационные характеристики. Считается рациональной величина волнистости в пределах  $0,10-0,05$  мкм.

Придание рабочим поверхностям колец роликоподшипников выпуклости в пределах  $2-4$  мкм в несколько раз повышает их долговечность [14,32, 42 и др.]. А так как величина этой выпуклости невелика, то весьма остро встает проблема ее обеспечения на операциях окончательной обработки, так как на предшествующей шлифовальной операции это сделать технологически сложно.

На современном этапе развития машиностроения разработано много методов окончательной обработки криволинейных поверхностей вращения деталей машин, которые отличаются схемой обработки, режимами и видами режущего инструмента. Среди этих методов наиболее широкое применение нашли шлифование [12,43-51 и др.], притирка и полирование [52-53 и др.], микрохонингование [14 и др.] и суперфиниширование.

Процесс шлифования обычно используется для предварительной обработки, так как в зоне резания развиваются высокие температуры, вызывающие неблагоприятные структурные превращения в поверхностном слое шлифуемой поверхности [56-60 и др.]. Кроме того, при шлифовании сложно обеспечить требуемые значения шероховатости и волнистости поверхности [47, 61, 62 и др.].

Притирка в подшипниковом производстве используется редко, так как этот технологический процесс отличается низкой производительностью, требует высококвалифицированного ручного труда. Полирование в подшипникостроении хотя и находит применение, однако ввиду малого съема припуска оно не обеспечивает удаление дефектного слоя, слабо исправляются волнистость, практически не исправляется гранность и некруглость, обычно искажается форма профиля детали. Операция полирования осуществляется вручную и используется только в условиях мелкосерийного производства деталей подшипников низкой точности. Такими же недостатками обладает микрохонингование, которое, как и полирование, обычно осуществляется мелкозернистым шлифовальным полотном и придает поверхности декоративный вид, не изменяя поверхностный слой по существу.

Основным методом окончательной обработки рабочих поверхностей деталей подшипников является суперфиниширование [49,53, 63-74 и др.]. Наиболее широкое применение получило так называемое "традиционное суперфиниширование", при котором абразивный брусок прижимается к вращающейся заготовке и совершает осциллирующие движения вдоль профиля обрабатываемой поверхности. По этой схеме до настоящего времени работает большинство отечественных моделей суперфинишных автоматов (ЛЗ-11, ЛЗ-112, ЛЗ-113 и др.) и автоматов ведущих зарубежных фирм (Эрнст Теленхауз (ФРГ), Супфина (ФРГ) и др.).

Абразивный брусок при суперфинишировании прижимается к обрабатываемой поверхности всей своей рабочей поверхностью. Поэтому рабочая поверхность бруска после некоторого времени работы забивается стружкой и шламом и перестает снимать припуск. Однако вследствие наличия на поверхности абразивного бруска пор суперфиниширование позволяет удалять с поверхности заготовки дефектные слои металла и более интенсивно исправлять такие погрешности геометрической формы заготовки, как волнистость и шероховатость.

С целью повышения съема металла операция суперфиниширования обычно осуществляется в два или даже в три технологических перехода [14, 72-75 и др.] - сначала крупнозернистым, а затем мелкозернистым брусками. Предварительное суперфиниширование обычно осуществляется бруском зернистостью M14, а окончательное - бруском зернистостью M7...M10. Учитывая, что на втором технологическом переходе требования к съему металла снижаются, а требования к шероховатости обработанной поверхности повышаются, часто суперфиниширование на этом переходе заменяется микрохонингованием.

Подробный анализ преимуществ и недостатков традиционного способа суперфиниширования дан в работах [72-74 и др.]. В этих работах убедительно показано, что к достоинствам процесса суперфиниширования относятся:

- прирабатываемость бруска к обрабатываемой поверхности, что позволяет вести обработку заготовок с геометрическими погрешностями, превышающими съем металла;
- самоочистка бруска от стружки и шлама, что повышает съем металла и увеличивает производительность обработки;
- способность значительно снижать волнистость и шероховатость поверхности заготовок;
- низкая температура в зоне контакта, отсутствие опасности возникновения дефектов поверхностного слоя деталей.

Основные недостатки процесса суперфиниширования заключаются в следующем:

- относительно низкая производительность (120-200 заготовок в час), особенно при повышенной шероховатости поверхности заготовок;
- высокая чувствительность к качеству исходной поверхности заготовок;
- невысокая степень удаления неровностей низкой частоты (овальности, гранности);
- необходимость осуществления процесса обработки в несколько технологических переходов, что существенно усложняет конструкцию оборудования и повышает его себестоимость;
- низкая универсальность технологического оборудования, так как для обработки наружных, внутренних колец, колец различных типоразмеров подшипников требуется использование специального оборудования, что также повышает его стоимость;
- сложность наладки оборудования, необходимость привлечения к работе высококвалифицированных наладчиков, необходимость частой подналадки оборудования из-за повышенного износа бруска.

Отмеченные недостатки процесса суперфиниширования вызывают необходимость его совершенствования. Указанная проблема настолько серьезна, что ее решению посвящено громадное число работ. Самым радикальным направлением решения этой проблемы является совершенствование способов осуществления процесса суперфиниширования и создание на этой основе нового технологического оборудования.

Среди прогрессивных способов суперфиниширования, которые прошли апробацию в промышленности, можно назвать ультразвуковое суперфиниширование [70, 76, и др.], способ суперфиниширования с круговой осцилляцией инструмента [77], способ винтовой осцилляции [78], способ суперфиниширования с "развязанным центром"[79], суперфиниширования вращающейся суперфинишной головкой [80], финишная обработка в кипящем слое абразива [81-84] и др.

К преимуществам способа ультразвукового суперфиниширования относится высокая производительность снятия припуска, высокая самозатачиваемость инструмента, позволяющая использовать бруски малой зернистости и достигать на втором этапе обработки малых значений шероховатости. К недостаткам этого способа относятся повышенный износ брусков, который возрастает в 5...6 раз по сравнению с традиционным суперфинишированием, необходимость их тщательного приклеивания к державке, нестабильность процесса, требующего частой подналадки технологического оборудования. Использование этого процесса требует высокой культуры производства и оказалось непосильным для наших подшипниковых предприятий.

Для осуществления способа суперфиниширования с круговой осцилляцией инструмента абразивному бруску сообщают круговое поступательное движение с радиусом, меньшим радиуса обрабатываемой поверхности, что повышает степень самозатачивания инструмента и его режущие свойства. Однако данный способ не нашел применения в промышленности из-за сложности достижения низких значений шероховатости поверхности и сложности осуществления, особенно из-за высоких требований к наладке оборудования и необходимости частой переналадки вследствие повышенной интенсивности износа инструмента.

Примерно к тому же эффекту и с тем же результатом приводит использование способа суперфиниширования с винтовой осцилляцией инструмента, при котором вместо осциллирующего движения бруску сообщают сложное движение, так что линия контакта бруска и заготовки образует на рабочей поверхности инструмента винтовую линию.

Сущность способа суперфиниширования с "развязанным центром"[79] заключается в том, что в многоместном приспособлении одновременно осуществляется обработка сразу нескольких деталей абразивны-

ми брусками, собранными в один блок, которому сообщается осциллирующее движение вдоль оси заготовок. Однако применение этого способа из-за повышенной колеблющейся массы ограничивается только мелкими, приборными подшипниками. К тому же по краям дорожки качения возникает повышенное давление, что приводит к искажению профиля поверхности.

К преимуществам финишной обработки в кипящем слое абразива [81-84] относятся высокая режущая способность инструмента и возможность обработки поверхностей сложного профиля. Однако этот способ не обеспечивает исправление погрешностей геометрической формы деталей, что ограничивает его применение в точном машиностроении.

Более совершенным способом является способ суперфиниширования вращающейся суперфинишной головкой [80]. Ось головки наклонена к оси заготовки, пересекается с ней в центре симметрии обрабатываемой поверхности, а бруски при вращении головки осциллируют вокруг своих осей, на которых они на ней установлены. В конце каждого полуоборота они как бы подпрыгивают над поверхностью, очищаясь от стружки и шлама, что должно способствовать повышению производительности и качества обработки. Однако эта прекрасная идея так и осталась на бумаге, так как для обеспечения возможности ее практической реализации она требовала серьезного усовершенствования.

Сущность всех рассмотренных выше и других способов суперфиниширования более подробно освещена в работах [24, 25, 28, 85-87]. Поэтому мы далее выполним анализ работ научной школы СГТУ, которая разработала свое направление совершенствования процесса прецизионной окончательной обработки высокоточных деталей машин, создала свою известную у нас в стране и за рубежом научную школу, ее исследования составили целую эпоху в совершенствовании суперфинишного технологического оборудования.

Одной из первых работ в этом направлении является исследование технологических возможностей предложенного сотрудниками кафедры "Технология машиностроения" Саратовского государственного технического университета (ТМС) способа суперфиниширования с дополнительным движением бруска [88, 89 и др.] Как и при обычном суперфинишировании, абразивный брусок прижимается с определенной силой к вращающейся заготовке и совершает осциллирующие движения вокруг оси желоба. Но, помимо этого, бруску сообщают дополнительное движение вдоль оси желоба или под острым углом к оси желоба. Таким образом, в отличие от рассмотренных выше способов брусок контактирует с обрабатываемой поверхностью непрерывно, обеспечивая тем самым высокие динамические свойства станка, но каждый участок рабочей поверхности бруска контакти-

рует с заготовкой периодически, непрерывно очищаясь от стружки и шлама. На заключительном этапе брусок останавливают в конце хода и совершают обычное суперфиниширование.

Работниками ГПЗ-3 совместно со специалистами кафедры ТМС СПИ в 1970-1980 гг. была создана целая гамма суперфинишных автоматов типа ШВН, СПА и др., работающих по предложенному принципу. Автоматы получились простые, дешевые, так как они имели всего одну рабочую позицию.

Дальнейшим совершенствованием этого способа явился предложенный сотрудниками кафедры ТМС комбинированный способ обработки шлифованием-доводкой качающимся кругом [90, 91]. Способ и устройство для его осуществления запатентованы в США, Франции, Италии [92-94]. Особенностью способа является то, что он совмещает шлифование и суперфиниширование в одной операции на одной позиции. Сначала заготовка подвергается обычному шлифованию шлифовальным кругом, а на этапе выхаживания круг затормаживается и ему сообщается качательное движение с небольшой скоростью от специального механизма. Предложенный способ обеспечивает высокую производительность и высокую геометрическую точность деталей, так как шлифование и доводка осуществляются при одной установке изделия и на одной позиции. Внедрение этого способа в условиях ГПЗ-3 позволило сократить операции доводки, промывки и протирки изделий.

Особое внимание кафедра ТМС СГТУ в последнее время уделяет совершенствованию способов и устройств для многобрускового суперфиниширования. Одним из них является способ, реализованный в устройстве для суперфиниширования поверхностей вращения с криволинейной образующей [39, 42, 75, 85, 95, 96 и др]. Абразивные бруски равномерно по окружности расположены в суперфинишной головке с возможностью качания на своей оси. В исходном положении они удерживаются пружинами. Радиальная подача брусков осуществляется механизмом подачи державок. В процессе суперфиниширования головка совершает осциллирующее движение вдоль оси заготовки. Ось качания брусков в процессе осцилляции головки изменяет расстояние от обрабатываемой поверхности заготовки. Бруски периодически отрываются от поверхности, очищаясь от стружки и шлама и обеспечивая высокую производительность обработки.

На основе этого способа авторами был сконструирован, а на ГПЗ-3 изготовлен суперфинишный автомат МФ-1 для обработки наружных колец подшипников. Производственные испытания автомата показали, что он обеспечивает заданное качество поверхности и поверхностного слоя деталей. Но вследствие значительной массы суперфинишной головки пришлось ограничить частоту ее осцилляции. Кроме того, применение этого способа

ограничивается обработкой дорожек качения внутренних колец шарико-подшипников, а сам профиль дорожки в процессе обработки приобретает погрешности.

Частично возникшие технические трудности устранялись в способе суперфиниширования перекатывающимися по обрабатываемой поверхности брусками [97-99]. Абразивные бруски равномерно расположены вокруг заготовки и поджимаются к ней с определенной силой. Абразивные бруски закреплены в головке на осях так, что при осциллирующем движении головки вдоль оси заготовки бруски перекатываются по обрабатываемой поверхности, непрерывно контактируя с ней различными своими участками. Это, как и в предыдущих способах, обеспечивало возможность повышения режущей способности инструмента, возможность использования брусков малой зернистости, а следовательно, в один технологический переход обеспечивать и заданный съём металла, и низкие значения шероховатости поверхности заготовки. Но, помимо этого, способ обладал новым качеством - обеспечивал возможность снятия с разных участков обрабатываемой поверхности различных по величине припусков и тем самым возможность прецизионного формирования профиля заготовки, исправления его погрешностей. Это достигалось тем, что при осциллирующем движении головки ее скорость вдоль поверхности можно регулировать по любому закону, а значит, можно формировать различные профиль обрабатываемой поверхности. Но авторов этот способ не удовлетворял тем, что суперфинишная головка совершала осциллирующие движения, что ухудшало динамику станка, а также тем, что бруски в головке закреплялись шарнирно, что снижало жесткость технологической системы. Кроме того, способ можно использовать только при обработке дорожек качения внутренних колец роликоподшипников.

Наиболее перспективным способом суперфиниширования, на наш взгляд, является разработанный сотрудниками кафедры ТМС СГТУ способ многобрускового суперфиниширования с вращающейся суперфинишной головкой [100-104 и др.], при котором абразивные бруски жестко закреплены в суперфинишной головке с возможностью подачи в радиальном направлении от жесткого (например, клинового) механизма подачи (рис. 1.1). Головка 2 вращается вокруг своей оси  $O_2$ , расположенной под углом  $\alpha$  к оси  $O_1$  вращения заготовки 1.

Способ устраняет недостатки предыдущих способов: бруски 3 контактируют с обрабатываемой поверхностью заготовки непрерывно, отсутствует осцилляция головки, тем самым обеспечиваются благоприятные динамические свойства технологической системы [72, 74, 98, 103-105].

Разворот головки относительно оси заготовки обеспечивает благо-

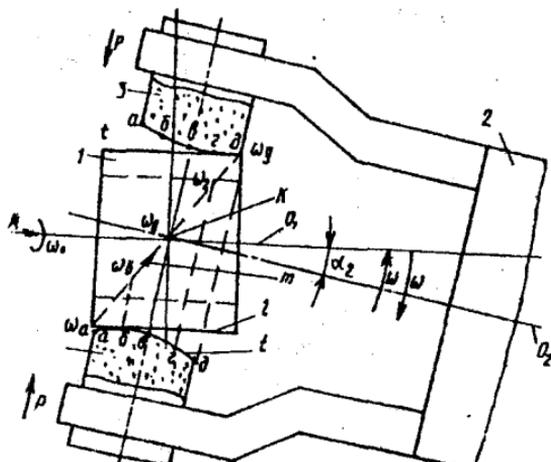


Рис. 1.1. Схема способа многобрускового суперфиниширования

приятные условия для самоочистки и самозатачивания инструмента, а следовательно, возможность использования мелкозернистого инструмента и тем самым достижение низкой шероховатости обрабатываемой поверхности и возможность осуществления процесса в один технологический переход. Жесткое силовое замыкание абразивных брусков в суперфинишной головке с поверхностью заготовки обеспечивает возможность исправления не только волнистости, но и гранности, и овальности.

Наконец, за счет разворота головки по краям дорожки качения возникает более высокое давление, чем в центре. Это обеспечивает возможность исправлять погрешность формы профиля поверхности заготовки, например устранять корсетность, часто возникающую при шлифовании, формировать поверхность выпуклой формы, что, как известно, существенно повышает долговечность подшипников.

На основе этой технологии разработано большое количество устройств для ее осуществления и новые конструкции суперфинишных автоматов [106-112 и др.], которые успешно используются в промышленности. Среди этих способов и устройств особо следует отметить следующие.

На рис. 1.2. изображена конструкция станка [108], которая затем достаточно длительное время применялась при изготовлении автоматов типа КХВ. На станине 3 закреплены корпус бабки изделия 1 и корпус инструментальной головки 4. Корпус бабки изделия 1 выполнен в виде гидроцилиндра, в котором размещен шпиндель изделия 8, выполненный в виде поршня. Оси шпинделя изделия 8 и инструментальной головки 4 пересекаются в горизонтальной плоскости под углом  $\alpha$  (рис. 1.3) за счет поворота бабки изделия вокруг оси  $O_3$  штыря 2 (рис. 1.2), закрепленного в станине.

На свободном конце поршня 8 закреплен вращающийся упор 9, слу-

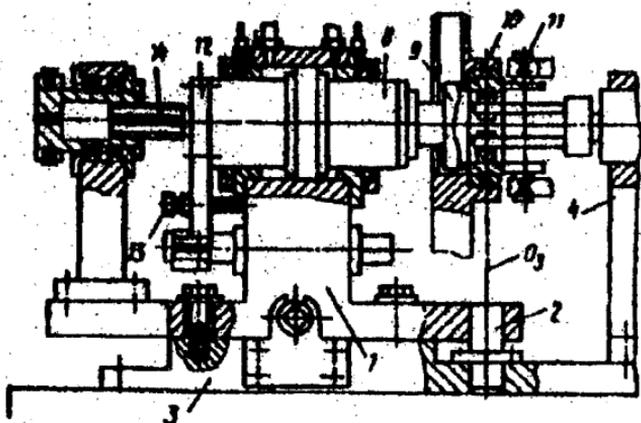


Рис. 1.2. Конструкция станка типа КХВ

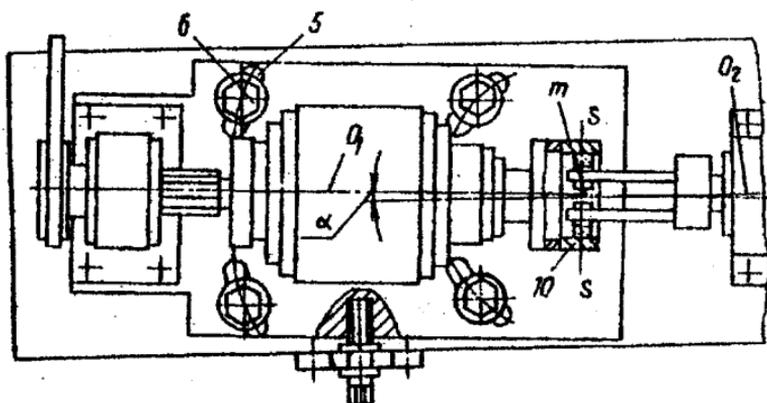


Рис. 1.3. Конструкция станка типа КХВ (вид сверху)

жащий средством для подачи заготовки 10 в зону обработки и сообщения ей вращения.

Станок работает следующим образом. При перемещении поршня 8 в рабочее положение упор 9, упираясь в торец заготовки 10, перемещает ее в рабочую позицию до касания с прижимными роликами 11. Заготовка 10 начинает вращаться. Если в процессе обработки возникнет необходимость в изменении угла  $\alpha$  скрещивания осей инструментальной головки  $O_2$  и шпинделя изделия  $O_1$ , необходимо отпустить винты 6 и развернуть корпус бабки изделия 1 вокруг штыря 2 на необходимый угол и зафиксировать

винтами 6. Для совмещения центра симметрии профиля заготовки с точкой пересечения осей  $O_2$  и  $O_1$  необходимо поршень 8 переместить в осевом направлении регулируемым упором 13.

Автомат КХВ отличается высокой производительностью, возможностью исправлять погрешности геометрической формы заготовки и придавать ее рабочей поверхности выпуклую форму. Поэтому он длительное время выпускался НПП НИМ и использовался в подшипниковой промышленности. Однако он имел определенные недостатки и поэтому подвергался усовершенствованию. Среди этих недостатков основными являются следующие: сложность совмещения центра профиля заготовки и точки пересечения осей шпинделя изделия и инструментальной головки, значительные габаритные размеры, автомат выпускался исключительно для обработки внутренних колец подшипников, так как при обработке наружных колец возникала корсетность дорожки качения, высокая нагрузка на опоры шпинделя изделия при зажиме заготовки усложняла ее конструкцию.

Частично отмеченные недостатки устраняются в изобретениях [106, 107, 109-112, 116, 117]. В изобретении [107] (рис. 1.4) корпус 1 инструментальной головки на торце имеет 4 паза, в которых установлены зубчатые рейки 2, несущие держатели 3 с закрепленными на них абразивными брусками 4.

На противоположном торце корпуса закреплен фланец 5, служащий для установки головки на шпинделе инструментальной головки. Внутри корпуса 1 вдоль его оси установлен шток 6, на конце которого выполнена резьба, служащая для соединения штока с механизмом привода станка. На другом конце штока 6 закреплен шарнирный подшипник 7, на котором установлена многогранная зубчатая рейка 8. Число граней рейки 8 равно числу брусков 4. Многогранная рейка 8 находится в зацеплении с зубчатыми колесами 9, установленными с возможностью вращения на осях 10, запрессованных в отверстиях корпуса 1.

При перемещении штока 6 от механизма привода станка вправо многогранная рейка 8 поворачивает зубчатые колеса 9 вокруг осей 10 и перемещает рейки 2 с державками брусков 3 к оси корпуса 1.

Основное преимущество данного устройства заключается в обеспечении возможности самоцентрирования брусков относительно обрабатываемой поверхности. Если какой-либо брусок первым коснется обрабатываемой поверхности, то за счет шарнира 7 рейка 8 поворачивается в пространстве, вызывая дополнительные перемещения других брусков до тех пор, пока они все не коснутся обрабатываемой поверхности. Только после этого на бруски будет подаваться рабочая нагрузка.

Указанная конструкция хонинговальной головки использовалась в устройстве для абразивной обработки по изобретению [107] (рис. 1.5 и 1.6).

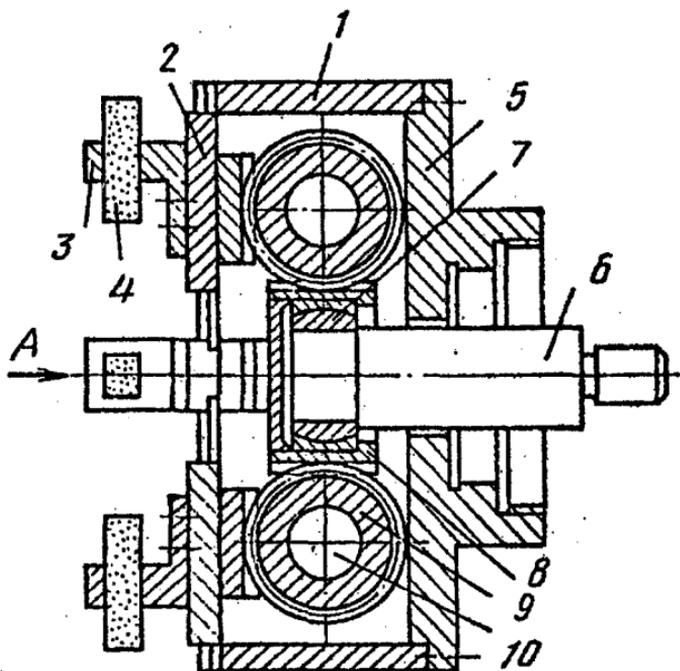


Рис. 1.4. Хонинговальная головка

Основное отличие этого устройства от предыдущих заключается в том, что на шпинделе 4 инструментальной головки 3 установлена шестерня 5, взаимодействующая с зубчатым сектором 6 (рис. 1.6), который кинематически связан через ось, шатун 8 и эксцентрик 9 с приводным валом 10 привода качания.

Эксцентрик 9 преобразует постоянную скорость вращения вала 10 в прямолинейное возвратно-поступательное движение шатуна 8 с переменной скоростью, которая, в свою очередь, преобразуется в качательное движение зубчатого сектора 6 с переменной угловой скоростью.

За счет этого скорость осевого перемещения абразивных брусков вдоль профиля обрабатываемой поверхности получается неодинаковая: по краям профиля она уменьшается, а в центре профиля она возрастает. За счет этого по краям профиля заготовки снимается больший припуск, чем в центре профиля, и заготовка приобретает выпуклую форму профиля.

Самоустановку инструмента относительно обрабатываемой поверхности при многобрусковой обработке обеспечивают также изобретения [113 и 114] (рис. 1.7 и 1.8).

Сущность способа обработки двухрядных колец подшипников состоит в том, что обрабатываемой заготовке 1 и инструментальной головке 2

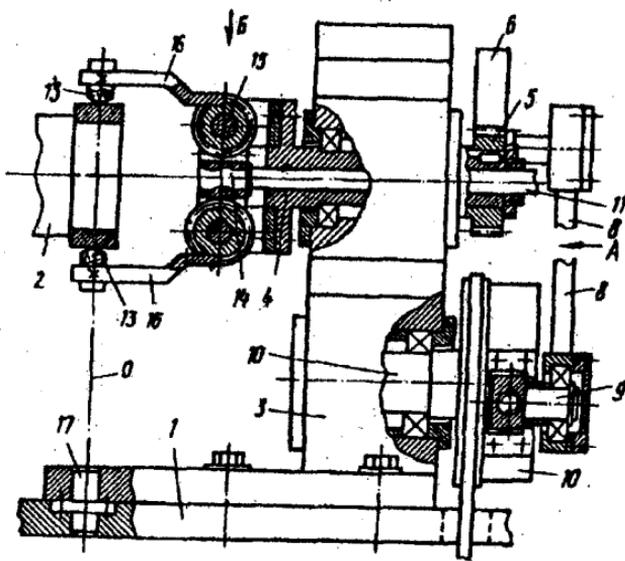


Рис. 1.5. Устройство для абразивной обработки

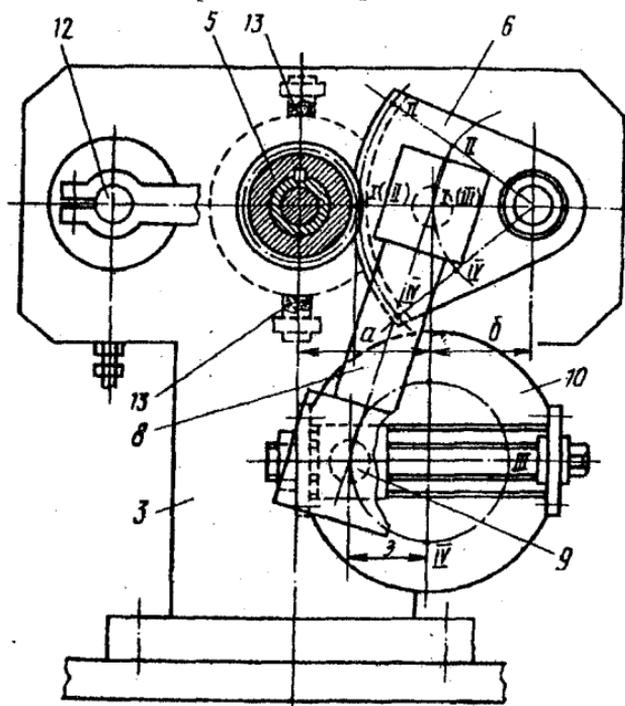


Рис. 1.6. Механизм качения инструментальной головки

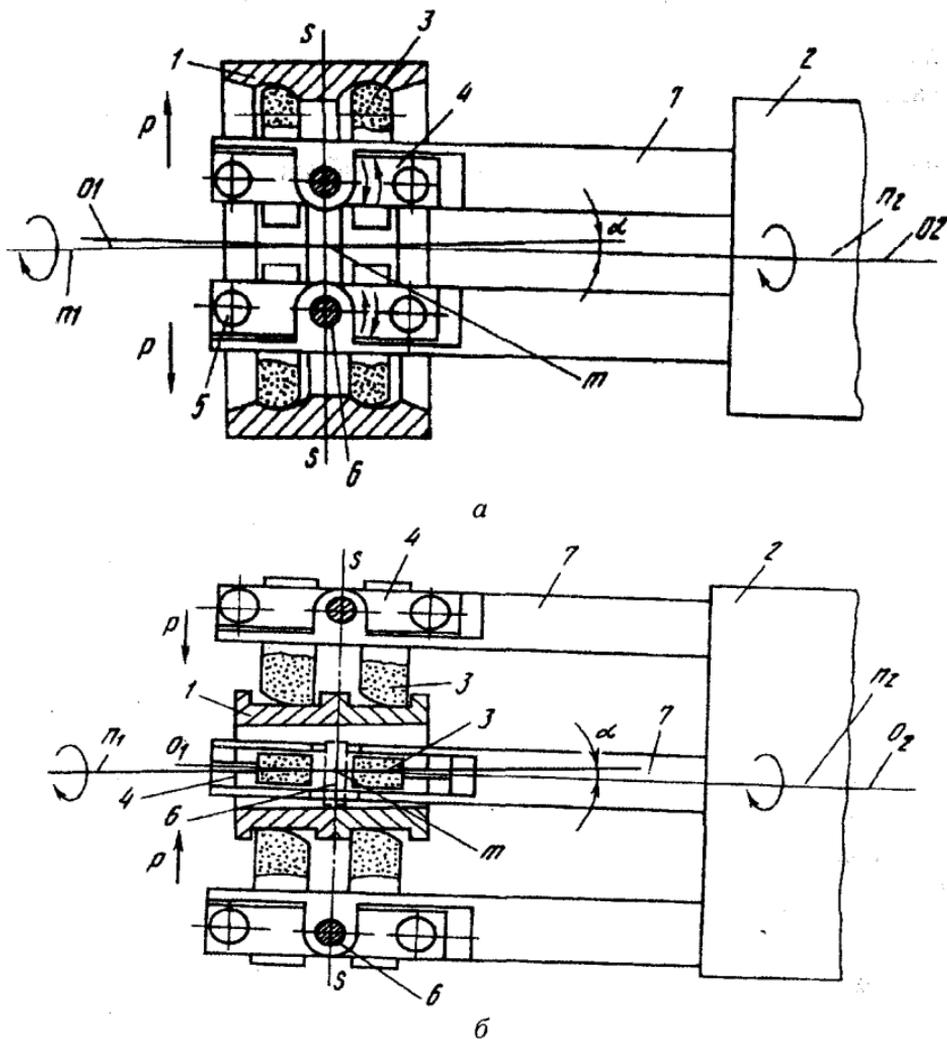


Рис. 1.7. Способ чистовой обработки колец двухрядных подшипников  
 а- шариковых подшипников, б- роликовых подшипников

с закрепленными на ней абразивными брусками 3 сообщают вращение вокруг их осей  $O_1$  и  $O_2$ , пересекающихся под острым углом  $\alpha$ . Обработке подвергают одновременно две поверхности двумя рядами брусков, попарно установленных в державке 7 инструментальной головки 2 с возможностью самоустановки относительно обрабатываемой поверхности, а точку пересечения осей  $O_1$  и  $O_2$  располагают в плоскости симметрии обрабатываемых поверхностей.

При этом существенно расширяются технологические возможности способа многобрусковой обработки – обеспечивается одновременная обработка двух поверхностей детали или совмещенная обработка двух деталей, разделенных другими поверхностями.

Задачей изобретения по Патенту № 2072295 [114] является повышение производительности многобрусковой обработки.

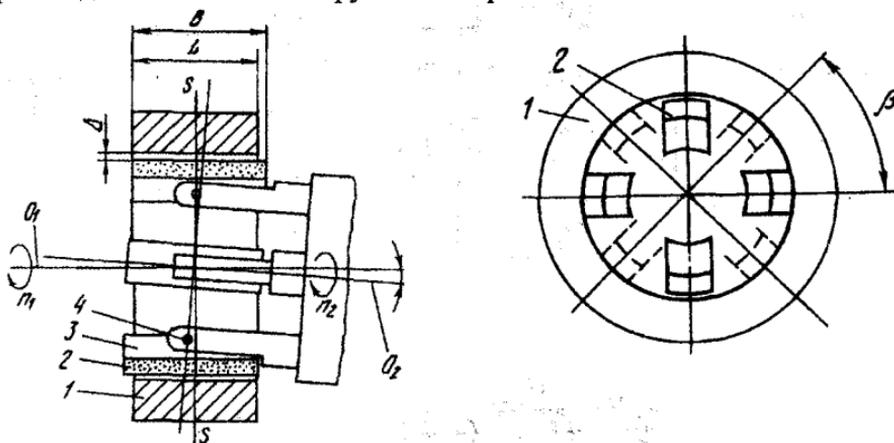


Рис. 1.8. Способ обработки дорожек качения роликоподшипников

Как и в предыдущем случае, обрабатываемой заготовке 1 и инструментальной головке 4 с закрепленными на ней абразивными брусками 2 сообщают вращение вокруг их осей  $O_1$  и  $O_2$ , пересекающихся под острым углом  $\alpha$ . Абразивные бруски устанавливают с возможностью самоустановки вдоль профиля заготовки, а угол пересечения осей заготовки и инструментальной головки определяют по формуле:

$$\alpha = \arccos \frac{1 - \sin^2 \frac{\pi}{n}}{\frac{2z}{d} + \sqrt{\cos^2 \frac{\pi}{n} + \sin^2 \frac{\pi}{n} \left( \frac{4z^2}{d^2} - \cos^2 \frac{\pi}{n} \right)}}$$

где  $d$  - диаметр обрабатываемой поверхности;

$z$  - заданный максимальный зазор между поверхностью брусков и заготовкой, примерно равный диаметру абразивных зерен брусков;

$n$  - число абразивных брусков.

Установка осей инструментальной головки и заготовки под указанным углом  $\alpha$  и закрепление брусков с возможностью самоустановки обеспечивают периодический отрыв каждого бруска от обрабатываемой поверхности на величину, равную размерам абразивных зерен, и следовательно, самоочистку рабочей поверхности брусков в процессе работы, что

повышает производительность обработки. Этот эффект связан с тем, что при жесткой кинематической связи брусков проекция расстояния между рабочими поверхностями парных брусков на плоскость, перпендикулярную оси заготовки, в плоскости пересечения осей заготовки и инструментальной головки получается меньшей, чем в перпендикулярной плоскости. Поэтому, если одна пара брусков находится в контакте с заготовкой, то другая пара брусков отрывается от обрабатываемой поверхности. Кроме того, самоустановка брусков позволяет обеспечить прямолинейность образующей обрабатываемой поверхности, в том числе при обработке внутренних поверхностей вращения.

Для разгрузки шпинделя от сил зажима заготовки в изобретении [110] предлагается устройство для зажима заготовки (рис. 1.9). Механизм зажима выполнен в виде цанги 11 с прижимным торцом, установленной на штоке 9 с возможностью возвратно-поступательного движения относительно гидростатической оправки 7, на которой установлена заготовка.

На свободном конце гидростатической оправки 7 выполнена шаровая опора К, взаимодействующая с конической частью цанги 11. При движении штока 9 влево цанга 11 разжимается и зажимает по торцу заготовку. После обработки ток 9 перемещается вправо, цанга сжимается, освобождая заготовку.

На рис. 1.10 показано аналогичное, но несколько иное по конструкции устройство [111].

Отличие этого устройства состоит в том, что механизм зажима колец 10 по торцу выполнен в виде кулачков 14, смонтированных на неподвижно закрепленной оси 15 с возможностью поворота относительно нее и связанных свилкой 13, шарнирно соединенной с тягой гидроцилиндра 12 посредством штока 11, расположенного в гидростатической оправке 6, предназначенной для размещения заготовки и связанной со шпинделем изделия.

Автооператор устанавливает на оправку 6 заготовку 10, при помощи муфты 9 масло подается в корпус оправки 6 и заготовка 10 центрируется. Вилка 13, перемещаясь под действием штока 11 и тяги гидроцилиндра 12, поворачивает кулачки 14 относительно оси 15, разводя их в положение, перпендикулярное торцу заготовки 10. Кулачки поджимают заготовку к базовому торцу оправки.

Таким образом, постепенное совершенствование конструкции автомата КХВ устранило большинство присущих ей недостатков, в результате чего эта конструкция достаточно долго производилась серийно. Однако громоздкость автомата и относительная сложность конструкции привели к необходимости разработки конструкции автомата типа ВДА (вертикальный доводочный автомат) с вертикальным расположением рабочих органов.

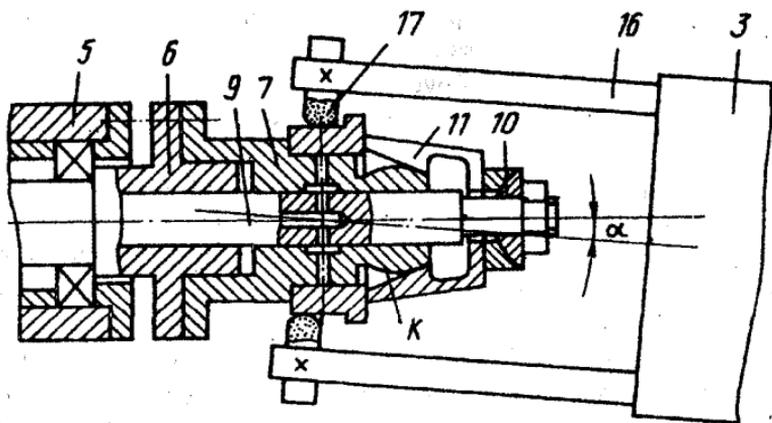


Рис. 1.9. Цанговое устройство для зажима заготовки

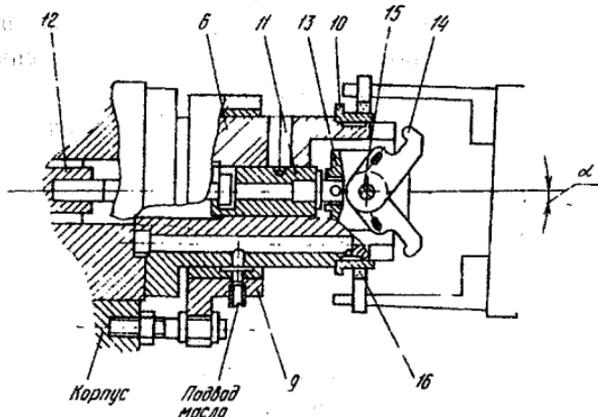


Рис. 1.10. Кулачковое устройство для зажима заготовки

В эту конструкцию был заложен новый способ обработки, заключающийся в том, что инструментальная головка наклонена под углом к оси заготовки, но в процессе обработки не вращается, а совершает плавное круговое движение вокруг точки симметрии обрабатываемой поверхности. Это существенно упрощает конструкцию станка и повышает качество обработки за счет ликвидации источника колебаний, вызываемых вращением инструментальной головки.

Одна из конструкций инструментальной головки [112], выполненная с применением указанного способа, показана на рис. 1.11.

Устройство содержит патрон 7, в направляющих которого закреплены державки брусков, перемещающиеся вместе с абразивными брусками от специального привода (не показан). Корпус 7 патрона смонтирован при помощи сферического подшипника 8 на эксцентрикe 9, неподвижно закреп-

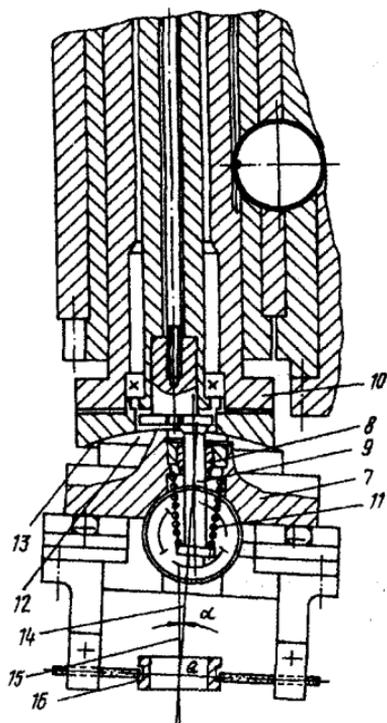


Рис. 1.11. Конструкция инструментальной головки с вертикальным расположением оси

пленном на торце шпинделя, установленном в пиноле 10 соосно со шпинделем изделия, и поджимается при помощи пружины 11 в сторону пиноли, при этом на торцах пиноли 10 и корпуса патрона 7 выполнены сопрягаемые сферические поверхности 12 и 13 с центром в т. Q. Ось 14 корпуса патрона 7 расположена под углом  $\alpha$  к оси вращения 15 заготовки 16, заданное значение которого обеспечивается технологически величиной эксцентриситета эксцентрика 9.

Заготовка 16 устанавливается на шпинделе изделия, зажимается по торцу и получает вращение от специального привода.

Инструментальная головка подводится к заготовке так, чтобы центр сопрягаемых поверхностей 12 и 13 пиноли 10 и корпуса патрона 7 совместился с центром обрабатываемой поверхности. Абразивные бруски подводятся к обрабатываемой поверхности, а эксцентрик 9 получает вращение в подшипниках пиноли 10. Корпус патрона 7 при этом не вращается, а совершает прессирующее движение вокруг т. Q. Пружина 11 обеспечивает непрерывный контакт сферических поверхностей 12 и 13, которые в процессе обработки скользят одна относительно другой.

На наш взгляд, автоматы типа ВДА являются наиболее конкурентоспособными на отечественном и мировом рынках сбыта по сравнению с предыдущей моделью КХВ. Основные преимущества конструкции этого автомата состоят в следующем:

1. Отсутствие высокочастотных знакопеременных движений инструмента, характерных для традиционного суперфиниширования, снижающих виброактивность технологической системы.

2. Высокая универсальность автомата, так как при простой переналадке он может использоваться для обработки самых разнообразных поверхностей деталей, в том числе цилиндрических, сферических, со сложным профилем, конических, колец двухрядных подшипников и др.

3. Возможность активного исправления не только волнистости и гранности, но и некруглости, овальности деталей, погрешностей формы профиля.

4. Возможность создания поверхности выпуклой формы в пределах 3-4 мкм (например, на дорожках качения роликоподшипников).

5. Возможность рационального профилирования обрабатываемых поверхностей, создающего более благоприятное распределение контактных напряжений в подшипнике и повышение его долговечности и быстроходности.

6. Простота обслуживания: высокая стойкость инструмента, простота наладки.

7. Малые габариты, простота конструкции, низкая стоимость.

8. Малая потребляемая энергия.

Пожалуй, единственным недостатком существующей конструкции автомата до недавнего времени оставалась сложность оптимального профилирования внутренних поверхностей вращения типа дорожек качения наружных колец роликоподшипников и желобов наружных и внутренних колец шарикоподшипников. При совмещении центра пересечения осей заготовки и инструментальной головки с центром профиля обрабатываемой поверхности траектория перемещения инструмента не совпадает с центром кривизны этих поверхностей, отчего профиль желобов колец значительно искажается, а профиль дорожек качения наружных колец роликоподшипников становится вогнутым.

Кроме того, среди большого многообразия преимуществ рассмотренных выше способов нас особенно интересует возможность прецизионного профилирования обрабатываемых поверхностей деталей. К сожалению, в указанных работах [72-74, 86 и др.] исследована лишь возможность придания обрабатываемым поверхностям выпуклой формы, но ничего не говорится о самой форме и не раскрыт механизм формирования профиля заготовки. А так как именно форма профиля контактирующих поверхно-

стей деталей оказывает решающее влияние на работоспособность трибосопрежений, то представляет практический интерес исследование влияния процесса формообразующего суперфиниширования на форму обрабатываемой поверхности.

На основе выполненного критического анализа источников информации можно сделать следующие выводы:

1. В настоящее время в машиностроении имеется большое количество разнообразных деталей, к которым предъявляются высокие требования по точности изготовления и качеству поверхности и поверхностного слоя. Типичным и наиболее массовым представителем этих деталей являются кольца подшипников качения.

2. Среди разнообразных методов окончательной обработки таких деталей наиболее эффективным является суперфиниширование, которое в отличие от других методов обладает способностью к самозатачиванию инструмента, к самоочищению, способностью инструмента прирабатываться к обрабатываемой поверхности. Это обеспечивает возможность снимать тончайший припуск с обрабатываемой поверхности даже при значительных геометрических погрешностях заготовки, существенно уменьшать ее волнистость и шероховатость.

3. Однако традиционному процессу суперфиниширования присущи серьезные недостатки, основными из которых являются: относительно низкая производительность, высокая чувствительность к качеству исходной поверхности заготовок, невысокая степень удаления неровностей низкой частоты (овальности, гранности), необходимость осуществления процесса обработки в несколько технологических переходов, низкая универсальность, сложность наладки оборудования, необходимость привлечения к работе высококвалифицированных наладчиков, необходимость частой подналадки оборудования из-за повышенного износа бруска.

4. С целью решения проблемы повышения эффективности процесса суперфиниширования и устранения отмеченных недостатков у нас в стране и за рубежом предпринято множество попыток его усовершенствования. Однако каждый из предлагаемых способов суперфиниширования, устраняя некоторые из его недостатков, сохраняет другие и даже приводит к появлению новых недостатков.

5. Наряду с другими научными школами, больших успехов в области совершенствования процесса суперфиниширования добилась саратовская школа. Наиболее эффективными разработками этой школы последних лет являются создание технологии формообразующего многобрускового суперфиниширования и на ее основе - суперфинишных автоматов типа ВДА с вертикальным расположением рабочих органов.

6. Однако целый ряд проблем формообразующего суперфиниширования требует дальнейшего решения. К их числу относятся проблемы обеспечения рациональных условий формирования заданного профиля внутренних поверхностей деталей типа дорожек качения наружных колец подшипников; эффективной обработки поверхностей заготовок большой кривизны, типа желобов колец шарикоподшипников; формирования поверхностей сложной формы. Требуется решение ряда теоретических вопросов: исследование степени засаливания инструмента в процесс суперфиниширования, его влияния на формирование профиля заготовки и др.

## ГЛАВА 2. ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОФИЛЯ ЗАГОТОВКИ НА ОПЕРАЦИЯХ СУПЕРФИНИШИРОВАНИЯ

### 2.1. Механизм профилирования обрабатываемой поверхности

Как уже отмечалось, саратовской научной школой в основном рассматривались способы суперфиниширования, при которых центр пересечения осей заготовки и инструментальной головки совпадал с центром симметрии профиля заготовки [72,73,103,104]. Это вполне приемлемо при обработке сферических поверхностей или поверхностей с прямолинейной образующей, если профилю этих поверхностей необходимо придать небольшую выпуклость или вогнутость. С помощью таких способов можно, например, обрабатывать дорожки качения внутренних колец роликоподшипников. В этом случае даже полученные на операциях предварительного шлифования вогнутые профили можно исправлять на выпуклые и тем самым обеспечивать заданное качество подшипников.

Однако при обработке поверхностей с малыми значениями кривизны профиля, например, дорожек качения шарикоподшипников или наружных колец роликоподшипников, центр которых не совпадает с центром симметрии заготовки, такие способы суперфиниширования неприемлемы, так как вследствие особенностей кинематики этих процессов снимаемый припуск получается слишком неравномерным вдоль линии профиля и управлять этим процессом становится невозможно. Для профилирования этих поверхностей и особенно для обработки поверхностей сложного профиля следует искать новые, более эффективные способы. И очевидно, что эти способы должны предусматривать возможность перемещения инструмента относительно центра, не совпадающего с центром симметрии обрабатываемой поверхности заготовки.

Поэтому в качестве объекта исследования рассмотрим самый общий случай процесса суперфиниширования, при котором инструмент совершает качательное движение относительно некоторой точки, расположенной на определенном расстоянии от центра симметрии обрабатываемой поверхности. Схема осуществления способа показана на рис. 2.1 и 2.2.

Абразивный брусок 1 радиуса  $r$  и шириной  $s$  прижимается с силой  $P$  к обрабатываемой поверхности заготовки 2 и совершает осциллирующее движение относительно т.  $Q$  по радиусу  $R$ . Обрабатываемая длина заготовки равна  $H$ . Частота двойных колебаний в секунду равна  $n_b$ . Положение т.  $O_c$  является центральным положением бруска 1, положения  $E$  и  $E_1$  - крайними. Заготовка вращается с линейной скоростью  $v_2$  вокруг своей

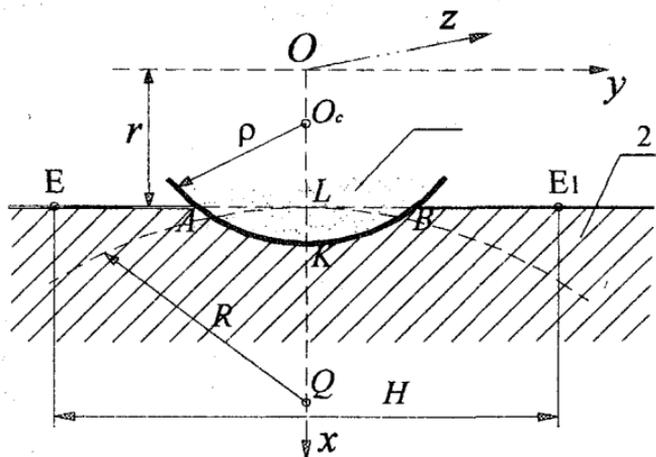


Рис. 2.1. Схема взаимного перемещения заготовки и инструмента

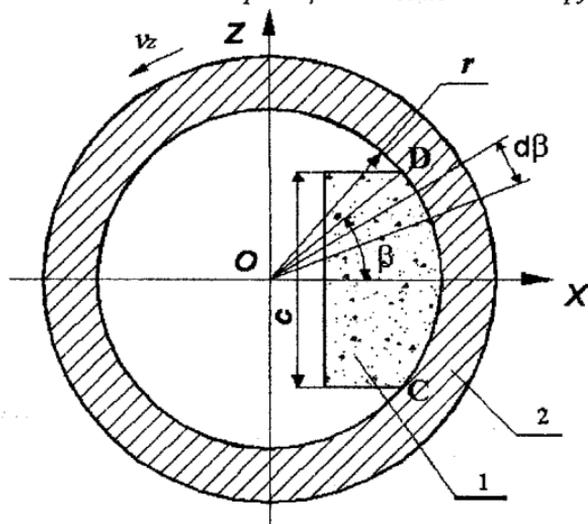


Рис. 2.2. Расчетная схема формообразующего суперфиниширования применительно к обработке внутренней поверхности

оси по радиусу  $r$ . Таким образом, расстояние точки  $Q$  от оси вращения заготовки 2 составляет  $R + r$ .

На рис. 2.2 представлена схема обработки внутренней поверхности. Но это не имеет принципиального значения и приведенные исследования в полной мере могут относиться и к обработке наружных поверхностей. При этом схема обработки с качательным движением инструмента относительно центра симметрии поверхности заготовки является лишь частным случаем рассматриваемой схемы.

Выберем декартовую систему координат  $XOYZ$  таким образом, чтобы ось  $OY$  являлась бы осью вращения заготовки, а ось  $OX$  - осью симметрии обрабатываемой поверхности. Таким образом, брусок осциллирует в плоскости  $XOY$ , а заготовка вращается в плоскости вокруг оси  $OY$ .

В этой системе координат примем следующую зависимость положения центра бруска от времени:

$$y_c(\tau) = \frac{H}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{T} \tau\right) = \frac{H}{2} \sin(2\pi n_b \tau). \quad (2.1)$$

Выражение (2.1) показывает, что скорость скольжения инструмента вдоль профиля заготовки является непостоянной и изменяется по синусоидальному закону. Большинство известных механизмов достаточно просто реализуют предложенную схему обработки. Кроме того, данная схема обеспечивает плавное изменение скорости инструмента, что придает процессу необходимую плавность осуществления.

Определим линейный съем в произвольной точке обрабатываемой поверхности при одном прохождении бруска через эту точку. Очевидно, снимаемый объем стружки с поверхности заготовки должен зависеть от абразивных свойств бруска, формы его рабочей поверхности, скорости движения бруска относительно поверхности заготовки  $v$  и силы прижима  $P$ . Примем силу прижима  $P$  бруска к заготовке постоянной, не зависящей от положения бруска на заготовке.

Из рис.2.1 можно заметить, что объем снимаемой стружки с элементарным участком бруска  $ds$ , ограниченный вдоль оси  $OY$  длиной  $dy$ , а в плоскости  $XOZ$  - шириной бруска  $c$ , зависит от положения этого элементарного участка на бруске. Действительно, элементарный участок бруска в окрестности точки  $K$  снимет объем стружки больший, чем элементарный участок в произвольно другой выбранной точке бруска, так как глубина внедрения этого участка в заготовку больше, чем в любой другой точке бруска.

Таким образом, при определении объема стружки, снимаемой бруском в произвольно выбранной точке заготовки, необходимо установить, какой объем стружки снимет каждый его элементарный участок при прохождении через данную точку заготовки.

Для решения поставленной задачи определим закон движения бруска по заготовке. Как уже отмечалось выше, брусок совершает колебательные движения вокруг точки  $Q$  по радиусу  $R$ . Под воздействием силы прижима  $P$  брусок внедряется в заготовку на величину  $a_m$ , которую предстоит еще найти. Так как силу прижима бруска к заготовке мы принимаем во всех точках одинаковой, то и величина  $a_m$  будет оставаться неизменной, а, следовательно, будет оставаться неизменной координата центра бруска по оси

$OX$ . Таким образом, брусок, поворачиваясь на угол  $\alpha$  вокруг точки  $Q$ , будет совершать еще поступательное движение вдоль оси  $OX$  на величину  $\Delta$ , которую мы ниже определим.

Обозначим через  $x_c^\alpha$  и  $y_c^\alpha$  координаты центра бруска при повороте его на угол  $\alpha$ . Координаты центрального положения бруска будем обозначать через  $x_c^0$  и  $y_c^0$ .

Из рис.2.1 можно получить:

$$x_c^0 = OO_c = OL - LO_c.$$

Так как

$$OL = r; \quad LO_c = O_cK - KL = \rho - a_m,$$

то

$$x_c^0 = r - \rho + a_m(b) = r - \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2}; \quad (2.2)$$

$$y_c^0 = 0.$$

Кроме того, из рис.2.1 можно определить:

$$a_m = LK = KO_c - LO_c = \rho - \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2},$$

где  $b$  - длина контакта бруска с заготовкой вдоль оси  $OY$  (отрезок  $AB$  на рис.2.1).

Величина  $b$  остается пока неизвестной. В дальнейшем в знак того, что та или иная величина зависит от  $b$ , будем в случае необходимости записывать ее как функцию от  $b$ . Таким образом, будем в дальнейшем писать  $a_m(b)$ .

Раскладывая выражение под корнем в ряд и учитывая, что в диапазоне возможных изменений  $b < 0,1 \cdot \rho$  с погрешностью, не превышающей 0,001%, можно ограничиться двумя первыми членами ряда, после преобразования получим:

$$a_m(b) \approx \frac{b^2}{8\rho}. \quad (2.3)$$

Определим координату центра бруска  $y_c^\alpha$  и величину вертикального перемещения бруска  $\Delta$  при повороте бруска на угол  $\alpha$ .

Схема поворота бруска на угол  $\alpha$  представлена на рис.2.3. После поворота бруска на угол  $\alpha$  центр бруска  $O_c$  сместится в точку  $O_{c1}$ . В этом случае ордината  $y_c^\alpha$  точки  $O_{c1}$  станет равной:

$$y_c^\alpha = FO_{c1} = QO_{c1} \cdot \sin \alpha.$$

Т.к.

$$QO_{c1} = QO_c = QL + LO_c,$$

где  $QL = R$ , а  $LO_c = \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2}$ ,

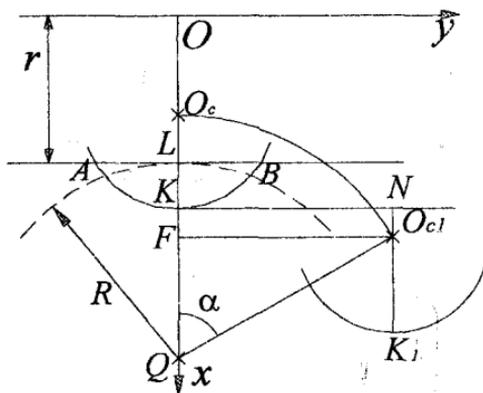


Рис. 2.3. Схема перемещения бруска вдоль профиля заготовки

$$y_c^\alpha = \left( R + \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} \right) \cdot \sin \alpha.$$

Абсцисса центра бруска по оси  $OX$  примет значение:

$$\begin{aligned} x_c^\alpha &= OQ - QF = (R + r) - QO_{c1} \cos \alpha = \\ &= (R + r) - \left( R + \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} \right) \cos \alpha. \end{aligned}$$

Следовательно, координаты точки центра бруска будут равны:

$$\begin{cases} x_c^\alpha = (R + r) - \left( R + \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} \right) \cos \alpha; \\ y_c^\alpha = \left( R + \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} \right) \sin \alpha. \end{cases} \quad (2.4)$$

За счет криволинейного движения брусок максимально внедрится в заготовку на величину:

$$x_c^\alpha + \rho.$$

Но так как брусок поджимается к заготовке с постоянной силой и, следовательно, глубина  $a_m$  внедрения бруска в заготовку остается неизменной, то при повороте вокруг оси  $Q$  брусок совершит поступательное

движение в вертикальном направлении на величину:

$$\Delta = x_c^\alpha + \rho - (a_m + r) = (R + r) - \left( R + \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} \right) \cos \alpha + \rho -$$

$$- \rho + \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} - r = \left( R + \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} \right) - \left( R + \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} \right) \cos \alpha. \quad (2.5)$$

Таким образом, с учетом равенства (2.5) координаты центра бруска (2.4) после его поворота на угол  $\alpha$  будут определяться выражениями:

$$\begin{cases} x_c^\alpha = r - \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2}; \\ y_c^\alpha = \left( R + \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} \right) \sin \alpha. \end{cases} \quad (2.6)$$

Кроме того, уравнение профиля рабочей поверхности бруска после поворота бруска на угол  $\alpha$  будет иметь вид:

$$x^\alpha(y) = \sqrt{\rho^2 - (y - y_c^\alpha)^2} + x_c^\alpha$$

или с учетом (2.6):

$$x^\alpha(y) = \sqrt{\rho^2 - \left( y - \left[ \left( R + \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} \right) \sin \alpha \right] \right)^2} + r - \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2}. \quad (2.7)$$

Обозначим через  $x_\theta^0$  и  $y_\theta^0$  координаты фиксированной точки на бруске, когда он занимает центральное положение. Определим, какие будут иметь координаты эта точка  $x_\theta^\alpha$  и  $y_\theta^\alpha$ , после поворота бруска на угол  $\alpha$ . Как видно из рис. 2.4, точка бруска  $G$  переместилась в точку  $G_1$ .

При этом координаты точки станут равными:

$$y_\theta^\alpha = TG_1 = QG_1 \sin(\alpha + \gamma);$$

$$x_\theta^\alpha = x_\theta^0 + GV,$$

где

$$GV = SQ - TQ;$$

$$SQ = OQ - OS = (R + r) - x_\theta^0;$$

$$TQ = QG_1 \cos(\alpha + \gamma).$$

Так как

$$\cos \gamma = \frac{SQ}{QG}; \quad \sin \gamma = \frac{y_\theta^0}{QG}; \quad QG = QG_1,$$

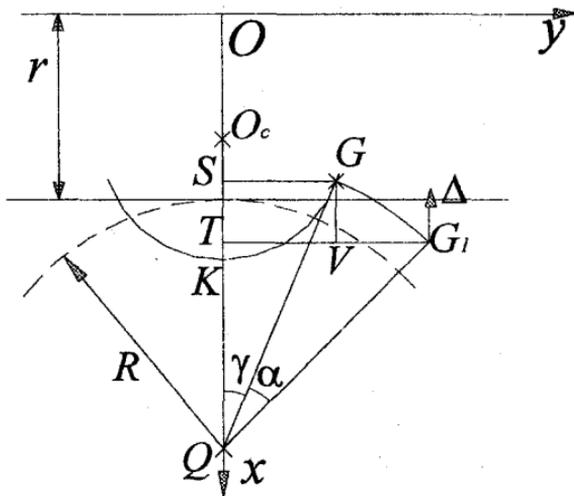


Рис. 2.4. Схема к определению координат точек профиля поверхности бруска

то

$$\begin{aligned}
 x_6^\alpha &= x_6^0 + SQ - TQ = x_6^0 + (R + r - x_6^0) - QG \cos \alpha \cos \gamma + \\
 &+ QG \sin \alpha \sin \gamma = R + r - QG \cdot \frac{SQ}{QG} \cos \alpha + QG \cdot \frac{y_6}{QG} \sin \alpha = \\
 &= R + r - SQ \cos \alpha + y_6^0 \sin \alpha = R + r - (R + r - x_6^0) \cos \alpha + y_6^0 \sin \alpha.
 \end{aligned}$$

С учетом вертикального перемещения бруска на величину  $\Delta$  из выражения (2.5):

$$\begin{aligned}
 x_6^\alpha &= x_6^\alpha - \Delta = R + r - (R + r - x_6^0) \cos \alpha + y_6^0 \sin \alpha - \\
 &\quad - \left( R + \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} \right) (1 - \cos \alpha).
 \end{aligned}$$

Из равенства (2.7) при  $\alpha = 0$

$$x_6^0 = \sqrt{\rho^2 - (y_6^0)^2} + r - \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2}. \quad (2.8)$$

Подставляя это значение координат в предыдущее уравнение, получим:

$$x_6^\alpha = r + \sqrt{\rho^2 - (y_6^0)^2} \cos \alpha + y_6^0 \sin \alpha - \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2}.$$

Аналогично (с учетом (2.8)):

$$y_6^\alpha = TG_1 = QG_1 \sin(\alpha + \gamma) = QG_1 \sin \alpha \cos \gamma + QG_1 \cos \alpha \sin \gamma =$$

$$= QG \sin \alpha \frac{SQ}{QG} + QG \cos \alpha \frac{y_6^0}{QG} = SQ \sin \alpha + y_6^0 \cos \alpha = (R + r - x_6^0) \sin \alpha + y_6^0 \cos \alpha = \left( R - \sqrt{\rho^2 - y_6^0{}^2} + \sqrt{\rho^2 - \frac{b^2}{4}} \right) \sin \alpha + y_6^0 \cos \alpha.$$

Таким образом, окончательно имеем:

$$x_6^\alpha = r + \sqrt{\rho^2 - (y_6^0)^2} \cos \alpha + y_6^0 \sin \alpha - \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2}; \quad (2.9)$$

$$y_6^\alpha = \left( R - \sqrt{\rho^2 - (y_6^0)^2} + \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} \right) \sin \alpha + y_6^0 \cos \alpha.$$

Вследствие криволинейной формы бруска при его перемещении вдоль профиля заготовки каждая из его точек рабочей поверхности может войти в контакт с заготовкой и может выйти из контакта. Это - весьма важное обстоятельство, которое не учитывалось в предыдущих исследованиях механизма процесса профилирующего суперфиниширования, но которое имеет принципиальное значение, так как позволяет бруску очищаться от стружки и шлама и сохранять высокие режущие свойства.

Поэтому определим для произвольной точки бруска с координатами  $x_6^0$  и  $y_6^0$ , при каком угле  $\alpha_1$  поворота бруска она вступит в контакт с заготовкой и при каком угле  $\alpha_2$  контакта она выйдет из контакта с заготовкой. Очевидно, условие контакта точки бруска ( $x_6^0, y_6^0$ ) с заготовкой при повороте бруска на угол  $\alpha$  можно записать следующим образом:

$$x_6^\alpha = r + \sqrt{\rho^2 - (y_6^0)^2} \cos \alpha + y_6^0 \sin \alpha - \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} \geq r. \quad (2.10)$$

Решая неравенство (2.10) относительно  $\alpha$ , получим, что точка ( $x_6^0, y_6^0$ ) бруска находится в контакте с заготовкой, если угол поворота бруска лежит в диапазоне:

$$\alpha_1 \leq \alpha \leq \alpha_2,$$

где

$$\alpha_1 = 2 \arctg \left( \frac{y_6^0 - \frac{b}{2}}{\sqrt{\rho^2 - (y_6^0)^2} + \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2}} \right);$$

$$\alpha_2 = 2 \operatorname{arctg} \left( \frac{y_6^0 + \frac{b}{2}}{\sqrt{\rho^2 - (y_6^0)^2} + \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2}} \right). \quad (2.11)$$

При этом координаты центра бруска, соответствующие этим углам, можно определить из выражения (2.6). Для этого используем следующие тождества:

$$\sin^2 x = \frac{\operatorname{tg}^2 x}{1 + \operatorname{tg}^2 x}, \quad \sin x = 2 \cos \frac{x}{2} \sin \frac{x}{2}, \quad \cos^2 x = \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 x}.$$

Тогда

$$\begin{aligned} \sin^2(2 \operatorname{arctg}(x)) &= 4 \cos^2(\operatorname{arctg}(x)) \sin^2(\operatorname{arctg}(x)) = \\ &= 4 \frac{\operatorname{tg}^2(\operatorname{arctg}(x))}{(1 + \operatorname{tg}^2(\operatorname{arctg}(x)))^2} = 4 \frac{x^2}{(1 + x^2)^2}, \end{aligned}$$

а так как функция  $\sin(2 \operatorname{arctg}(x))$  нечетная и совпадает со знаком  $-\frac{\pi}{2} \leq x \leq \frac{\pi}{2}$ , то

$$\sin(2 \operatorname{arctg}(x)) = 2 \frac{x}{1 + x^2}.$$

Используя эти преобразования, получаем:

$$\begin{aligned} \sin \alpha_2 &= \sin \left\{ 2 \operatorname{arctg} \left( \frac{y_6^0 + \frac{b}{2}}{\sqrt{\rho^2 - (y_6^0)^2} + \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2}} \right) \right\} = \\ &= 2 \frac{\left( y_6^0 + \frac{b}{2} \right) \left( \sqrt{\rho^2 - (y_6^0)^2} + \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} \right)}{\left( y_6^0 + \frac{b}{2} \right)^2 + \left( \sqrt{\rho^2 - (y_6^0)^2} + \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} \right)^2} \end{aligned}$$

Аналогично, повторяя предыдущие преобразования, получим выражение для величины  $\sin \alpha_1$ .

$$\sin \alpha_1 = 2 \frac{\left(y_6^0 - \frac{b}{2}\right) \left(\sqrt{\rho^2 - (y_6^0)^2} + \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2}\right)}{\left(y_6^0 - \frac{b}{2}\right)^2 + \left(\sqrt{\rho^2 - (y_6^0)^2} + \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2}\right)^2}$$

Подставляя последние два выражения в (2.6), окончательно получим:

$$y_{c0}(y_6^0) = 2 \left( R + \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} \right) \times \frac{\left(y_6^0 - \frac{b}{2}\right) \left(\sqrt{\rho^2 - (y_6^0)^2} + \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2}\right)}{\left(y_6^0 - \frac{b}{2}\right)^2 + \left(\sqrt{\rho^2 - (y_6^0)^2} + \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2}\right)^2}, \quad (2.12)$$

$$y_{c1}(y_6^0) = 2 \left( R + \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} \right) \times \frac{\left(y_6^0 + \frac{b}{2}\right) \left(\sqrt{\rho^2 - (y_6^0)^2} + \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2}\right)}{\left(y_6^0 + \frac{b}{2}\right)^2 + \left(\sqrt{\rho^2 - (y_6^0)^2} + \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2}\right)^2}$$

Таким образом, выражения (2.2)-(2.12) определяют геометрическое взаимодействие между бруском и заготовкой.

Как уже отмечалось, для определения съема в произвольной точке поверхности необходимо определить, какой объем стружки снимет каждый его элементарный участок при прохождении через данную точку заготовки. Для этого рассмотрим элементарный участок бруска  $ds$ , являющийся окрестностью произвольной точки с координатой  $y$ .

Если обозначить через  $S(y)$  математическое ожидание площади одного зерна, внедренного в заготовку на этом элементарном участке, через  $z_a$  - число активных режущих зерен на единице поверхности бруска, которые за время одного контакта с данным поперечным сечением детали могут оставить после себя канавки глубиной не менее  $a$ , то математическое ожидание площади всех режущих зерен на выбранном элементарном уча-

стке есть произведение:

$$S(y) \cdot z_a \cdot ds.$$

Если скорость бруска по заготовке обозначить через  $v$ , то объем стружки, который снимет этот элементарный участок бруска при прохождении через данную точку заготовки за время  $dt$ , будет равен:

$$dV = S(y) \cdot z_a \cdot ds \cdot v \cdot dt. \quad (2.13)$$

Определим величины, участвовавшие в равенстве (2.13).

1). Площадь элементарной поверхности бруска  $ds$  в окрестности точки  $y$ , участвовавшая в контакте с заготовкой, определяется из выражения (рис.2.2):

$$ds = \overset{\cup}{CD} \cdot dy,$$

где  $\overset{\cup}{CD}$  - длина дуги контакта бруска с заготовкой в плоскости  $XOZ$ .

Из рис.2.2 видно, что

$$\overset{\cup}{CD} = r \cdot \beta,$$

а так как брусок имеет ширину  $c$ , то из простых геометрических соображений получаем:

$$\cos \beta = 1 - \frac{c^2}{2r^2}, \quad \cos \beta = 1 - 2 \sin^2 \frac{\beta}{2},$$

откуда

$$\beta = 2 \arcsin \frac{c}{2r}.$$

Таким образом, площадь контакта поверхности бруска с заготовкой, ограниченную шириной бруска и окрестностью произвольной точки, можно определить из выражения:

$$ds = \overset{\cup}{CD} \cdot dy = 2r \arcsin \left( \frac{c}{2r} \right) dy. \quad (2.14)$$

2). Как известно, число активных зерен  $z_a$  на единице поверхности абразивного инструмента, которые за время одного контакта с данным поперечным сечением заготовки могут оставить после себя канавки глубиной не менее  $a$ , можно найти из выражения [91]:

$$z_a(y, b) = 0,24 \cdot z_r \cdot \left( \frac{a_y(b) - a}{d_0} \right)^{2,75}, \quad (2.15)$$

где  $d_0$  - средний диаметр абразивных зерен инструмента;

$z_r$  - число зерен на единице рабочей поверхности абразивного инструмента, равное [91]:

$$z_r = \frac{K_S}{d_0^2}, \quad (2.16)$$

где  $K_S$  - коэффициент структуры абразивного инструмента;

$a_y(b)$  - максимально возможная глубина внедрения зерна в заготовку в сечении плоскостью  $y = const$  бруска.

Из выражения (2.15) несложно определить число всех зерен, которые внедряются в заготовку в сечении  $y$ . Для этого положим в (2.15)  $a = 0$ . Т.е. нас интересует число активных зерен  $z_0$  на единице поверхности абразивного инструмента, которые за время одного контакта с данным поперечным сечением заготовки могут оставить после себя канавки произвольной глубины на заготовке.

Так как уравнение профиля рабочей поверхности бруска представлено в выражении (2.7), то:

$$a_y(\alpha, b) = x_y^\alpha - r = \sqrt{\rho^2 - \left( y - \left[ \left( R + \sqrt{\rho^2 - \left( \frac{b}{2} \right)^2} \right) \sin \alpha \right] \right)^2} - \sqrt{\rho^2 - \left( \frac{b}{2} \right)^2}.$$

С учетом обоснованных выше принятых приближений (2.3):

$$a_y(\alpha, b) = \frac{b^2}{8\rho} - \frac{\left( y - \left[ \left( R + \sqrt{\rho^2 - \left( \frac{b}{2} \right)^2} \right) \sin \alpha \right] \right)^2}{2\rho}. \quad (2.17)$$

Коэффициент структуры абразивного инструмента можно определить из табл. 2.1.

Таблица 2.1

Коэффициент структуры абразивного инструмента

Номер структуры	4	5	6	7	8
$K_S$	1,02	1,00	0,97	0,94	0,92

Определим математическое ожидание площади одного активного зерна  $S(y)$ .

Как известно [91], площадь одного активного зерна можно найти из выражения:

$$S(y) = 2,5 \cdot a^2, \quad (2.18)$$

где  $a$  - глубина внедрения зерна в заготовку в окрестности точки, находящейся в точке  $y$  бруска.

Так как максимальная глубина внедрения зерна в заготовку в сечении у бруска равна  $a_y$ , то величина  $a$  является случайной величиной, распределенной в интервале  $[0, a_y]$ . Определим ее плотность распределения.

Как известно [91], плотность вероятности распределение глубин царапин от зерен на поверхности изделия, при которых возможно их разрушение, соответствует закону Рэлея с параметром  $\frac{a_{kr}}{\sqrt{2}}$ :

$$f(a) = \frac{2a}{a_{kr}^2} e^{-\frac{a^2}{a_{kr}^2}}, \quad a \geq 0, \quad (2.19)$$

где  $a_{kr}$  - критическая глубина внедрения зерна в поверхность заготовки, при которой оно выпадает из связки:

$$a_{kr} = 0,35 \sqrt{\frac{d_0^{0,5}}{\tau_{сдв}(1+\xi)}}, \quad (2.20)$$

где  $\xi$  - коэффициент усадки стружки;

$\tau_{сдв}$  - величина касательных напряжений сдвига обрабатываемого материала.

Тогда вероятность того, что зерно не разрушится на глубине  $a$  внедрения в заготовку, можно определить из выражения:

$$P(a) = 1 - \int_0^a f(x) dx = 1 - \int_0^a \frac{2x}{a_{kr}^2} e^{-\frac{x^2}{a_{kr}^2}} dx = e^{-\frac{a^2}{a_{kr}^2}}. \quad (2.21)$$

Равенство (2.21) позволяет найти число зерен на единице поверхности, которые могут резать на глубине, большей или равной  $a$ , и при этом не разрушаться:

$$\eta(a) = z_a(y, \alpha, b) \cdot P(a). \quad (2.22)$$

Таким образом, число зерен, вершины которых находятся на глубине внедрения в заготовку в пределах  $[a, a + da]$ , равно:

$$\delta(a) = \eta(a) - \eta(a + da) = -d\eta(a) = -\eta'(a) da. \quad (2.23)$$

Из выражения (2.22) с учетом (2.15), (2.19), (2.21) имеем:

$$\begin{aligned} \eta'(a) &= z_a'(b) \cdot P(a) + z_a(b) \cdot P'(a) = z_a'(b) \cdot P(a) - z_a(b) \cdot f(a) = \\ &= -0,24 \cdot z_r \cdot 2,75 \cdot \frac{(a_y - a)^{1,75}}{d_0^{2,75}} e^{-\frac{a^2}{a_{kr}^2}} - 0,24 \cdot z_r \cdot \frac{(a_y - a)^{2,75}}{d_0^{2,75}} \frac{2a}{a_{kr}^2} e^{-\frac{a^2}{a_{kr}^2}} = \end{aligned}$$

$$= -0,24 \cdot z_r \cdot \frac{(a_y - a)^{1,75}}{d_0^{2,75}} e^{-\frac{a^2}{a_{kr}^2}} \left( 2,75 + \frac{2a}{a_{kr}^2} (a_y - a) \right). \quad (2.24)$$

Как следует из (2.23) и (2.24):

$$\delta(a) = 0,24 \cdot z_r \cdot \frac{(a_y - a)^{1,75}}{d_0^{2,75}} e^{-\frac{a^2}{a_{kr}^2}} \cdot \left\{ 2,75 + \frac{2a}{a_{kr}^2} (a_y - a) \right\} da.$$

Следовательно, плотность распределения зерен, имеющих глубину  $a$ , имеет вид:

$$g(a) = \frac{\delta(a)}{z_0(y, \alpha, b) \cdot da} = \frac{(a_y - a)^{1,75}}{a_y^{2,75}} e^{-\frac{a^2}{a_{kr}^2}} \cdot \left\{ 2,75 + \frac{2a}{a_{kr}^2} (a_y - a) \right\}, \quad (2.25)$$

$0 \leq a \leq a_y.$

Зная плотность распределения случайной величины  $a$  (2.25), можно определить плотность распределения случайной величины  $S$ , связанной с  $a$  соотношением (2.18). Из выражения (2.18) имеем:

$$a(S) = \sqrt{\frac{2}{5}} \cdot S, \quad a'(S) = \frac{1}{\sqrt{10} \cdot S}. \quad (2.26)$$

Тогда из (2.25) и (2.26) плотность распределения случайной величины  $S$  равна:

$$\xi(S) = g(a(S)) \cdot a'(S) = \frac{\left( a_y - \sqrt{\frac{2}{5}} S \right)^{1,75}}{a_y^{2,75}} e^{-\frac{2S}{5a_{kr}^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{10}S} \times$$

$$\times \left\{ 2,75 + 2 \sqrt{\frac{2}{5}} \frac{S^2}{a_{kr}^2} \left( a_y - \sqrt{\frac{2}{5}} S \right) \right\}. \quad (2.27)$$

Используя равенство (2.27), несложно найти математическое ожидание величины  $S$ :

$$S(y) = M(S) = \int_0^{2,5a_y^2(\alpha)} S \cdot g(S) dS =$$

$$= \frac{1}{a_y^{2,75}} \left( \frac{2,75}{\sqrt{10}} \cdot \int_0^{2,5a_y^2} \sqrt{S} \left( a_y - \sqrt{\frac{2}{5}} \cdot S \right)^{1,75} e^{-\frac{2S}{5a_{kr}^2}} dS + \right.$$

$$+ \frac{2}{\sqrt{10}} \cdot \sqrt{\frac{2}{5}} \cdot \frac{1}{a_{kr}^2} \cdot \int_0^{2,5a_y^2} S \cdot \left( a_y - \sqrt{\frac{2}{5}} \cdot S \right)^{2,75} e^{-\frac{2S}{5a_{kr}^2}} dS. \quad (2.28)$$

Введем обозначение:

$$t = \sqrt{\frac{2}{5}} \frac{\sqrt{S}}{a_y}. \quad (2.29)$$

Из (2.29) следует:

$$S = \frac{5}{2} a_y^2 \cdot t^2; \quad dS = 5 \cdot a_y^2 \cdot t \cdot dt,$$

откуда выражение (2.28) переписывается в виде:

$$S(y) = 0,625 \cdot a_y^2 \int_0^1 t^2 (1-t)^{\frac{7}{4}} e^{-\frac{a_y^2}{a_{kr}^2} t^2} \left( 11 + 8t \frac{a_y^2}{a_{kr}^2} (1-t) \right) dt. \quad (2.30)$$

Введем безразмерную величину:

$$x = \frac{a_y}{a_{kr}}. \quad (2.31)$$

Тогда, подставив в (2.30) выражение (2.31), получим новую функцию, зависящую от величины  $x$ :

$$S_x(x) = 0,625 \cdot x^2 a_{kr}^2 \cdot \left( \int_0^1 11 \cdot t^2 (1-t)^{\frac{7}{4}} \cdot e^{-x^2 t^2} dt + \right. \\ \left. + x^2 \int_0^1 8t^3 (1-t)^{\frac{11}{4}} \cdot e^{-x^2 t^2} dt \right). \quad (2.32)$$

Введем обозначение:

$$W(x) = \int_0^1 t^2 (1-t)^{\frac{7}{4}} e^{-x^2 t^2} \left( 11 + 8 \cdot t \cdot x^2 (1-t) \right) dt. \quad (2.33)$$

Функцию  $W = W(x)$  можно аппроксимировать выражением вида:

$$W_a(x) = 0,497 \cdot e^{-0,306 \cdot x}. \quad (2.34)$$

На рис. 2.5 показаны графики функций  $W = W(x)$  и  $W_a = W_a(x)$ . Как видно из рис. 2.5, абсолютная погрешность аппроксимации не превышает 5%. Более точную оценку погрешности дает определение среднего квадратического отклонения фактических и расчетных значений случайной величины.

На рис.2.6 приведен график функции средней квадратичной погрешности:

$$W_p(x_0) = \int_0^{x_0} |W(x) - W_a(x)|^2 dx,$$

в зависимости от длины рассматриваемого интервала  $[0, x_0]$ .

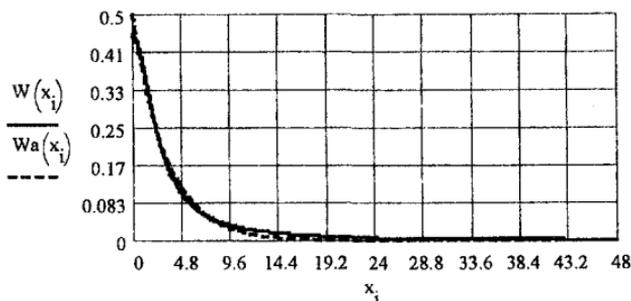


Рис. 2.5 Графики функций  $W = W(x)$  и  $W_a = W_a(x)$

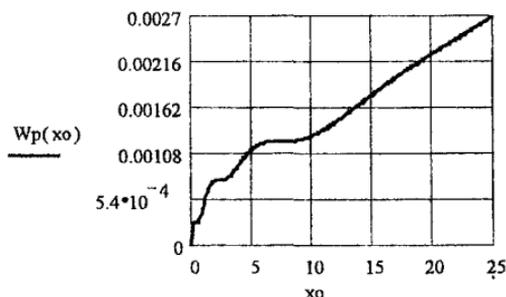


Рис. 2.6. График среднеквадратичной погрешности аппроксимации  $W_p(x_0)$

Из графика 2.6 видно, что средняя квадратическая погрешность чрезвычайно мала. Следовательно, принятую аппроксимацию следует признать удовлетворительной.

Таким образом, выражение (2.32) можно переписать в виде:

$$S_x(x) = 0,625 \cdot x^2 \cdot a_{kr}^2 \cdot 0,497 \cdot e^{-0,306 \cdot x} = 0,31 \cdot a_{kr}^2 \cdot x^2 \cdot e^{-0,306 \cdot x} \quad (2.35)$$

С учетом (2.35) выражение (4.30) примет вид:

$$S(y, \alpha, b) = 0,625 \cdot a_y^2(\alpha, b) \cdot W\left(\frac{a_y(\alpha, b)}{a_{kr}}\right) \quad (2.36)$$

Выражение (2.35) можно представить в более удобной для проведения расчетов форме:

$$S_a(y, \alpha, b) = 0,31 \cdot a_y^2(\alpha, b) \cdot e^{-0,306 \cdot \frac{a_y(\alpha, b)}{a_{kr}}} \quad (2.37)$$

3). Определим скорость движения бруска по заготовке  $v$ . Если обозначить через  $v_b$  скорость движения бруска по заготовке вдоль обрабатываемой поверхности по оси  $OY$ , а скорость вращения заготовки, как уже упоминалось, равна  $v_z$ , то скорость движения бруска по обрабатываемой поверхности можно определить из выражения:

$$v = \sqrt{v_z^2 + v_b^2}. \quad (2.38)$$

Скорость движения бруска вдоль обрабатываемой поверхности, очевидно, можно найти из выражения:

$$v_b = \frac{dy_c^\alpha}{d\tau}. \quad (2.39)$$

Тогда из выражения (2.1) получаем:

$$v_b(\tau) = H\pi n_b \cos(2\pi n_b \tau). \quad (2.40)$$

Кроме того, из выражения (2.1) выразим  $\tau$  через  $y_c^\alpha$ :

$$\tau(y_c^\alpha) = \frac{1}{2\pi n_b} \arcsin\left(\frac{2y_c^\alpha}{H}\right). \quad (2.41)$$

Подставляя (2.41) в (2.40), получим зависимость продольной скорости бруска вдоль заготовки от положения бруска на заготовке:

$$v_b(\alpha) = H\pi n_b \cos\left(\arcsin\left(\frac{2y_c^\alpha}{H}\right)\right) = H\pi n_b \sqrt{1 - \left(\frac{2y_c^\alpha}{H}\right)^2}. \quad (2.42)$$

Из выражений (2.42) и (2.38) получим:

$$v(\alpha) = \sqrt{v_z^2 + (H\pi n_b)^2 \left(1 - \left(\frac{2y_c^\alpha}{H}\right)^2\right)}$$

или с учетом (2.4):

$$v(\alpha) = \sqrt{v_z^2 + (H\pi n_b)^2 \left(1 - \frac{\left(2\left(R + \sqrt{\rho^2 - \frac{b^2}{4}}\right) \sin \alpha\right)^2}{H}\right)}. \quad (2.43)$$

Выражение (2.43) определяет скорость бруска относительно заготовки в зависимости от угла поворота бруска. Определим влияние угла поворота бруска на его скорость относительно заготовки. Для этого введем обозначения:

$$\lambda = \frac{H\pi n_b}{v_z}; \quad h = \frac{2 \left( R + \sqrt{\rho^2 - \left( \frac{b}{2} \right)^2} \right)}{H} \quad (2.44)$$

Тогда выражение для определения скорости бруска (4.43) можно переписать в виде:

$$v(\alpha) = v_z \sqrt{1 + \lambda^2 (1 - (h \cdot \sin \alpha)^2)}.$$

Или, если обозначить:

$$\mu = \sqrt{1 + \lambda^2 (1 - (h \cdot \sin \alpha)^2)}, \quad (2.45)$$

то

$$v_b(\alpha, b) = v_z \cdot \mu.$$

Дадим оценку величин  $\lambda$  и  $h$ . Как известно,

$$v_z = \pi \cdot 2 \cdot r \cdot n_z,$$

где  $n_z$  - частота вращения заготовки.

Тогда

$$\lambda = \frac{H\pi n_b}{2\pi \cdot r \cdot n_z} = \frac{H}{2r} \cdot \frac{n_b}{n_z} \quad (2.46)$$

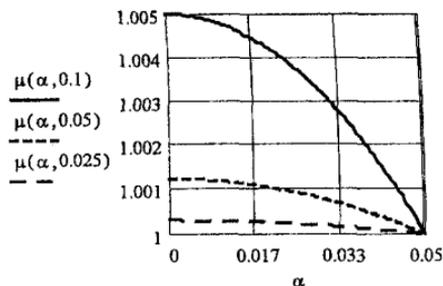
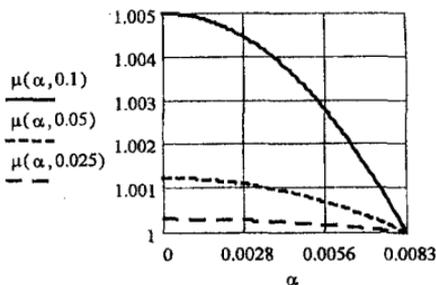
На практике обычно величина  $H$  значительно меньше, чем диаметр вращения заготовки  $D = 2r$ . Кроме того, частота вращения заготовки  $n_z$  во много раз превышает частоту осцилляции бруска. Следовательно,  $\lambda \ll 1$  и его возможное максимальное значение, как следует из практических соображений, не превышает  $\lambda = 0,1$ .

Как следует из (2.44), величина  $-1 \leq h \leq 1$ . Тогда из определения величины  $\mu$  (2.45) следует, что диапазон ее возможных значений лежит в интервале  $\left[ 1, \sqrt{1 + \lambda^2} \right]$ . Причем, минимальное и максимальное значение  $\mu$  зависит только от изменения угла осцилляции, диапазон которого зависит от значения  $h$ .

На рис.2.7 приведены зависимости величины  $\mu$  от угла поворота бруска при различных значениях  $\lambda = 0,025$ ,  $\lambda = 0,5$ ,  $\lambda = 0,1$ .

Как видно из графиков, с увеличением  $\lambda$  увеличивается диапазон изменения величины  $\mu$ . Таким образом, для случая, когда  $\lambda$  принимает максимальное свое значение  $\lambda = 0,1$  разница в скорости при  $\alpha = 0$  и мак-

симальном углом отклонения  $\alpha = \arcsin\left(\frac{1}{h}\right)$  составляет всего 0,5%. При других значениях  $\lambda$  эта разница еще меньше. Таким образом, зависимость величины  $\mu$  от  $\alpha$  очень слабая.



а

б

Рис.2.7. Зависимость величины  $\mu$  от угла поворота бруска при различных значениях  $\lambda = 0,025$ ,  $\lambda = 0,5$ ,  $\lambda = 0,1$ : а-  $h = 120$ ; б-  $h = 20$

Поэтому примем среднее значение  $\mu$ :

$$\mu = \frac{1 + \sqrt{1 + \lambda^2}}{2},$$

а, следовательно, скорость бруска по поверхности заготовки примем равной:

$$v = v_z \cdot \frac{1 + \sqrt{1 + \lambda^2}}{2}, \quad (2.47)$$

где  $\lambda$  определяется в выражении (2.44) и не превышает значения 0,1.

5) Определим время прохождения элементарного участка бруска  $ds$  через точку заготовки.

Подставим выражение (2.4) в равенство (2.1):

$$\left( R + \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} \right) \sin \alpha = \frac{H}{2} \sin(2\pi n_b \tau),$$

откуда

$$\frac{1}{2\pi n_b} \arcsin \left\{ \frac{2}{H} \left( R + \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} \right) \sin \alpha \right\} = \tau; \quad (2.48)$$

$$d\tau = \frac{1}{H\pi n_b} \cdot \frac{\left( R + \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} \right) \cos \alpha}{\sqrt{1 - \left\{ \frac{2}{H} \left( R + \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} \right) \sin \alpha \right\}^2}} d\alpha. \quad (2.49)$$

Обозначим:

$$\tau'(\alpha, b) = \frac{1}{H\pi b} \cdot \frac{\left( R + \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} \right) \cos \alpha}{\sqrt{1 - \left\{ \frac{2}{H} \left( R + \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} \right) \sin \alpha \right\}^2}}. \quad (2.50)$$

Очевидно, что величина  $\tau'(\alpha, b)$ , как следует из (2.49), обозначает скорость изменения времени поворота бруска на угол  $d\alpha$  в точке  $\alpha$ .

Тогда, подставляя выражения (2.14), (2.15) (2.37), (2.47) и (2.49) с учетом (2.50) в выражение (2.13), получим объем стружки, снимаемый элементарным участком бруска (являющимся окрестностью некоторой фиксированной точки на бруске  $y$ ) при его повороте на угол  $d\alpha$ :

$$dV = S(y, \alpha, b) \cdot z_0(y, \alpha, b) \cdot v_z \frac{1 + \sqrt{1 + \lambda^2}}{2} \cdot 2 \cdot r \cdot \arcsin\left(\frac{c}{2r}\right) \times \tau'(\alpha, b) dy d\alpha. \quad (2.51)$$

Для определения съема в некоторой точке заготовки  $y_0$  при прохождении этой точки бруском, заметим, что с этой точкой в каждый момент времени вступает в контакт точка бруска, координата которой вычисляется из выражения:

$$y = y_0 - y_c^\alpha,$$

и, как видно, она зависит от положения центра бруска и точки  $y_0$ . Поэтому при определении съема бруском в данной точке необходимо учитывать положение центра бруска, который, в свою очередь, зависит от угла поворота бруска. Координаты центра бруска в момент вступления в контакт и в момент выхода из контакта с данной точкой заготовки в случае, когда брусок не выходит за границу обрабатываемой поверхности (это происходит, если обрабатываемая точка  $y_0 \leq \frac{H}{2} - \frac{b}{2}$ ), соответственно равны  $y_0 - \frac{b}{2}$ , и  $y_0 + \frac{b}{2}$ . В случае, если точка  $\frac{H}{2} - \frac{b}{2} < y_0 \leq \frac{H}{2}$ , то координаты центра бруска при взаимодействии с данной точкой будут меняться в пределах  $\left[ y_0 - \frac{b}{2}; \frac{H}{2} \right]$ .

Тогда из равенства (2.4) можно определить углы  $\alpha_1(y_0, b)$  и  $\alpha_2(y_0, b)$  поворота бруска соответственно при вступлении его в контакт с данной точкой заготовки и при выходе бруска из контакта с этой точкой (в

случае, если  $y_0 \leq \frac{H}{2} - \frac{b}{2}$ :

$$\alpha_1(y_0, b) = \arcsin \left( \frac{y_0 - \frac{b}{2}}{R + \sqrt{\rho^2 - \frac{b^2}{4}}} \right); \quad (2.52)$$

$$\alpha_2(y_0, b) = \arcsin \left( \frac{y_0 + \frac{b}{2}}{R + \sqrt{\rho^2 - \frac{b^2}{4}}} \right).$$

В случае, если  $\frac{H}{2} - \frac{b}{2} < y_0 \leq \frac{H}{2}$  брусок, войдя в контакт с данной точкой, не выйдет из контакта при движении к краю обрабатываемой поверхности. В этом случае брусок будет поворачиваться до тех пор, пока координата центра бруска не станет равной  $\frac{H}{2}$ , а следовательно, брусок будет поворачиваться, как следует из (2.4), до тех пор, пока угол поворота  $\alpha_2(y_0, b)$  не достигнет величины:

$$\alpha_2(y_0, b) = \arcsin \left( \frac{H}{2 \left( R + \sqrt{\rho^2 - \frac{b^2}{4}} \right)} \right). \quad (2.52')$$

Объем снимаемой стружки при прохождении бруском окрестности  $dy$  точки  $y_0$  заготовки определим интегрированием выражения (2.51) по переменной  $\alpha$  в пределах от начального до конечного значений угла контакта бруска с этой точкой:

$$V(y_0) = v_z \frac{1 + \sqrt{1 + \lambda^2}}{2} \cdot 2 \cdot r \cdot \arcsin \left( \frac{c}{2r} \right) \cdot dy \times \int_{\alpha_1(y_0, b)}^{\alpha_2(y_0, b)} S(y_0, \alpha, b) \cdot z_0(y_0, \alpha, b) \tau'(\alpha, b) d\alpha. \quad (2.53)$$

Для определения линейного съема  $q(y_0)$  в точке  $y_0$  будем руководствоваться следующими соображениями. Так как до обработки этой точки бруском радиус вращения заготовки в этой точке равнялся  $r$ , то после прохождения бруском этой точки, радиус вращения в окрестности данной

точки станет равным  $r + q(y_0)$ . Таким образом, площадь сечения поверхности  $S_{y_0}(y_0)$ , удаляемую в точке  $y_0$  за один проход бруска, можно определить из выражения:

$$S_{y_0}(y_0) = \pi \left( (r + q(y_0))^2 - r^2 \right) = \pi r^2 \left( \frac{(r + q(y_0))^2}{r^2} - 1 \right) = \pi r^2 \left( \frac{2q(y_0)}{r} + \frac{q(y_0)^2}{r^2} \right).$$

Так как

$$\frac{q(y_0)^2}{r^2} \approx 0,$$

то

$$S_{y_0}(y_0) = 2\pi q(y_0)r,$$

откуда

$$q(y_0) = \frac{S_{y_0}(y_0)}{2\pi r}. \quad (2.54)$$

С другой стороны, величину  $S_{y_0}(y_0)$  можно определить из выражения (2.53):

$$S_{y_0}(y_0) = \frac{V(y_0)}{dy}.$$

Откуда, с учетом (2.54), получаем:

$$q(y_0) = \frac{V(y_0)}{2\pi r dy}. \quad (2.55)$$

Таким образом, с учетом (2.53) и (2.55) имеем выражение для определения линейного съема в точке  $y_0$ :

$$q(y_0) = v_z \frac{1 + \sqrt{1 + \lambda^2}}{2} \cdot 2 \cdot r \cdot \arcsin\left(\frac{c}{2r}\right) \cdot \frac{1}{2\pi r} \times \int_{\alpha_1(y_0, b)}^{\alpha_2(y_0, b)} S(y_0, \alpha, b) \cdot z_0(y_0, \alpha, b) \tau'(\alpha, b) d\alpha$$

или, после сокращений:

$$q(y_0) = \frac{v_z}{\pi} \frac{1 + \sqrt{1 + \lambda^2}}{2} \cdot \arcsin\left(\frac{c}{2r}\right) \times \int_{\alpha_1(y_0, b)}^{\alpha_2(y_0, b)} S(y_0, \alpha, b) z_0(y_0, \alpha, b) \tau'(\alpha, b) d\alpha. \quad (2.56)$$

Преобразуем интеграл в выражении (2.56):

$$\int_{\alpha_1(y_0, b)}^{\alpha_2(y_0, b)} S(y_0, \alpha, b) \cdot z_0(y_0, \alpha, b) \tau'(\alpha, b) d\alpha =$$

$$= 0,625 \cdot 0,24 \cdot \frac{z_r}{d_0^{2,75}} \cdot \frac{R + \sqrt{\rho^2 - \frac{b^2}{4}}}{H\pi n_b} \times$$

$$\times \int_{\alpha_1(y_0, b)}^{\alpha_2(y_0, b)} a_y^2 W_a \left( \frac{a_y}{a_{kr}} \right) \cdot a_y^{2,75} \frac{\cos \alpha}{\sqrt{1 - \left\{ \frac{2}{H} \left( R + \sqrt{\rho^2 - \frac{b^2}{4}} \right) \sin \alpha \right\}^2}} d\alpha$$

Для удобства в равенстве (2.57) обозначим:

$$c_0 = R + \sqrt{\rho^2 - \frac{b^2}{4}}; \quad \omega = 0,15 \cdot \frac{z_r}{d_0^{2,75}} \cdot \frac{1}{H\pi n_b} \quad (2.58)$$

Тогда

$$\int_{\alpha_1(y_0, b)}^{\alpha_2(y_0, b)} S(y_0, \alpha, b) \cdot z_0(y_0, \alpha, b) \tau'(\alpha, b) d\alpha =$$

$$= \omega \cdot c_0 \cdot \int_{\alpha_1(y_0, b)}^{\alpha_2(y_0, b)} a_y^{4,75} W_a \left( \frac{a_y}{a_{kr}} \right) \cdot \frac{\cos \alpha}{\sqrt{1 - \left\{ \frac{2}{H} c_0 \cdot \sin \alpha \right\}^2}} d\alpha =$$

$$= 0,497 \omega c_0 \int_{\alpha_1(y_0, b)}^{\alpha_2(y_0, b)} \left\{ \left( \frac{b^2}{8\rho} - \frac{(y_0 - c_0 \sin \alpha)^2}{2\rho} \right)^{4,75} e^{-\frac{0,306}{a_{kr}} \left( \frac{b^2}{8\rho} - \frac{(y_0 - c_0 \sin \alpha)^2}{2\rho} \right)} \times \right.$$

$$\left. \times \frac{\cos \alpha}{\sqrt{1 - \left\{ \frac{2}{H} c_0 \cdot \sin \alpha \right\}^2}} \right\} d\alpha.$$

Сделаем замену переменной:

$$z = y_0 - c_0 \sin \alpha; \quad \alpha = \arcsin \left( \frac{y_0 - z}{c_0} \right); \quad d\alpha = \frac{dz}{c_0 \sqrt{1 - \left( \frac{y_0 - z}{c_0} \right)^2}},$$

и с учетом, что

$$\cos\left(\arcsin\left(\frac{y_0 - z}{c_0}\right)\right) = \sqrt{1 - \left(\frac{y_0 - z}{c_0}\right)^2},$$

в случае, если обрабатываемая точка имеет координату  $y_0 \leq \frac{H}{2} - \frac{b}{2}$ , получим:

$\alpha_2(y_0, b)$

$$\int S(y_0, \alpha, b) \cdot z_0(y_0, \alpha, b) \tau'(\alpha, b) d\alpha =$$

$\alpha_1(y_0, b)$

$$= 0,497\omega \cdot \int_{\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \left(\frac{b^2}{8\rho} - \frac{z^2}{2\rho}\right)^{4,75} e^{-\frac{0,306}{a_{kr}}\left(\frac{b^2}{8\rho} - \frac{z^2}{2\rho}\right)} \frac{dz}{\sqrt{1 - \left\{\frac{2}{H}(y_0 - z)\right\}^2}} =$$

$$= 0,497\omega \left(\frac{b^2}{8\rho}\right)^{4,75} \int_{\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \left(1 - \frac{4z^2}{b^2}\right)^{4,75} e^{-\frac{0,306b^2}{a_{kr}8\rho}\left(1 - \frac{4z^2}{b^2}\right)} \frac{dz}{\sqrt{1 - \left\{\frac{2}{H}(y_0 - z)\right\}^2}}.$$

В случае, если  $\frac{H}{2} - \frac{b}{2} \leq y_0 \leq \frac{H}{2}$ , получим:

$\alpha_2(y_0, b)$

$$\int S(y_0, \alpha, b) \cdot z_0(y_0, \alpha, b) \tau'(\alpha, b) d\alpha =$$

$\alpha_1(y_0, b)$

$$= 0,497\omega \left(\frac{b^2}{8\rho}\right)^{4,75} \int_{y_0 - \frac{H}{2}}^{\frac{b}{2}} \left(1 - \frac{4z^2}{b^2}\right)^{4,75} e^{-\frac{0,306b^2}{a_{kr}8\rho}\left(1 - \frac{4z^2}{b^2}\right)} \frac{dz}{\sqrt{1 - \left\{\frac{2}{H}(y_0 - z)\right\}^2}},$$

Сделаем еще одну замену:

$$t = \frac{4z^2}{b^2}; \quad z = \pm \frac{b}{2} t^{\frac{1}{2}}; \quad dz = \pm \frac{b}{4} t^{-\frac{1}{2}} dt$$

и введем обозначение:

$$\delta = \frac{0,306 b^2}{a_{kr} 8\rho}. \quad (2.59)$$

Тогда в случае, если  $y_0 \leq \frac{H}{2} - \frac{b}{2}$ :

$\alpha_2(y_0, b)$

$$\int_{\alpha_1(y_0, b)} S(y_0, \alpha, b) \cdot z_0(y_0, \alpha, b) \tau'(\alpha, b) d\alpha =$$

$$= 0,497 \cdot \omega \cdot \left(\frac{b^2}{8\rho}\right)^{4,75} \cdot \int_{\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \left(1 - \frac{4z^2}{b^2}\right)^{4,75} e^{-\frac{0,306b^2}{a_{kr} 8\rho} \left(1 - \frac{4z^2}{b^2}\right)} \frac{dz}{\sqrt{1 - \left\{\frac{2}{H}(y_0 - z)\right\}^2}} =$$

$$= 0,497 \cdot \omega \cdot \left(\frac{b^2}{8\rho}\right)^{4,75} \cdot \left[ \int_{\frac{b}{2}}^0 \left(1 - \frac{4z^2}{b^2}\right)^{4,75} e^{-\frac{0,306b^2}{a_{kr} 8\rho} \left(1 - \frac{4z^2}{b^2}\right)} \frac{dz}{\sqrt{1 - \left\{\frac{2}{H}(y_0 - z)\right\}^2}} + \right.$$

$$\left. + \int_0^{\frac{b}{2}} \left(1 - \frac{4z^2}{b^2}\right)^{4,75} e^{-\frac{0,306b^2}{a_{kr} 8\rho} \left(1 - \frac{4z^2}{b^2}\right)} \frac{dz}{\sqrt{1 - \left\{\frac{2}{H}(y_0 - z)\right\}^2}} \right] =$$

$$= 0,497 \omega \cdot \left(\frac{b^2}{8\rho}\right)^{4,75} \cdot \frac{b}{4} \cdot \left[ - \int_1^0 (1-t)^{4,75} e^{-\delta(1-t)} t^{\frac{1}{2}} \frac{dt}{\sqrt{1 - \left\{\frac{2}{H}\left(y_0 + \frac{b}{2}\sqrt{t}\right)\right\}^2}} + \right.$$

$$\left. + \int_0^1 (1-t)^{4,75} \cdot e^{-\delta(1-t)} \cdot t^{\frac{1}{2}} \frac{dt}{\sqrt{1 - \left\{\frac{2}{H}\left(y_0 - \frac{b}{2}\sqrt{t}\right)\right\}^2}} \right] =$$

$$= 0,497 \omega \cdot \left(\frac{b^2}{8\rho}\right)^{4,75} \cdot \frac{b}{4} \cdot e^{-\delta} \times \left[ \int_0^1 (1-t)^{4,75} \cdot e^{\delta t} \cdot t^{\frac{1}{2}} \frac{dt}{\sqrt{1 - \left\{\frac{2}{H}\left(y_0 + \frac{b}{2}\sqrt{t}\right)\right\}^2}} + \right.$$

$$+ \int_0^1 (1-t)^{4,75} \cdot e^{\delta t} \cdot t^{-\frac{1}{2}} \frac{dt}{\sqrt{1 - \left\{ \frac{2}{H} \left( y_0 - \frac{b}{2} \sqrt{t} \right) \right\}^2}} \right)$$

При  $\frac{H}{2} - \frac{b}{2} \leq y_0 \leq \frac{H}{2}$ :

$$\int_{\alpha_1(y_0, b)}^{\alpha_2(y_0, b)} S(y_0, \alpha, b) \cdot z_0(y_0, \alpha, b) \tau'(\alpha, b) d\alpha = 0,497 \omega \cdot \left( \frac{b^2}{8\rho} \right)^{4,75} \frac{b}{4} \cdot e^{-\delta} \times$$

$$\times \left( \int_0^{\frac{4}{b^2} \left( y_0 - \frac{H}{2} \right)^2} (1-t)^{4,75} \cdot e^{\delta t} \cdot t^{-\frac{1}{2}} \frac{dt}{\sqrt{1 - \left\{ \frac{2}{H} \left( y_0 + \frac{b}{2} \sqrt{t} \right) \right\}^2}} + \right.$$

$$\left. + \int_0^1 (1-t)^{4,75} \cdot e^{\delta t} \cdot t^{-\frac{1}{2}} \frac{dt}{\sqrt{1 - \left\{ \frac{2}{H} \left( y_0 - \frac{b}{2} \sqrt{t} \right) \right\}^2}} \right)$$

Можно заметить, что в двух последних выражениях встречается один и тот же интеграл, который в дальнейшем будет обозначаться:

$$L^{(-)}(y_0, b) = \int_0^1 (1-t)^{4,75} \cdot e^{\delta t} \cdot t^{-\frac{1}{2}} \frac{dt}{\sqrt{1 - \left\{ \frac{2}{H} \left( y_0 - \frac{b}{2} \sqrt{t} \right) \right\}^2}}$$

Кроме того, в этих выражениях встречаются интегралы, которые имеют одинаковые подынтегральные функции и отличаются только верхним пределом интегрирования, который зависит от точки  $y_0$ . Поэтому для этих интегралов мы также сможем ввести общее обозначение:

$$L^{(+)}(y_0, b) = \int_0^1 (1-t)^{4,75} \cdot e^{\delta t} \cdot t^{-\frac{1}{2}} \frac{dt}{\sqrt{1 - \left\{ \frac{2}{H} \left( y_0 + \frac{b}{2} \sqrt{t} \right) \right\}^2}},$$

если  $y_0 \leq \frac{H}{2} - \frac{b}{2}$

$$L^{(+)}(y_0, b) = \int_0^{\frac{4}{b^2} \left( y_0 - \frac{H}{2} \right)^2} (1-t)^{4,75} \cdot e^{\delta t} \cdot t^{-\frac{1}{2}} \frac{dt}{\sqrt{1 - \left\{ \frac{2}{H} \left( y_0 + \frac{b}{2} \sqrt{t} \right) \right\}^2}}, \quad (2.60)$$

если  $\frac{H}{2} - \frac{b}{2} < y_0 \leq \frac{H}{2}$ .

Тогда выражение (2.53) переписывается в виде:

$$V(y_0) = 0,037275 \cdot v_z \frac{1 + \sqrt{1 + \lambda^2}}{2} \cdot r \cdot \arcsin\left(\frac{c}{2r}\right) \cdot dy \cdot \frac{z_r}{d_0^{2,75} \cdot H \pi n_b} \times \quad (2.61)$$

$$\times \left(\frac{b^2}{8\rho}\right)^{4,75} b \cdot e^{\frac{0,306 b^2}{a_{kr} 8\rho}} \cdot (L^{(+)}(y_0, b) + L^{(-)}(y_0, b)).$$

Линейный съем в точке  $y_0$  за один проход бруска через эту точку с учетом выражений (2.56) и (2.61) будет определяться равенством:

$$q(y_0) = 0,0186375 \cdot v_z \frac{1 + \sqrt{1 + \lambda^2}}{2} \cdot \arcsin\left(\frac{c}{2r}\right) \cdot \frac{z_r}{d_0^{2,75} \cdot H \pi^2 n_b} \times \quad (2.62)$$

$$\times \left(\frac{b^2}{8\rho}\right)^{4,75} b \cdot e^{\frac{0,306 b^2}{a_{kr} 8\rho}} \cdot (L^{(+)}(y_0, b) + L^{(-)}(y_0, b)).$$

Значение длины контакта бруска с заготовкой  $b$  в выражениях (2.61) и (2.62) зависит от силы  $P$  прижима, под действием которой они взаимодействуют между собой. Как известно [91], сила прижима бруска  $P$  связана с нормальной силой резания следующим соотношением:

$$P = P_r + P_S, \quad (2.63)$$

где  $P_r$  - нормальная сила резания;

$P_S$  - давление стружки и шлама, которые остаются между зернами, на заготовку.

Как известно, величина  $P_S$  связана с нормальной силой резания  $P_r$  соотношением [103]:

$$P_S = P_r \sqrt[3]{\left(\frac{\mathfrak{G}_S}{\mathfrak{G} - \mathfrak{G}_S}\right)^2}, \quad (2.64)$$

где  $\mathfrak{G}_S$  - объем шлама в межзерновом пространстве бруска;

$\mathfrak{G}$  - общий межзерновой объем бруска, который можно определить из выражения [91]:

$$\vartheta = S_{\epsilon} \cdot d_0 \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{K_S}} - \frac{1}{2} K_S \right).$$

Так как площадь контакта бруска с заготовкой  $S_{\epsilon}$  равна:

$$S_{\epsilon} = 2 \cdot r \cdot \arcsin\left(\frac{c}{2r}\right) \cdot b, \quad (2.65)$$

то, подставляя равенство (2.65) в предыдущее выражение, имеем:

$$\vartheta(b) = 2 \cdot r \cdot b \cdot \arcsin\left(\frac{c}{2r}\right) \cdot d_0 \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{K_S}} - \frac{1}{2} K_S \right). \quad (2.66)$$

Определим нормальную силу резания  $P_r$ . Как известно [91], нормальную силу резания одного зерна можно определить из выражения:

$$P_r = 51 \tau_{\text{сдв}} a^2 (1 + \xi) = 20,4 \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot S \cdot (1 + \xi), \quad (2.67)$$

где  $S$  - математическое ожидание площади сечения стружки.

Подставляя в (2.67) выражение (2.37), получим:

$$P_r(y, \alpha, b) = 20,4 \cdot S(y, \alpha, b) \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot (1 + \xi). \quad (2.68)$$

На участке  $ds$  бруска в окрестности точки  $y$  сила резания всех зерен равна:

$$dP_r = P_r(y, \alpha, b) \cdot z_0(y, \alpha, b) \cdot ds = P_r(y, \alpha, b) \cdot z_0(y, \alpha, b) \times \\ \times 2 \cdot r \cdot \arcsin\left(\frac{c}{2r}\right) dy$$

или, с учетом (2.68):

$$dP_r = 20,4 \cdot S(y, \alpha, b) \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot (1 + \xi) \cdot z_0(y, \alpha, b) \cdot 2r \arcsin\left(\frac{c}{2r}\right) dy.$$

Тогда сила резания всех зерен по всей площадке контакта бруска с заготовкой:

$$P_r(b) = 20,4 \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot (1 + \xi) \cdot 2 \cdot r \arcsin\left(\frac{c}{2r}\right) \cdot \int_{y_c^{\alpha} - \frac{b}{2}}^{y_c^{\alpha} + \frac{b}{2}} S(y, \alpha, b) \cdot z_0(y, \alpha, b) dy \quad (2.69)$$

Преобразуем интеграл, стоящий в правой части (2.69):

$$\int_{y_c^{\alpha} - \frac{b}{2}}^{y_c^{\alpha} + \frac{b}{2}} S(y, \alpha, b) \cdot z_0(y, \alpha, b) dy = 0,0746 \frac{z_r}{d_0^{2,75}} \int_{y_c^{\alpha} - \frac{b}{2}}^{y_c^{\alpha} + \frac{b}{2}} a_y^{4,75} e^{-\frac{0,306}{a_{kr}} a_y} dy =$$

$$= 0,0746 \frac{z_r}{d_0^{2,75}} \int_{y_c^\alpha - \frac{b}{2}}^{y_c^\alpha + \frac{b}{2}} \left( \frac{b^2}{8\rho} - \frac{(y - y_c^\alpha)^2}{2\rho} \right)^{4,75} e^{-\frac{0,306}{a_{kr}} \left( \frac{b^2}{8\rho} - \frac{(y - y_c^\alpha)^2}{2\rho} \right)} dy.$$

Делаем замену переменной:

$$z = y - y_c^\alpha.$$

Тогда

$$\begin{aligned} & \int_{y_c^\alpha - \frac{b}{2}}^{y_c^\alpha + \frac{b}{2}} S(y, \alpha, b) \cdot z_0(y, \alpha, b) dy = \\ & = 0,0746 \frac{z_r}{d_0^{2,75}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \left( \frac{b^2}{8\rho} - \frac{z^2}{2\rho} \right)^{4,75} e^{-\frac{0,306}{a_{kr}} \left( \frac{b^2}{8\rho} - \frac{z^2}{2\rho} \right)} dz = \\ & = 2 \cdot 0,0746 \frac{z_r}{d_0^{2,75}} \left( \frac{b^2}{8\rho} \right)^{4,75} \int_0^{\frac{b}{2}} \left( 1 - \frac{4z^2}{b^2} \right)^{4,75} e^{-\frac{0,306 b^2}{a_{kr} 8\rho} \left( 1 - \frac{4z^2}{b^2} \right)} dz. \end{aligned}$$

Используем еще одну замену:

$$t = \frac{4z^2}{b^2}; \quad z = \frac{b}{2} \sqrt{t}; \quad dz = \frac{b}{4} t^{-\frac{1}{2}} dt.$$

Получаем:

$$\begin{aligned} & \int_{y_c^\alpha - \frac{b}{2}}^{y_c^\alpha + \frac{b}{2}} S(y, \alpha, b) \cdot z_0(y, \alpha, b) dy = \\ & = 0,0746 \frac{z_r}{d_0^{2,75}} \left( \frac{b}{2} \right) \cdot \left( \frac{b^2}{8\rho} \right)^{4,75} \int_0^1 (1-t)^{4,75} e^{-\frac{0,306 b^2}{a_{kr} 8\rho} (1-t)} \frac{1}{t^{\frac{1}{2}}} dt = \\ & = 0,0746 \frac{z_r}{d_0^{2,75}} \left( \frac{b}{2} \right) \cdot \left( \frac{b^2}{8\rho} \right)^{4,75} e^{-\frac{0,306 b^2}{a_{kr} 8\rho}} \int_0^1 (1-t)^{4,75} e^{\frac{0,306 b^2}{a_{kr} 8\rho} t} \frac{1}{t^{\frac{1}{2}}} dt. \end{aligned}$$

Обозначим:

$$L_1(b) = \int_0^1 (1-t)^{4,75} e^{\frac{0,306 b^2}{a_{kr} 8\rho} t} \frac{1}{t^{\frac{1}{2}}} dt.$$

Тогда (2.69) примет вид:

$$P_r(b) = 0,0746 \cdot 20,4 \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot (1 + \xi) \cdot b \cdot r \arcsin\left(\frac{c}{2r}\right) \cdot \frac{z_r}{d_0^{2,75}} \left(\frac{b^2}{8\rho}\right)^{4,75} \times \quad (2.70)$$

$$\times e^{\frac{0,306b^2}{a_{kr} 8\rho}} \cdot L_1(b).$$

Подставим выражение (2.70) в (2.62). Тогда получим связь между линейным съемом в точке  $y_0$  и нормальной силой резания:

$$q(y_0) = v_z \frac{1 + \sqrt{1 + \lambda^2}}{2} \cdot \frac{P_r(b)}{81,6 \cdot H \cdot \pi^2 \cdot n_b \cdot \tau_{\text{сдв}} (1 + \xi) \cdot r} \cdot L(y_0, b), \quad (2.71)$$

где

$$L(y_0, b) = \frac{L^{(+)}(y_0, b) + L^{(-)}(y_0, b)}{L_1(b)}. \quad (2.72)$$

Выражения (2.62) и (2.71) были получены из предположения, что величина  $a_m$ , а следовательно, и  $b$  - постоянные величины. Это возможно лишь в том случае, если при определении величины линейного съема в каждой точке поверхности не будет учтена величина засаливаемости бруска, т.е. если считать, что объем шлама в межзерновом пространстве бруска равен нулю. Как следует из выражений (2.63) и (2.64), величину засаливаемости бруска можно определить из выражения:

$$\vartheta_S(b) = \vartheta(b) \cdot \frac{\left(\frac{P}{P_r(b)} - 1\right)^{\frac{3}{2}}}{1 + \left(\frac{P}{P_r(b)} - 1\right)^{\frac{3}{2}}}. \quad (2.73)$$

Откуда следует, что объем шлама в межзерновом пространстве бруска будет равен нулю только в случае, если сила резания бруска будет совпадать с силой прижима бруска к заготовке (в выражении (2.63) величина  $P_S$  равна нулю):

$$P_r(b) = P. \quad (2.74)$$

Из выражений (2.73) легко определить значение величины  $b$ .

Таким образом, выражения (2.62) или (2.71) вместе с уравнением (2.73) определяют линейный съем в каждой обрабатываемой точке заготовки без учета зашлакованности бруска.

Однако следует заметить, что в процессе обработки бруском поверхности заготовки межзерновое пространство бруска забивается стружкой, что снижает силу резания, а следовательно, уменьшается при этом величина линейного съема. Для определения влияния зашлакованности бруска на

величину линейного съема введем величину:

$$K_z(b) = \frac{1}{1 + \left( \frac{\vartheta_S(b)}{\vartheta(b) - \vartheta_S(b)} \right)^2}, \quad (2.75)$$

которую назовем коэффициентом засаливания бруска. Очевидно, что при  $\vartheta_S(b) = 0$  (т.е. когда в межзерновом пространстве бруска отсутствует шлам) величина  $K_z(b) = 1$ . Напротив, если шлам занимает все межзерновое пространство бруска (это происходит при  $\vartheta_S(b) = \vartheta(b)$ ), то  $K_z(b) = 0$ . Как видно, диапазон изменения данной величины лежит в интервале  $[0, 1]$ . Таким образом, засаливаемость бруска тем выше, чем меньше коэффициент засаливаемости.

Тогда с учетом (2.63) и (2.64) и обозначения (2.75) выражение для линейного съема (2.71) примет вид:

$$q(y_0) = v_z \frac{1 + \sqrt{1 + \lambda^2}}{2} \cdot \frac{P \cdot K_z(b)}{81,6 \cdot H \cdot \pi^2 \cdot n_b \cdot \tau_{сдв} (1 + \xi) \cdot r} L(y_0, b). \quad (2.76)$$

В случае, если необходимо определить величину линейного съема без учета зашлакованности, следует положить в выражении (2.76)  $K_z(b) = 1$ . Однако при реальном процессе обработки брусок засаливается, а следовательно, необходимо определять значение величины  $K_z(b)$ . Для этого, как следует из (2.75), требуется найти величину объема шлама в межзерновом пространстве бруска  $\vartheta_S$ .

Объем шлама  $\vartheta_S(b)$  в межзерновом пространстве бруска при его повороте на угол  $\alpha_0$  зависит от элементарного объема, снимаемого окрестностью каждой находящейся в контакте с заготовкой точкой бруска с момента своего вступления в контакт с заготовкой. Для решения поставленной задачи определим, какие точки бруска участвуют в контакте с заготовкой после его поворота на угол  $\alpha_0$ . Очевидно, координаты этих точек после поворота бруска на угол  $\alpha_0$  должны удовлетворять неравенству:

$$x_6^{\alpha_0} \geq r$$

или, с учетом (2.9):

$$x_6^\alpha = r + \sqrt{\rho^2 - (y_6^0)^2} \cos \alpha + y_6^0 \sin \alpha - \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} \geq r. \quad (2.77)$$

Решением неравенства (2.77) являются все точки бруска, координаты которых при центральном положении бруска удовлетворяют условию:

$$y_1^{\alpha_0} \leq y \leq y_2^{\alpha_0}, \quad (2.78)$$

где

$$y_1^{\alpha_0} = \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} \sin \alpha_0 - \frac{b}{2} \cos \alpha_0;$$

$$y_2^{\alpha_0} = \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} \sin \alpha_0 + \frac{b}{2} \cos \alpha_0, \quad (2.79)$$

превращающие неравенство (2.77) в равенство.

Следует заметить, что из неравенства (2.77) мы будем иметь два корня не при любом угле поворота  $\alpha_0$ . На рис.2.8 показан участок рабочей поверхности бруска  $AB$ , который будет участвовать в контакте с заготовкой при угле поворота бруска на угол  $\alpha_0$ . Как видно из рис.2.8, точка  $B$ , которая только вступает в контакт с заготовкой при повороте бруска на угол  $\alpha_0$ , находится вне контакта с заготовкой при меньших его углах поворота.

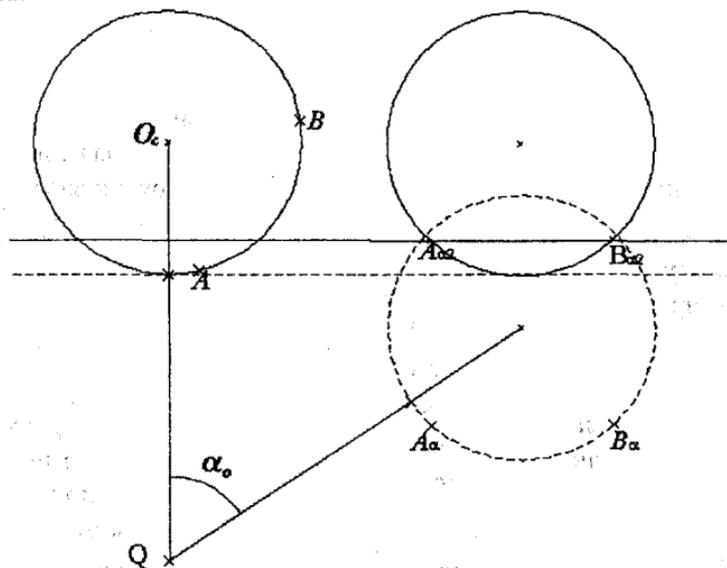


Рис.2.8. Схема вступления в контакт с заготовкой участка  $AB$  бруска

Для этой точки неравенство (2.77) не даст корня, так как ранее мы везде негласно полагали, что с заготовкой могут контактировать только те точки бруска, значения координат которых больше значений координат центра бруска  $x_c$  в момент нахождения его в центральном положении.

Для того, чтобы определить, при каких углах поворота бруска имеются два корня неравенства (2.77), подставим в это равенство первое зна-

чение корня  $y_1^{\alpha_0}$  выражения (2.79):

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \sqrt{(b \sin \alpha + \sqrt{4\rho^2 - b^2} \cos \alpha)^2} \cos \alpha - \frac{1}{2} b \cos \alpha \sin \alpha - \\ & - \frac{1}{2} \sqrt{4\rho^2 - b^2} \cos^2 \alpha = \frac{1}{2} \sqrt{(b \sin \alpha + \sqrt{4\rho^2 - b^2} \cos \alpha)^2} \cos \alpha - \\ & - \frac{1}{2} (b \sin \alpha + \sqrt{4\rho^2 - b^2} \cos \alpha) \cos \alpha = \frac{1}{2} |b \sin \alpha + \sqrt{4\rho^2 - b^2} \cos \alpha| \times \\ & \times \cos \alpha - \frac{1}{2} (b \sin \alpha + \sqrt{4\rho^2 - b^2} \cos \alpha) \cos \alpha. \end{aligned} \quad (2.80)$$

Как видно из (2.80), величина  $y_1^{\alpha_0}$  будет корнем равенства (2.77) только в том случае, если скобка во втором слагаемом будет положительной:

$$b \sin \alpha + \sqrt{4\rho^2 - b^2} \cos \alpha \geq 0. \quad (2.81)$$

Подставляя значение  $y_2^{\alpha_0}$  из (2.79) в (2.77), получим:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \sqrt{(b \sin \alpha - \sqrt{4\rho^2 - b^2} \cos \alpha)^2} \cos \alpha + \frac{1}{2} b \cos \alpha \sin \alpha - \\ & - \frac{1}{2} \sqrt{4\rho^2 - b^2} \cos^2 \alpha = \frac{1}{2} \sqrt{(b \sin \alpha - \sqrt{4\rho^2 - b^2} \cos \alpha)^2} \cos \alpha + \\ & + \frac{1}{2} (b \sin \alpha - \sqrt{4\rho^2 - b^2} \cos \alpha) \cos \alpha = \frac{1}{2} |b \sin \alpha - \sqrt{4\rho^2 - b^2} \cos \alpha| \times \\ & \times \cos \alpha + \frac{1}{2} (b \sin \alpha - \sqrt{4\rho^2 - b^2} \cos \alpha) \cos \alpha. \end{aligned} \quad (2.82)$$

Как видно из (2.82), это выражение будет равно нулю только в том случае, когда скобка во втором слагаемом будет отрицательной:

$$b \sin \alpha - \sqrt{4\rho^2 - b^2} \cos \alpha \leq 0. \quad (2.83)$$

Таким образом, для того чтобы  $y_1^{\alpha_0}$  и  $y_2^{\alpha_0}$  одновременно являлись корнями равенства (2.77), необходимо, чтобы выполнялись одновременно условия (2.81) и (2.83). Это возможно, если угол поворота бруска лежит в пределах:

$$- \arctg \left( \frac{\sqrt{4\rho^2 - b^2}}{b} \right) \leq \alpha \leq \arctg \left( \frac{\sqrt{4\rho^2 - b^2}}{b} \right). \quad (2.84)$$

Так как в процессе колебательных движений бруска при заготовке центр бруска варьируется в пределах  $\left[ -\frac{H}{2}; \frac{H}{2} \right]$ , то, как следует из (2.4), угол поворота бруска при этом будет изменяться в пределах:

$$-\alpha_{\max} \leq \alpha \leq \alpha_{\max}, \quad (2.85)$$

где

$$\alpha_{\max} = -\arcsin \left( \frac{H}{2 \left( R + \sqrt{\rho^2 - \frac{b^2}{4}} \right)} \right). \quad (2.86)$$

Таким образом, неравенство (2.86) имеет два корня (2.79), если выполняется условие:

$$\arcsin \left( \frac{H}{2 \left( R + \sqrt{\rho^2 - \frac{b^2}{4}} \right)} \right) \leq \operatorname{arctg} \left( \frac{\sqrt{4\rho^2 - b^2}}{b} \right), \quad (2.87)$$

откуда длина обрабатываемой поверхности:

$$H \leq 2 \frac{R}{\rho} \cdot \left( \rho^2 - \frac{b^2}{4} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{2}{\rho} \left( \rho^2 - \frac{b^2}{4} \right). \quad (2.88)$$

Таким образом, для обеспечения возможности периодического отрыва точек бруска от обрабатываемой поверхности с целью его очистки от стружки и шлама необходимо соблюдать условие (2.88). В противном случае центральные точки бруска будут находиться в постоянном контакте с заготовкой и быстро потеряют режущие свойства. Это важное условие не учитывалось предыдущими исследователями.

Определим объем стружки, который сняла каждая окрестность точки бруска с момента своего вступления в контакт с заготовкой и до поворота бруска на угол  $\alpha_0$ . Для этого выберем произвольную точку  $y$ , удовлетворяющую неравенству (2.78). Из выражений (2.11) можно определить угол поворота бруска, при котором эта точка вступила в контакт с заготовкой:

$$\alpha_1(y, b) = 2 \operatorname{arctg} \left( \frac{y - \frac{b}{2}}{\sqrt{\rho^2 - (y)^2} + \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2}} \right). \quad (2.89)$$

Для определения объема металла, который снимет окрестность фиксированной точки  $(y_0^0, x_0^0)$  бруска во время своего контакта с заготовкой, используем выражение (2.51). При повороте бруска на угол  $\alpha$  координата

этой точки бруска изменится по закону (2.9). Таким образом, вместо дифференциального уравнения (2.51) будем иметь уравнение:

$$dV = S(y_6^\alpha, \alpha, b) \cdot z_0(y_6^\alpha, \alpha, b) \cdot v_z \frac{1 + \sqrt{1 + \lambda^2}}{2} 2r \cdot \arcsin\left(\frac{c}{2r}\right) \times \tau'(\alpha, b) dy d\alpha, \quad (2.90)$$

которое определяет объем, снимаемый окрестностью точки бруска  $y_6^0$ , при повороте бруска на угол  $d\alpha$ .

Принтегрировав уравнение (2.51) по  $\alpha$ , получим объем, снимаемый окрестностью данной точки бруска при его повороте на угол  $\alpha_0 - \alpha_1(y, b)$ :

$$d\mathfrak{V}_S = v_z \frac{1 + \sqrt{1 + \lambda^2}}{2} 2r \arcsin\left(\frac{c}{2r}\right) \times \int_{\alpha_1(y, b)}^{\alpha_0} S(y_6^\alpha, \alpha, b) z_a(y_6^\alpha, \alpha, b) \tau'(\alpha, b) d\alpha dy. \quad (2.91)$$

Однако здесь стоит учесть то обстоятельство, что нижний предел интегрирования  $\alpha_1(y, b)$  может оказаться меньше, чем  $-\alpha_{\max}$ . Это означает, что данная точка бруска не выходит из контакта. В этом случае нижний предел интегрирования в (2.91) следует взять равным  $-\alpha_{\max}$ .

Поэтому, введя обозначение:

$$\alpha_y = \max(\alpha_1(y, b), -\alpha_{\max}), \quad (2.92)$$

запишем окончательно:

$$d\mathfrak{V}_S = v_z \frac{1 + \sqrt{1 + \lambda^2}}{2} 2r \arcsin\left(\frac{c}{2r}\right) \times \int_{\alpha_y}^{\alpha_0} S(y_6^\alpha, \alpha, b) \cdot z_a(y_6^\alpha, b) \tau'(\alpha, b) d\alpha dy. \quad (2.93)$$

Тогда объем, снимаемый всеми точками бруска, которые удовлетворяют условиям (2.78), будет иметь вид:

$$\mathfrak{V}_S = v_z \frac{1 + \sqrt{1 + \lambda^2}}{2} 2r \arcsin\left(\frac{c}{2r}\right) \times \int_{y_1^{\alpha_0}}^{y_2^{\alpha_0}} \int_{\alpha_y}^{\alpha_0} S(y_6^\alpha, \alpha, b) z_a(y_6^\alpha, b) \tau'(\alpha, b) d\alpha dy. \quad (2.94)$$

Так как с момента своего вступления в контакт с заготовкой точка, удовлетворяющая условию (2.78), при повороте бруска на угол  $\alpha_0$  не выходит из контакта, то объем стружки, который сняла эта точка, определяемый из (2.93), заполняет межзерновое пространство элементарного уча-

стка бруска. Таким образом, выражение (2.94) определяет объем стружки, заполняющий межзерновое пространство всей рабочей поверхности бруска при его повороте на угол  $\alpha_0$ , который соответствует точке  $y_0$  - координате центра бруска.

Приравнявая выражения (2.73) и (2.94), получим выражение для определения величины  $b$ :

$$2 \cdot r \cdot b \cdot \arcsin\left(\frac{c}{2r}\right) \cdot d_0 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{K_S}} - \frac{1}{2} K_S\right) \cdot \frac{\left(\frac{P}{P_r(b)} - 1\right)^{\frac{3}{2}}}{1 + \left(\frac{P}{P_r(b)} - 1\right)^{\frac{3}{2}}} = \quad (2.95)$$

$$= v_z \frac{1 + \sqrt{1 + \lambda^2}}{2} \cdot 2 \cdot r \cdot \arcsin\left(\frac{c}{2r}\right) \times$$

$$\times \int_{y_1^{\alpha_0}}^{y_2^{\alpha_0}} \int_{\alpha_y}^{\alpha_0} S(y_6^\alpha, \alpha, b) z_a(y_6^\alpha, \alpha, b) \tau'(\alpha, b) d\alpha dy.$$

Из соотношения (2.95) мы получаем зависимость величины  $b$  от угла поворота бруска  $\alpha_0$  с учетом накопившегося шлама в межзерновом пространстве бруска, а, как следует из выражения (2.75), зависимость от угла поворота коэффициента засаливаемости бруска  $K_z(b)$ .

Выполненные расчеты, как уже отмечалось, были сделаны при случае, когда обрабатываемый профиль имеет прямолинейную форму. Однако полученные выражения можно использовать и в случае криволинейного профиля. Для этого будем полагать, что радиус рабочей поверхности бруска в процессе обработки приобретает определенную форму, которая зависит от профиля обрабатываемой заготовки. Таким образом, от формы обрабатываемой поверхности будет зависеть радиус рабочей поверхности бруска  $\rho$ , который можно использовать в приведенных выше формулах.

На практике технологическим параметром, с помощью которого можно определить  $\rho$ , является угол осцилляции бруска  $\alpha_b$  (рис.2.9 и 2.10).

Определим радиус рабочей поверхности бруска в случае, если профиль является прямолинейным.

Как следует из рис.2.9, величину радиуса бруска  $\rho$  можно определить следующим образом. Так как контакт рабочей поверхности бруска и обрабатываемой поверхности заготовки происходит по нормали к этим поверхностям, то радиус рабочей поверхности бруска находится из простых геометрических построений. Из треугольника  $QO_cO_{cl}$  имеем:

$$QO_c = \frac{O_c O_{cl}}{\operatorname{tg} \alpha_b} \quad (2.96)$$

Так как  $QO_c = \rho + R$ , а  $O_c O_{cl} = \frac{H}{2}$ , то из равенства (2.96):

$$\rho = \frac{H}{2 \operatorname{tg} \alpha_b} - R \quad (2.97)$$

Таким образом, радиус бруска  $\rho$  получается тем меньше, чем больше угол  $\alpha_b$  его осцилляции и больше радиус  $R$  осцилляции. А чем меньше радиус бруска, тем выше его самозатачиваемость.

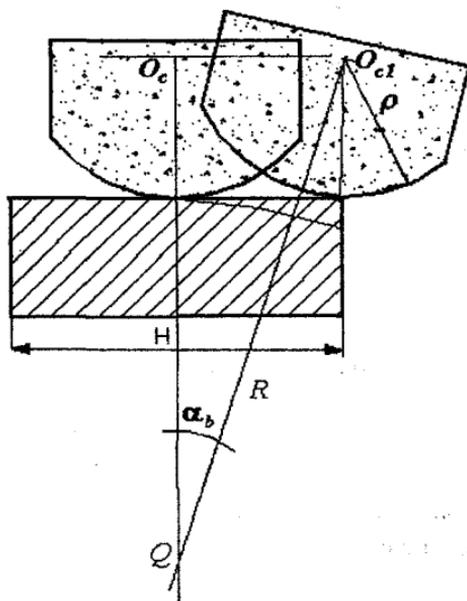


Рис. 2.9. Схема расчета радиуса профиля бруска при обработке прямолинейной заготовки

Следовательно, с целью повышения режущих способностей инструмента необходимо увеличивать угол осцилляции и при неизменном угле увеличивать радиус осцилляции.

На рис. 2.10 представлена схема процесса суперфиниширования для случая, когда профиль поверхности заготовки имеет форму дуги окружности.

Радиус кривизны профиля с центром в точке  $O_z$  обозначим через  $\rho_z$ . Тогда профиль имеет выпуклость величиной  $\delta$ , которую можно определить из выражения:

$$\delta = |TO_z| - |FO_z| = \rho_z - \rho_z \cos \varphi,$$

где, как следует из треугольника  $O_zFK$ :

$$\varphi = \arcsin \frac{H}{2\rho_z}.$$

Брусок осциллирует вокруг точки  $Q$  и максимальный угол отклонения равен  $\alpha_b$ . Как следует из рис. 2.10, величина  $\rho$  равна:

$$\rho = \sqrt{|O_{c1}U|^2 + |KU|^2}, \quad (2.98)$$

где

$$|KU| = |FU| - \frac{H}{2}. \quad (2.99)$$

Для определения величин  $|FU|$  и  $|O_{c1}U|$  выберем декартовую систему координат  $xFu$ . В этой системе координат уравнение прямой, проходящей через точки  $Q$  и  $O_{c1}$ , имеет вид:

$$y = ctg\alpha_b \cdot x - |FQ|, \quad (2.100)$$

где

$$|FQ| = |TQ| - \delta = R - \rho_z + \rho_z \sqrt{1 - \left(\frac{H}{2\rho_z}\right)^2}.$$

Уравнение прямой, проходящей через точки  $O_z$  и  $O_{c1}$ , имеет вид:

$$y = ctg\varphi \cdot x - |FO_z| = ctg\varphi \cdot x - \rho_z \sqrt{1 - \left(\frac{H}{2\rho_z}\right)^2}. \quad (2.101)$$

Тогда, приравняв правые части уравнений (2.100) и (2.101), найдем их точку пересечения, а следовательно, и отрезок  $|FU|$ :

$$|FU| = x = \frac{\rho_z - R}{ctg\varphi - ctg\alpha_b} = \frac{(\rho_z - R)H}{2\rho_z \left( \sqrt{1 - \left(\frac{H}{2\rho_z}\right)^2} - \frac{H}{2\rho_z} ctg\alpha_b \right)}$$

или

$$x = \frac{H}{2 \left( \sqrt{1 - \left(\frac{H}{2\rho_z}\right)^2} - \frac{H}{2\rho_z} ctg\alpha_b \right)} - \frac{HR}{2\rho_z \left( \sqrt{1 - \left(\frac{H}{2\rho_z}\right)^2} - \frac{H}{2\rho_z} ctg\alpha_b \right)}. \quad (2.102)$$

Подставляя (2.102) в (2.100), получим:



$$|UO_{cl}| = y = \rho = \frac{H}{2} \cdot ctg\alpha_b - R, \quad (2.105)$$

что совпадает с выражением (2.97).

Определив значение  $\rho$  из выражения (2.105), можно найти величину  $b$ , а затем, воспользовавшись выражением (2.62) и вернувшись к старой системе координат, представленной на рис.2.1, линейный съем  $q(y_0)$  в произвольной точке поверхности при одноразовом прохождении бруска через данную точку.

На практике удобно определять линейный съем в каждой точке обрабатываемой поверхности не за один проход бруска через точку, а за некоторое время обработки бруском заготовки. Как следует из выражения (2.1), время для однократного прохождения всей обрабатываемой поверхности бруском можно определить из условия:

$$\begin{aligned} \frac{H}{2} &= \frac{H}{2} \sin(2\pi n_b \tau_2) \\ -\frac{H}{2} &= \frac{H}{2} \sin(2\pi n_b \tau_1), \end{aligned}$$

откуда

$$\tau_2 = \frac{1}{4n_b}, \quad \tau_1 = \frac{3}{4n_b}.$$

Таким образом, за время  $\Delta\tau = \tau_1 - \tau_2 = \frac{1}{2n_b}$  брусок однократно пройдет через все точки заготовки. Это - очень маленькая величина. Так, например, если  $n_b = 200$  об/мин, то  $\Delta\tau = \frac{60}{2 \cdot 200} = 0,15$  сек. Тогда за время  $\tau$  брусок пройдет обрабатываемую поверхность  $\frac{\tau}{\Delta\tau} = 2 \cdot n_b \cdot \tau$  число раз.

Так как за один проход бруска через точку заготовки величина линейного съема определялась выражением (2.76), то за время  $\tau$  линейный съем в каждой точке будет определяться из выражения:

$$q(y_0) = v_z \frac{1 + \sqrt{1 + \lambda^2}}{2} \cdot \frac{P \cdot K_z(b)}{81,6 \cdot H \cdot \pi^2 \cdot \tau_{сдв} (1 + \xi) \cdot r} L(y_0, b) \cdot 2 \cdot \tau. \quad (2.106)$$

Таким образом, выражение (2.106) определяет величину линейного съема в каждой точке обрабатываемой поверхности бруском за общее время работы  $\tau$  с учетом засаливаемости бруска. Величину засаливаемости можно определить из выражения (2.75), а величину  $b$  - из выражения (2.95). В случае, если требуется определить величину линейного съема без

учета коэффициента засаливаемости, то в выражении (2.106) следует положить  $K_z(b) = 1$ , а величину  $b$  следует искать из условия (2.74).

Тогда профиль, который будет образовываться в процессе обработки бруском за время  $\tau$  будет описываться выражением:

$$x = f(y_0) - q(y_0, \tau),$$

где  $f(y)$  - первоначальная форма обрабатываемого профиля;

$q(y_0, \tau)$  - величина линейного съема в точке  $y_0$  за время  $\tau$  обработки бруском поверхности заготовки.

## 2.2. Алгоритм расчета величин снимаемого припуска и профиля обработанной поверхности

Как показали представленные исследования, механизм удаления припуска при формообразующем суперфинишировании весьма сложный, а математические модели, отражающие этот механизм, в практических целях можно применять только при использовании современной вычислительной техники. Поэтому нами была разработана программа расчета величины снимаемого припуска в среде MathCAD PLUS 7.0 PRO, представленная на рис. 2.11.

В качестве исходных данных используются размеры заготовки: диаметр  $d$  и длина профиля  $H$  обрабатываемой поверхности, механические свойства материала заготовки: напряжение сдвига  $\tau_{сдв}$  и коэффициент усадки стружки  $\xi$ , параметры, характеризующие абразивный инструмент: средний диаметр абразивных зерен  $d_0$ , ширину  $c$  бруска, коэффициент структуры  $K_S$ , параметры режима обработки: сила прижима бруска к заготовке  $P$ , частота вращения заготовки  $n_z$ , частота вращения инструментальной головки  $n_b$  и время обработки  $\tau$ , а также геометрические параметры станка: угол пересечения осей инструментальной головки и шпинделя изделия  $\alpha$  и радиус кругового движения бруска  $R$ .

На первом этапе исследований подсчитываются значения вспомогательных величин: окружной скорости заготовки  $v_z$  и критической глубины внедрения абразивных зерен в обрабатываемую поверхность  $a_{kr}$ , при которой они выпадают из связи.

Далее определяется размер площадки контакта бруска с заготовкой  $b$  без учета засаливания бруска из уравнения (2.74) при критической глубине  $a_{kr}$ . После чего определяется величина линейного съема без учета засаливания бруска из выражения (2.106) при  $K_z(b) = 1$  (рис. 2.11). Величина

### Входные параметры:

$$\begin{aligned} \text{tsdv} &:= 1400 \text{ МПа} & K_s &:= 1 & \xi &:= 1.4 & d_o &:= 0.007 \text{ мм} & H &:= 8 \text{ мм} \\ \alpha_b &:= 1.5 \frac{\pi}{180} & r &:= \frac{45}{2} \text{ мм} & R &:= 97.5 \text{ мм} & c &:= 10 \text{ мм} & n_b &:= \frac{200}{60} \text{ об/сек} \end{aligned}$$

### Вычисления

- радиуса рабочей поверхности бруска

$$\rho := \frac{H}{2 \cdot \tan(\alpha_b)} - R$$

- окружной скорости заготовки:

$$v_z(nz) := 2 \cdot \pi \cdot r \cdot nz$$

$$\lambda(nz, n_b) := \frac{H \cdot n_b}{2 \cdot r \cdot nz}$$

- скорости перемещения бруска относительно заготовки

$$v(nz, n_b) := v_z(nz) \cdot \frac{1 + \sqrt{1 + \lambda(nz, n_b)^2}}{2}$$

- критической глубины внедрения зерен в поверхность

$$a_{kr} := 0.35 \cdot \sqrt{\frac{d_o^{\frac{1}{2}}}{\text{tsdv} \cdot (1 + \xi)}}$$

- вспомогательных величин

$$\delta(b) := \frac{0.306 \cdot b^2}{8 \cdot \rho \cdot a_{kr}}$$

$$z_0 := \frac{K_s}{d_o^2}$$

$$L1(b) := \int_0^1 \left[ (1-t)^{4.75} \cdot t^{\frac{1}{2}} \cdot e^{\delta(b) \cdot t} \right] dt$$

- выражения для определения силы резания в зависимости от величины  $b$ :

$$Pr(b) := 1.52184 \cdot \text{tsdv} \cdot (1 + \xi) \cdot r \cdot \text{asin}\left(\frac{c}{2 \cdot r}\right) \cdot b^{10.5} \cdot \frac{z_0}{d_o^{2.75} \cdot g^{4.75} \cdot \rho^{4.75}} \cdot e^{-\delta(b)} \cdot L1(b)$$

- максимально возможной глубины внедрения бруска в заготовку по всей площадке контакта

$$a_m(b) := \frac{b^2}{8 \cdot \rho}$$

- выражения для определения величины площадки контакта  $b$  в зависимости от силы прижима бруска  $P$  без учета засаливания бруска

$$T(P, b) := \frac{P}{Pr(b)} - 1$$

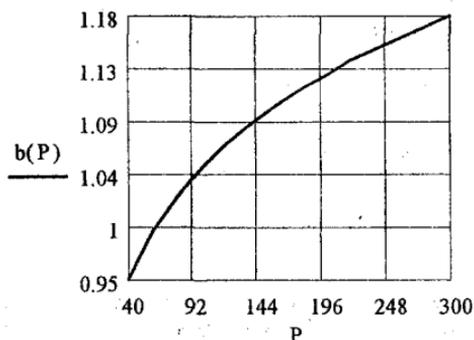
Рис. 2.11. Программа вычисления линейного съема в точках обрабатываемой поверхности без учета засаливания бруска

- определения величины площадки  
контакта из уравнения:  $T(P,b)=0$

```

b(P) :=
  A ← 10-5
  B ← 10
  while |A - B| > TOL
    X ←  $\frac{A + B}{2}$ 
    A ← X if  $\Phi(T(P, X)) \neq \Phi(T(P, A))$ 
    B ← X otherwise
  X
  
```

График зависимости величины  $b$  от  $P := 40, 60 \dots 300$  Н  
силы прижима бруска  $P$



Вычисление углов поворота бруска,  
при котором точка  $y_0$  войдет в контакт  
с бруском и при котором выйдет из  
контакта

$$\alpha_{11}(y_0, b) := \arcsin \left[ \frac{y_0 - \frac{b}{2}}{R + \sqrt{\rho^2 - \frac{b^2}{4}}} \right]$$

$$\alpha_{21}(y_0, b) := \arcsin \left[ \frac{y_0 + \frac{b}{2}}{R + \sqrt{\rho^2 - \frac{b^2}{4}}} \right]$$

$$\alpha_{\max}(b) := \arcsin \left[ \frac{H}{2 \cdot \left( R + \sqrt{\rho^2 - \frac{b^2}{4}} \right)} \right]$$

$$\alpha_1(y_0, b) := \max(\alpha_{11}(y_0, b) - \alpha_{\max}(b))$$

$$\alpha_2(y_0, b) := \max(\alpha_{21}(y_0, b) - \alpha_{\max}(b))$$

Рис. 2.11. Продолжение

Вычисление координаты центра бруска при повороте бруска на угол  $\alpha$

$$yc(y, \alpha, b) := \left( R + \sqrt{\rho^2 - \frac{b^2}{4}} \right) \cdot \sin(\alpha)$$

Вычисление максимальной глубины внедрения бруска в заготовку в сечении у бруска при положении его центра в точке  $yc(\alpha, b)$

$$ay(y, \alpha, b) := \frac{b^2}{8 \cdot \rho} - \frac{(y - yc(\alpha, b))^2}{2 \cdot \rho}$$

Вспомогательная величина для вычисления площади одного зерна

$$Wa(x) := 0.497 \cdot e^{-0.306 \cdot x}$$

Математическое ожидание площади сечения одного зерна внедренного в заготовку в сечении у бруска, при отклонении бруска от центрального положения на угол  $\alpha$

$$So(y, \alpha, b) := 0.625 \cdot ay(y, \alpha, b)^2 \cdot Wa\left(\frac{ay(y, \alpha, b)}{akr}\right)$$

Вычисление числа активных режущих зерен, внедренных в заготовку в сечении у бруска при его отклонении от центрального положения на угол  $\alpha$

$$zao(y, \alpha, b) := 0.24 \cdot zo \cdot \left( \frac{ay(y, \alpha, b)}{do} \right)^{2.75}$$

Вычисление величины  $\tau(\alpha, b)$ , которое обозначаем здесь через  $F(\alpha, b)$ .

$$F(\alpha, b) := \frac{1}{H \cdot \pi \cdot nb} \cdot \frac{\left( R + \sqrt{\rho^2 - \frac{b^2}{4}} \right) \cdot \cos(\alpha)}{\sqrt{1 - \left( \frac{2}{H} \cdot yc(\alpha, b) \right)^2}}$$

Вычисление величины линейного съема в точке  $y_0$  заготовки при силе прижмие бруска  $P$  и частоте вращения заготовки  $nz$  за один проход бруска через обрабатываемую точку

$$q(y_0, nz, P) := \begin{cases} b1 \leftarrow b(P) \\ \frac{1}{\pi} \cdot v(nz, nb) \cdot \sin\left(\frac{c}{2 \cdot r}\right) \cdot \int_{a1(y_0, b)}^{a2(y_0, b)} So(y_0, \alpha, b) \cdot zao(y_0, \alpha, b) \cdot F(\alpha, b) d\alpha \end{cases}$$

График зависимости величины линейного съема от положения точки на поверхности при однократном прохождении ее бруском

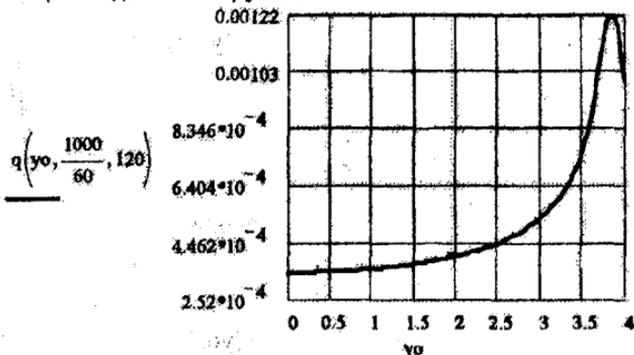


Рис.2.11. Продолжение

Подсчет величины линейного съема в точке заготовки за один проход через нее по преобразованной формуле

Подсчет вспомогательных величин

$$L_m(y_0, b) := \int_0^1 \left[ (1-t)^{4.75} \cdot t^{\frac{-1}{2}} \cdot e^{\delta(b) \cdot t} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left[ \frac{2}{H} \cdot \left( y_0 - \frac{b}{2} \cdot \sqrt{t} \right) \right]^2}} \right] dt$$

$$L_p(y_0, b) := \begin{cases} \int_0^1 \left[ (1-t)^{4.75} \cdot t^{\frac{-1}{2}} \cdot e^{\delta(b) \cdot t} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left[ \frac{2}{H} \cdot \left( y_0 + \frac{b}{2} \cdot \sqrt{t} \right) \right]^2}} \right] dt & \text{if } y_0 \leq \frac{H}{2} - \frac{b}{2} \\ \frac{4}{b^2} \left( y_0 - \frac{H}{2} \right)^2 \int_0^1 \left[ (1-t)^{4.75} \cdot t^{\frac{-1}{2}} \cdot e^{\delta(b) \cdot t} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left[ \frac{2}{H} \cdot \left( y_0 + \frac{b}{2} \cdot \sqrt{t} \right) \right]^2}} \right] dt & \text{otherwise} \end{cases}$$

Подсчет линейного съема по эквивалентной формуле

$$q_r(y_0, n_z, P) := \begin{cases} b_1 \leftarrow b(P) \\ v(n_z, n_b) \cdot \frac{P}{81.6 \cdot H \cdot \pi^2 \cdot n_b \cdot \text{tsdv} \cdot (1 + \xi) \cdot r} \cdot \frac{L_p(y_0, b_1) + L_m(y_0, b_1)}{L_1(b)} \end{cases}$$

Сравнительные графики подсчета линейного съема по двум формулам

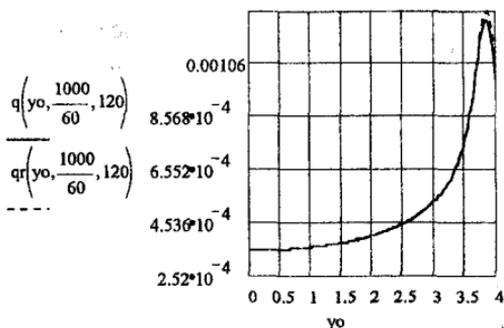


Рис.2.11. Окончание

засаливания  $K_z(b)$  определяется позже в программе (рис.2.12).

Для этого сначала находится радиус профиля бруска  $r$ . Затем из уравнения  $P_r(b) = P$  или эквивалентного ему уравнения:

$$T(P, b) = \frac{P}{P_r(b)} - 1 = 0.$$

определяется величина площадки контакта  $b$  без учета засаливания бруска. Затем определяется угол отклонения бруска от своего центрального положения при вступлении в контакт с точкой  $y_0$  заготовки и угол отклонения при выходе бруска из контакта с этой точкой. В программе эти углы обозначены через  $\alpha 11(y_0, b)$  и  $\alpha 21(y_0, b)$ . Эти углы должны лежать в пределах  $[-\alpha_{\max}(b), \alpha_{\max}(b)]$ , так как это – максимально возможные углы отклонения бруска от своего центрального положения. В случае, если углы  $\alpha 11$  или  $\alpha 21$  принимают значения за допустимым интервалом, то это означает, что точка  $y_0$  не выходит из контакта с бруском, и в этом случае мы заменяем угол, выходящий за допустимый интервал, соответствующей границей интервала. Затем идет непосредственный подсчет различных величин, необходимых для подсчета величины линейного съема, а затем и подсчет линейного съема в каждой точке поверхности.

Далее по программе определяется коэффициент засаливания поверхности бруска  $K_z(b)$  (рис.2.12). Это – один из важнейших этапов программы. Этот коэффициент зависит от времени контакта бруска с заданной точкой профиля, а также от условий суперфиниширования. Для определения величины этого коэффициента отыскивается величина  $b$  – размер площадки контакта, который уже не будет постоянной величиной, а будет зависеть от степени зашлакованности бруска, которая характеризуется величиной  $\vartheta_S(b)$ . С одной стороны, эта величина зависит от отношения силы прижима  $P$  бруска к его силе резания  $P_r(b)$ , а также от общего объема межзернового пространства бруска  $\vartheta(b)$ . Эта зависимость представлена выражением (2.73). С другой стороны, величина  $\vartheta_S(b)$  непосредственно подсчитывается как интегральная сумма, которая складывается из суммы объема, который снимет произвольная окрестность точки бруска с момента своего начала контакта с заготовкой и до того, пока центр бруска не достигнет обрабатываемой точки, а затем ищется интегральная сумма, суммирующая эти объемы. Эта интегральная сумма представлена в виде двойного интеграла в выражении (2.94). Приравнивая выражения (2.73) и (2.94), получаем уравнение, связывающие угол отклонения бруска от своего центрального положения, силу прижима бруска  $P$  и другие параметры со значением величины  $b$ . Определив значение  $b$ , в дальнейшем определяем величины  $\vartheta_S(b)$  и  $K_z(b)$ , а затем – величину линейного съема в каждой точке обрабатываемой поверхности с учетом коэффициента засаливаемости.

Определяем координаты точек на бруске при положении бруска в центральном положении, которые будут являться крайними точками контакта бруска с заготовкой при повороте бруска на угол  $\alpha^{\circ}$ .

$$y1(\alpha, b) := \sqrt{\rho^2 - \frac{b^2}{4}} \cdot \sin(\alpha) - \frac{b}{2} \cdot \cos(\alpha)$$

$$y2(\alpha, b) := \sqrt{\rho^2 - \frac{b^2}{4}} \cdot \sin(\alpha) + \frac{b}{2} \cdot \cos(\alpha)$$

Определяем угол поворота бруска, при котором точка бруска, имеющая координату  $y$  при положении бруска в центральном положении, вступит в контакт с заготовкой.

$$\alpha_{ln}(y, b) := 2 \cdot \operatorname{atan} \left[ \frac{y - \frac{b}{2}}{\sqrt{\rho^2 - y^2} + \sqrt{\rho^2 - \frac{b^2}{4}}} \right]$$

$$\alpha_y(y, b) := \max(\alpha_{ln}(y, b) - \alpha_{max}(b))$$

Определение координаты точки бруска, имеющей координату  $y$  при центральном положении бруска, при отклонении бруска на угол  $\alpha$ .

$$yb(y, \alpha, b) := \left( R - \sqrt{\rho^2 - y^2} + \sqrt{\rho^2 - \frac{b^2}{4}} \right) \cdot \sin(\alpha) + y \cdot \cos(\alpha)$$

Математическое ожидание площади сечения зерна в плоскости  $yb(y, \alpha, b)$ , в которую перейдет точка бруска, имеющая координату  $y$  на бруске при его центральном положении.

$$Sa(y, \alpha, b) := So(yb(y, \alpha, b), \alpha, b)$$

Число активных зерен бруска в сечении  $yb(y, \alpha, b)$

$$za(y, \alpha, b) := zao(yb(y, \alpha, b), \alpha, b)$$

$$B(nz) := v(nz, nb) \cdot 2 \cdot r \cdot \operatorname{asin} \left( \frac{c}{2 \cdot r} \right)$$

Объем шлама снимаемый всеми точками бруска, участвующими в контакте с заготовкой, при отклонении последнего на угол от центрального положения с момента своего вступления в контакт с заготовкой:

$$VsL(b, \alpha, nz) := B(nz) \cdot \int_{y1(\alpha, b)}^{y2(\alpha, b)} \int_{\alpha_y(y, b)}^{\alpha_0} Sa(y, \alpha, b) \cdot za(y, \alpha, b) \cdot F(\alpha, b) d\alpha dy$$

Подсчет объема межзернового пространства

$$V(b) := 2 \cdot r \cdot b \cdot \operatorname{asin} \left( \frac{c}{2 \cdot r} \right) \cdot do \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{Ks}} - \frac{1}{2} Ks \right)$$

Второе выражение для определения объема шлама в межзерновом пространстве бруска

$$VsL1(P, b) := V(b) \cdot \frac{T(P, b)^{\frac{3}{2}}}{1 + T(P, b)^{\frac{3}{2}}}$$

Уравнение для определения величины площадки контакта  $b$  в зависимости от зашлакованности бруска

$$Fb(P, b, \alpha_0, nz) := VsL(b, \alpha_0, nz) - VsL1(P, b)$$

Поиск значений размеров площадки контакта в зависимости от силы прижима бруска, угла поворота, частоты вращения заготовки вокруг своей оси

$$bo(P, \alpha_0, nz) := \begin{cases} A \leftarrow \frac{3 \cdot b(P)}{4} \\ B \leftarrow b(P) \\ \text{while } |A - B| > \text{TOL} \\ \quad X \leftarrow \frac{A + B}{2} \\ \quad A \leftarrow X \text{ if } \Phi(\text{Re}(Fb(P, X, \alpha_0, nz))) \leq \Phi(\text{Re}(Fb(P, A, \alpha_0, nz))) \\ \quad B \leftarrow X \text{ otherwise} \\ X \end{cases}$$

Выражение для определения коэффициента засаливаемости бруска

$$Kz(P, b) := \frac{1}{\left[ 1 + \left( \frac{VsL1(P, b)}{V(b) - VsL1(P, b)} \right)^{\frac{3}{2}} \right]}$$

Подсчет значений  $b$  при силе прижима бруска  $P=120\text{H}$  при различных частотах вращения заготовки и различных углах поворота бруска

$$kr := 20 \quad i := 1..kr \quad \alpha_{i0} := 0 \quad \alpha_{ik} := \alpha b$$

$$\alpha_{ih} := \frac{\alpha_{ik} - \alpha_{i0}}{kr} \quad \alpha_{ij} := \alpha_{i0} + i \cdot \alpha_{ih}$$

$$j := 0..2 \quad nz_j := 1000 + 1000 \cdot j$$

$$b_{i,j} := bo\left(P, \alpha_{ij}, \frac{nz_j}{60}, nb\right)$$

График зависимости величины  $b$  от величины угла отклонения бруска от своего центрального положения

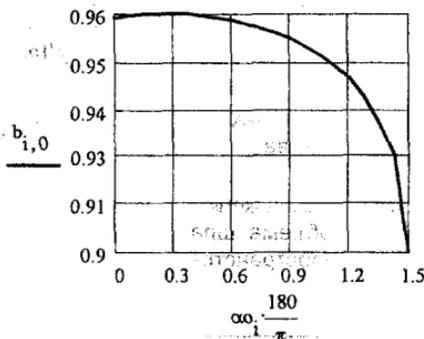
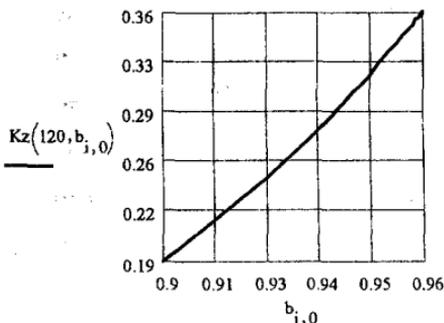


Рис. 2.12. Продолжение

График зависимости коэффициента засаливания в зависимости от величины площадки контакта  $b$  при силе прижима  $P=120H$



Вспомогательные величины для подсчета линейного съема с учетом засаливаемости бруска

$$Lpb(\alpha_0, b) := \begin{cases} y_0 \leftarrow yc(\alpha_0, b) \\ Lp(y_0, b) \end{cases}$$

$$Lmb(\alpha_0, b) := \begin{cases} y_0 \leftarrow yc(\alpha_0, b) \\ Lm(y_0, b) \end{cases}$$

Подсчет линейного съема при однократном прохождении бруском через точки поверхности с учетом засаливаемости бруска

$$qs(\alpha_0, nz, P) := \begin{cases} i \leftarrow \frac{\alpha_0 - \alpha_{u0}}{\alpha_{uh}} \\ j \leftarrow \frac{nz - 1000}{1000} \\ nz1 \leftarrow \frac{nz}{60} \\ v(nz1, nb) \cdot \frac{P \cdot Kz(P, b_{i,j})}{81.6 \cdot H \cdot \pi^2 \cdot nb \cdot tsv \cdot (1 + \xi) \cdot r} \cdot \frac{Lpb(\alpha_0, b_{i,j}) + Lmb(\alpha_0, b_{i,j})}{Ll(b_{i,j})} \end{cases}$$

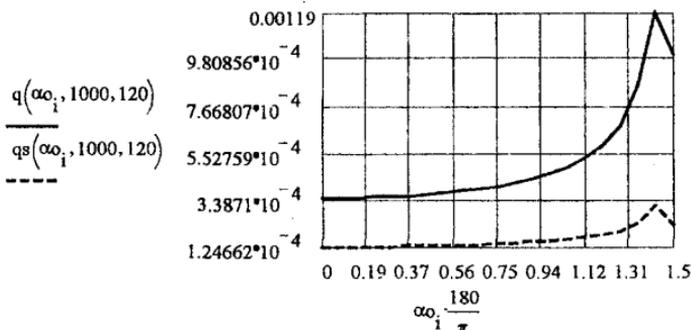
Зависимость линейного съема от величины угла отклонения бруска от своего центрального положения без учета зашлакованности

$$q3(y_0, nz, P) := q(y_0, nz, P)$$

$$q(y_0, nz, P) := \begin{cases} i \leftarrow \frac{\alpha_0 - \alpha_{u0}}{\alpha_{uh}} \\ j \leftarrow \frac{nz - 1000}{1000} \\ y_0 \leftarrow yc(\alpha_0, b_{i,j}) \\ q3(y_0, nz, P) \end{cases}$$

Графики линейного съема с учетом и без учета засаливания бруска при однократном его прохождении через точки обрабатываемой поверхности

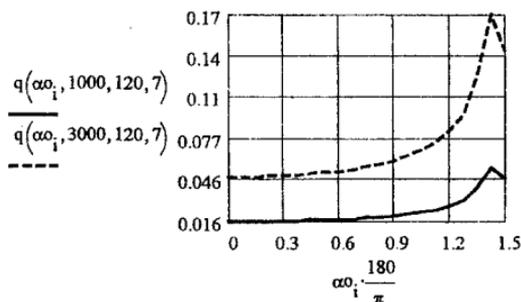
Рис. 2.12. Продолжение



Величина линейного съема без учета зашлакованности за время обработки поверхности бруском  $\tau = 7$  сек при частоте вращения заготовки 1000 и 3000 об/мин

$$q_3(\alpha_0, nz, P, \tau) := 2 \cdot nb \cdot \tau \cdot q(\alpha_0, nz, P)$$

$$q(\alpha_0, nz, P, \tau) := q_3(\alpha_0, nz, P, \tau)$$



Величина линейного съема с учетом зашлакованности за время обработки поверхности бруском  $\tau = 7$  сек при частоте вращения заготовки 1000 и 3000 об/мин

$$q_{ss}(\alpha_0, nz, P, \tau) := 2 \cdot nb \cdot \tau \cdot qs(\alpha_0, nz, P)$$

$$qs(\alpha_0, nz, P, \tau) := q_{ss}(\alpha_0, nz, P, \tau)$$

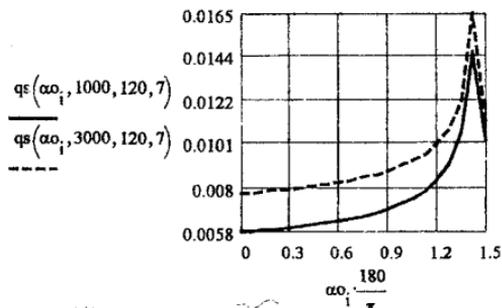


Рис. 2.12. Окончание

Таким образом вычислены все необходимые величины для определения линейного съема в каждой точке обрабатываемой поверхности. На этом работа программы завершается.

### 2.3. Анализ влияния технологических факторов на выходные параметры обработки

В табл. 2.2 приведены типичные значения исходных технологических параметров, при которых осуществлялся данный анализ, и диапазон их изменения.

Таблица 2.2

*Значения исходных параметров и диапазон их изменения*

$d_0 = 7 \div 14$ мкм	$n_b = 100 \div 500$ дв.об./мин	$\alpha_b = 0,5^0 \div 3^0$	$K_S = 1$
$H = 8 \div 40$ мм	$n_z = 1000 \div 3000$ об/мин	$c = 5 \div 10$ мм	$\xi = 1,34$
$R = 80 \div 120$ мм	$r = 20 \div 60$ мм	$\tau_{adv} = 1400$ МПа	$P = 40 \div 120$ Н

Для случая прямолинейного профиля, как следует из табл.2.2 и выражения (2.96) или (2.104), величина  $\rho$  принимает минимальное значение при минимальном значении  $H$ , максимальных значениях  $\alpha_b$  и  $R$ . Таким образом, величина  $\rho$  меняется в пределах:

$$\rho = 70 \div 1066 \text{ мм.}$$

При средних значениях  $H$ ,  $\alpha_b$  и  $R$  из табл.2.2 величина  $\rho$  принимает значение, равное:

$$\rho = 329,544 \text{ мм.}$$

На рис. 2.13 и 2.14 приведены результаты расчета линейного съема в каждой точке  $y_0$  обрабатываемой поверхности заготовки за время  $\tau = 7$  с без учета засаливания бруска (принимается значение коэффициента  $K_z(b) = 1$ ), и с учетом засаливания (коэффициент  $K_z(b)$  подсчитывается).

Верхние кривые на графиках рис. 2.13 построены при условии отсутствия засаливания инструмента, а нижние - при условии засаливания.

Как видно из рис. 2.13 и 2.14, съем металла без учета засаливания бруска в несколько раз выше, чем при учете засаливания. Это доказывает то, что степень засаливания инструмента является превалирующим фактором процесса суперфиниширования. Все действия, направленные к изменению степени засаливания инструмента, оказывают решающее влияние на результаты обработки. Поэтому все прежние теоретические исследования, которые не учитывали процесс засаливания или не точно его отражали, в искаженном виде представляли механизм процесса суперфиниширования.

Из рисунков видно, что без учета засаливания зернистость инстру-

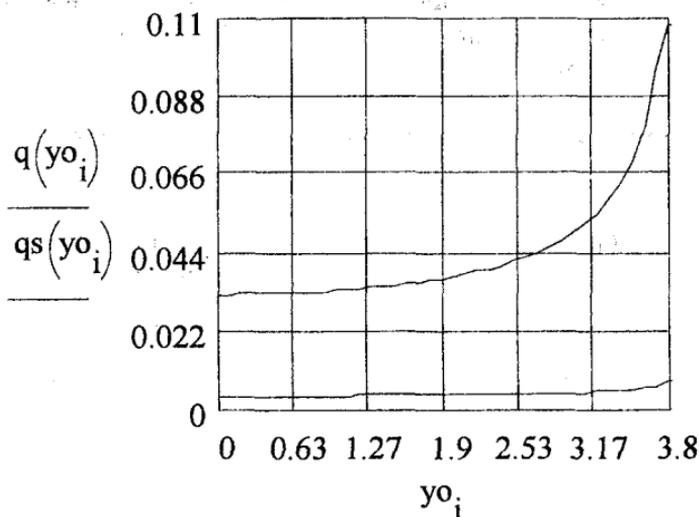


Рис. 2.13. Линейный съем  $q$ , мм вдоль профиля заготовки при обработке инструментом зернистостью M7 без учета засаливания инструмента (сплошная линия) и с учетом засаливания (пунктирная):  $n_z=3000$  об/мин;  $n_b=100$  об/мин;  $P=80$ Н;  $d_0=0,007$  мм

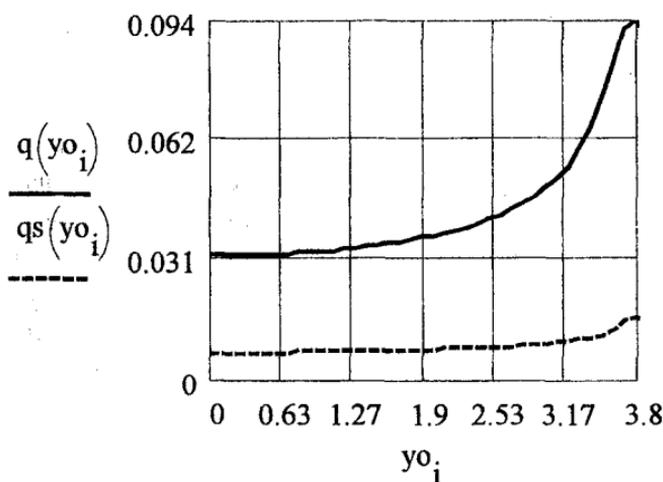


Рис. 2.14. Линейный съем  $q$ , мм вдоль профиля заготовки при обработке инструментом зернистостью M14 без учета засаливания инструмента (сплошная линия) и с учетом засаливания (пунктирная):  $n_z=3000$  об/мин;  $n_b=100$  об/мин;  $P=80$ Н;  $d_0=0,014$  мм

мента слабо влияет на величину съема металла. Это объясняется тем, что при равных условиях абразивные зерна мелкозернистого инструмента хотя и оставляют менее глубокие царапины на поверхности заготовки, чем абразивные зерна крупнозернистого инструмента, но зато число царапин в единицу времени мелкозернистый инструмент делает большее, чем крупнозернистый, и эти два фактора уравниваются.

С учетом засаливания инструмента влияние зернистости инструмента становится существенным. Это особенно наглядно показано на рис. 2.15. Так, в данных условиях при использовании инструмента зернистости M14 съем металла в 1,6-1,8 раза выше, чем при использовании инструмента зернистостью M7, что хорошо согласуется с практикой. Объясняется это тем, что более крупнозернистый инструмент имеет больший объем межзернового пространства и, следовательно, большая часть внешней нагрузки затрачивается на резание, чем у мелкозернистого инструмента.

Из рисунков также видно, что съем металла на периферии поверхности заготовки при данном способе обработки получается в 2-2,5 раза выше, чем в центре. Объясняется это тем, что вследствие переменной скорости перемещения пятна контакта заготовки и инструмента вдоль профиля обрабатываемой поверхности, время контакта на периферийных участках поверхности заготовки получается большее, чем на центральном участке. Поэтому брусок большую часть времени обработки снимает припуск по краю профиля, что и объясняет указанную зависимость.

Разница между съемом металла на центральном участке профиля заготовки и на периферийных участках при обработке крупнозернистым инструментом несколько выше, чем при обработке мелкозернистым инструментом (рис. 2.15). Поэтому при необходимости получения более выпуклого профиля или для исправления более существенных погрешностей профиля заготовки следует при обработке применять более крупнозернистый инструмент.

На рис. 2.16 показан съем металла вдоль профиля заготовки при различных частотах ее вращения, а на рис. 2.17 - при различных частотах движения инструментальной головки.

Как видно из рис. 2.16, с увеличением частоты вращения заготовки съем металла возрастает. Объясняется это тем, что при большей частоте вращения заготовки рабочая поверхность абразивного инструмента прорезывает больший путь по обрабатываемой поверхности, а следовательно, больше снимает металла. С другой стороны, с возрастанием частоты вращения заготовки увеличивается степень засаливания инструмента, что способствует уменьшению скорости съема припуска. Первый фактор превалирует над вторым до того момента, когда брусок значительно засалится. При дальнейшем увеличении частоты вращения заготовки межзерновое

пространство инструмента почти полностью будет заполняться снимаемой стружкой и это не позволит получить дополнительного съема металла.

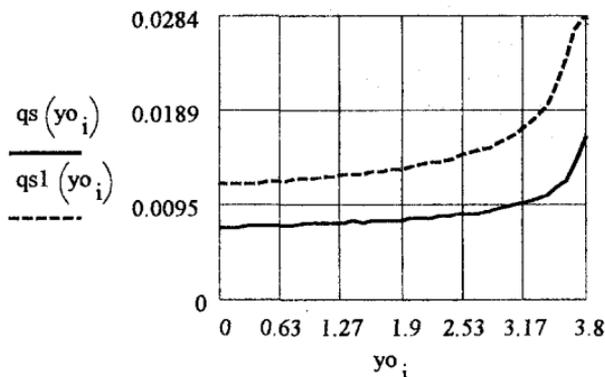


Рис. 2.15. Съем металла  $q$ , мм вдоль профиля обрабатываемой поверхности при различной зернистости инструмента:  $d_0 = 0,014$  мм - пунктирная;  $d_0 = 0,007$  мм - сплошная линия;  $n_z = 3000$  об/мин;  $n_b = 200$  об/мин;  $P = 80H$

К числу эффективных управляющих факторов относится частота вращения инструментальной головки. Как видно из рис. 2.17, с увеличением частоты вращения инструментальной головки, а, следовательно, и частоты осцилляции бруска, съем металла существенно возрастает. Объясняется это тем, что с возрастанием частоты движения инструментальной головки уменьшается время контакта каждой точки рабочей поверхности инструмента с обрабатываемой поверхностью, что снижает степень засаливания инструмента. Как уже показано, с уменьшением степени засаливания инструмента возрастает съем металла, что и приводит к значительному влиянию на процесс обработки частоты движения инструментальной головки.

Некоторое влияние на съем металла и выпуклость профиля заготовки оказывает сила прижима инструментов к обрабатываемой поверхности. На рис. 2.18 пунктирной линией показана данная зависимость, соответствующая силе прижима, равной 120Н, сплошной линией - соответствующая силе прижима 40Н.

Как видно из рис. 2.18, с увеличением силы прижима съем металла возрастает. Однако это влияние невелико по сравнению с другими факторами. Объясняется это тем, что с возрастанием силы прижима, с одной стороны, возрастает глубина внедрения зерен в обрабатываемую поверхность, что способствует увеличению скорости снятия припуска. С другой стороны, увеличение скорости снятия припуска приводит к более интен-

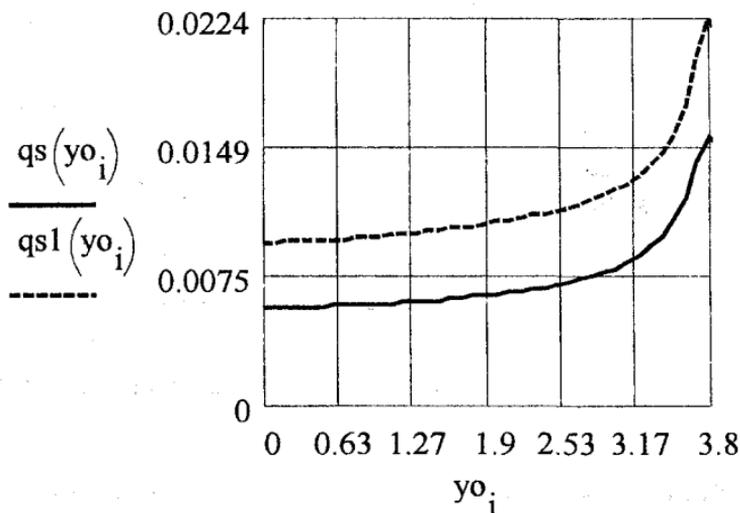


Рис. 2.16. Съем металла  $q$ , мм вдоль профиля заготовки при различных частотах вращения заготовки:  $n_2=3000$  об/мин - сплошная линия;  $n_2=1000$  об/мин - пунктирная;  $n_2=200$  об/мин;  $P=80H$ ;  $d_0=0,01$  мм

сивному заполнению стружкой и шламом межзернового пространства и более интенсивному изнашиванию зерен, что способствует уменьшению снимаемого припуска. Из двух факторов превалирует первый, но в итоге влияние силы прижима брусков к заготовке на съем металла получается малозначимым.

Все факторы, которые способствуют увеличению съема припуска при обработке в процессе многобрускового суперфиниширования, обеспечивают формирование выпуклого профиля заготовки. Это наглядно представлено на рис. 2.19-2.22.

Предполагалось, что в исходном состоянии заготовка имела прямолинейный профиль обрабатываемой поверхности. В результате неравномерного съема металла при обработке обработанная поверхность приобретает выпуклый профиль. Профиль аппроксимировался степенной зависимостью вида:

$$X = A \cdot y^n + \delta,$$

где  $\delta$  - величина выпуклости профиля, мм;  $A$  - коэффициент формы профиля,  $mm^{1-n}$ ;  $n$  - показатель формы профиля;  $X$  и  $y$  - соответственно ордината и абсцисса произвольной точки профиля, мм.

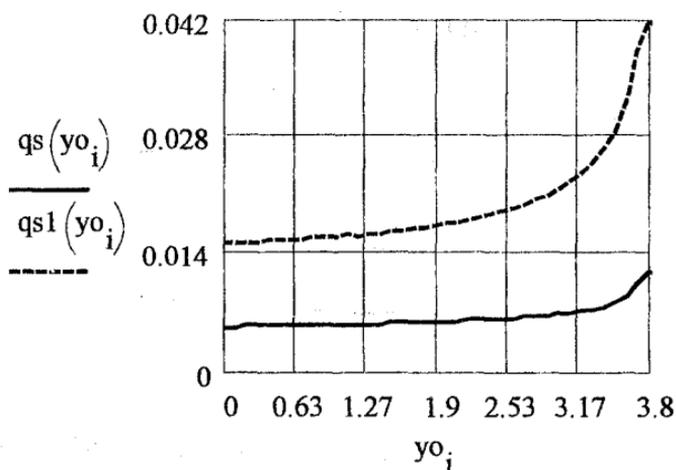


Рис. 2.17. Съем металла  $q$ , мм вдоль профиля заготовки при различных частотах вращения инструментальной головки:  $n_b = 100$  об/мин - сплошная линия;  $n_b = 500$  об/мин - пунктирная;  $n_z = 3000$  об/мин;  $P = 80H$ ;  $d_0 = 0,01$  мм

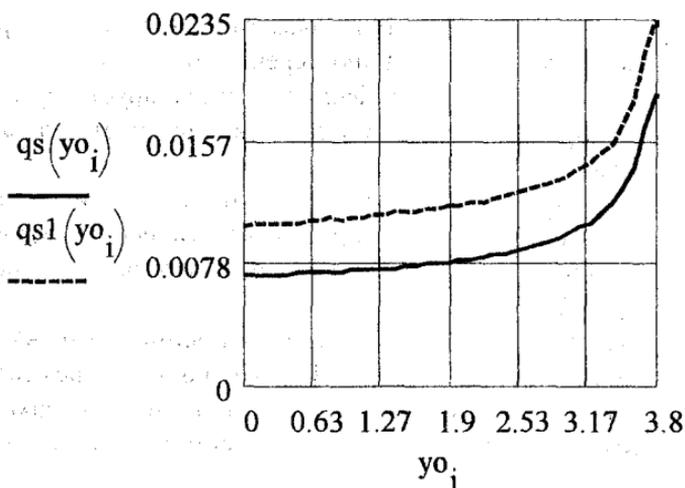


Рис. 2.18. Съем металла  $q$ , мм вдоль профиля заготовки при различных значениях силы прижима инструментов к обрабатываемой поверхности:  $P = 80H$  - сплошная;  $P = 120H$  - пунктирная;  $n_z = 3000$  об/мин;  $n_b = 200$  об/мин;  $d_0 = 0,01$  мм

Из рис. 2.19-2.22 видно, что процесс многобрускового суперфиниширования является эффективным способом обработки поверхностей с оптимизированной формой профиля. Во всех представленных на рисунках случаях показатель формы профиля имеет величину, близкую к 6, что является оптимальным для дорожек качения роликоподшипников.

Величина выпуклости профиля зависит от режима обработки. Наиболее значимым фактором, обеспечивающим регулирование величины выпуклости обработанной поверхности, является частота движения инструментальной головки (рис. 2.19).

С изменением частоты движения инструментальной головки со 100 об/мин до 500 об/мин величина выпуклости возрастает в 4,5 раза (с 0,003мм до 0,013мм). Следовательно, регулируя частоту движения инструментальной головки, можно эффективно управлять как съемом металла, так и величиной выпуклости.

Вторым по значимости фактором является зернистость инструмента. Увеличивая зернистость инструмента с M7 до M14 можно повысить выпуклость в 1,75 раза. Однако известно, что с увеличением зернистости инструмента возрастает шероховатость поверхности. Поэтому этот фактор имеет ограниченное применение. Частота вращения заготовки и особенно сила прижима инструментов к заготовке оказывают на величину выпуклости меньшее влияние, чем другие факторы.

Для подтверждения реальности выполненного анализа на рис. 2.23 - 2.26 приведено сопоставление результатов теоретических расчетов с результатами опыта.

На рисунках показаны теоретические и экспериментальные зависимости съема металла и выпуклости профиля заготовки от наиболее значимых факторов: зернистости инструмента и частоты вращения инструментальной головки. Первая пара графиков соответствует следующим условиям исследования: сила прижима бруска к заготовке  $P=80\text{Н}$ , угол пересечения осей заготовки и инструментальной головки 1,5 градуса, брусок средней твердости ( $\text{HRA}=20$  ед) и структуры (K5), частота вращения инструментальной головки 200 об/мин., частота вращения заготовки 3000 об/мин, время 7 с, зернистость M14.

Вторая пара графиков получена при тех же условиях, но зернистость инструмента составляла M10.

Сплошными линиями показаны теоретические зависимости, кружочками представлены регрессионные зависимости, полученные по экспериментальным данным, пунктирными линиями показаны верхние и нижние доверительные интервалы экспериментальных данных при доверительной вероятности 0,95.

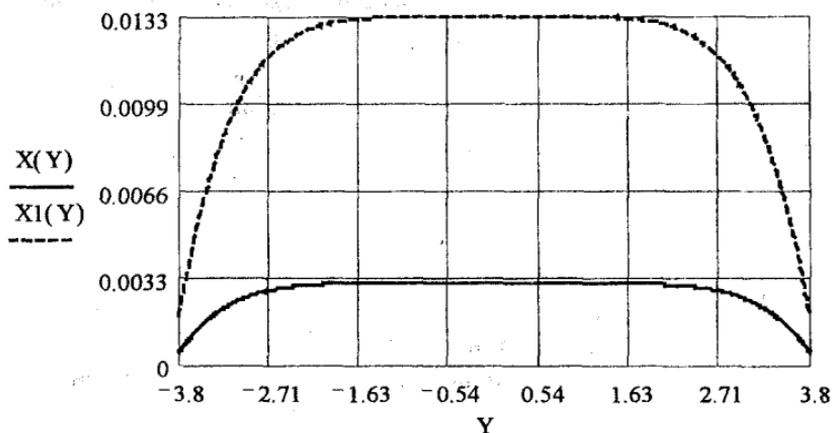


Рис. 2.19. Профиль заготовки при разных частотах движения инструментальной головки:  $n_b = 100$  об/мин - сплошная линия ( $A = 8,94 \cdot 10^{-7}$  мм;  $n = 6,51$ );  $n_b = 500$  - пунктирная линия ( $A = 8,08 \cdot 10^{-6}$  мм;  $n = 5,95$ );  $n_z = 3000$  об/мин;  $P = 80$ Н;  $d_0 = 0,01$  мм

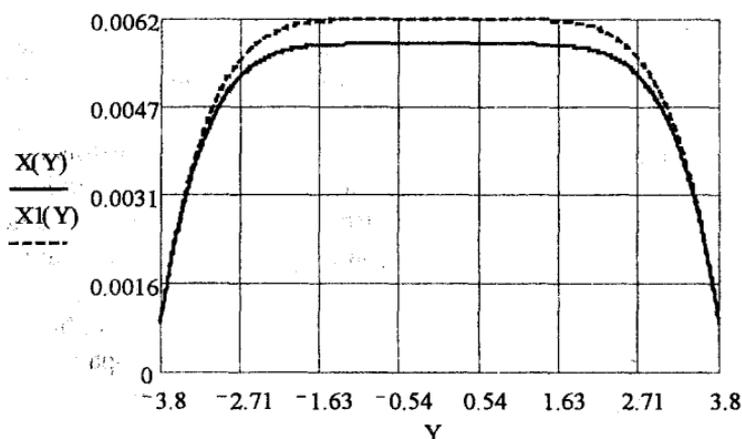


Рис. 2.20. Профиль заготовки, получаемый при различных силах прижимах брусков к заготовке:  $P = 40$ Н - сплошная линия ( $A = 2,05 \cdot 10^{-6}$  мм;  $n = 6,35$ );  $P = 120$ Н - пунктирная линия ( $A = 3,84 \cdot 10^{-6}$  мм;  $n = 5,94$ );  $n_z = 3000$  об/мин;  $n_b = 200$  об/мин;  $d_0 = 0,01$  мм

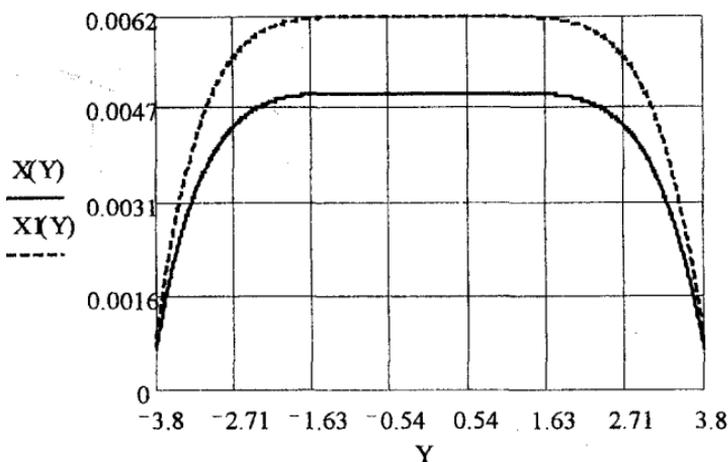


Рис. 2.21. Профиль заготовки, получаемый при различных частотах вращения заготовки:  $n_z = 1000$  об / мин; — сплошная линия ( $A = 2,98 \cdot 10^{-6}$  мм;  $n = 5,98$ );  
 $n_z = 3000$  об / мин — пунктирная линия ( $A = 3,32 \cdot 10^{-6}$  мм;  $n = 6,05$ )  
 $n_b = 200$  об/мин;  $P = 80H$ ;  $d_0 = 0,01$  мм

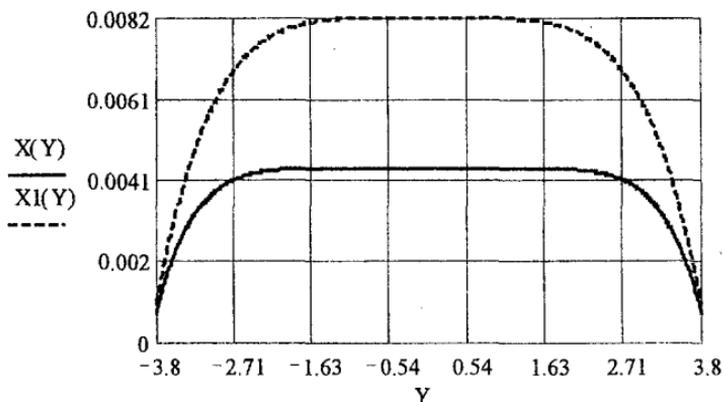


Рис. 2.22. Профиль заготовки, получаемый при различной зернистости инструмента: M7—сплошная линия ( $A = 3,76 \cdot 10^{-7}$  мм;  $n = 7,4$ ); M14—пунктирная линия ( $A = 1,77 \cdot 10^{-5}$  мм;  $n = 5,023$ );  $n_z = 3000$  об/мин;  $n_b = 200$  об/мин;  $P = 80H$ ;

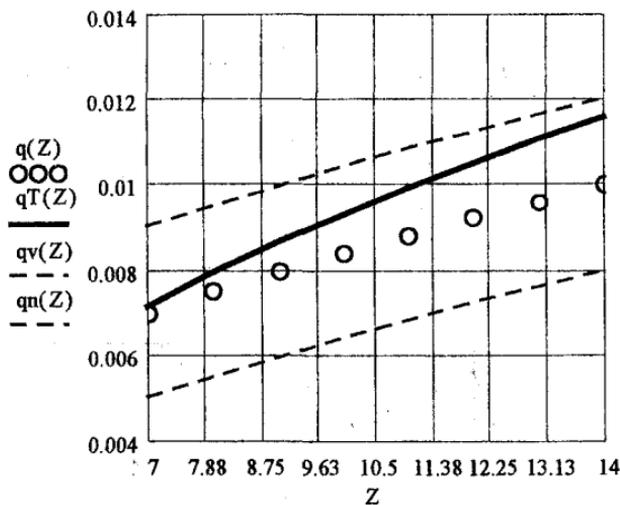


Рис. 2.23. Зависимость съема металла (мм) от зернистости инструмента  $Z$ , мкм:  $q_T(Z)$  - теоретическая зависимость;  $q(Z)$  - экспериментальная зависимость;  $q_v(Z)$  и  $q_n(Z)$  - доверительные интервалы

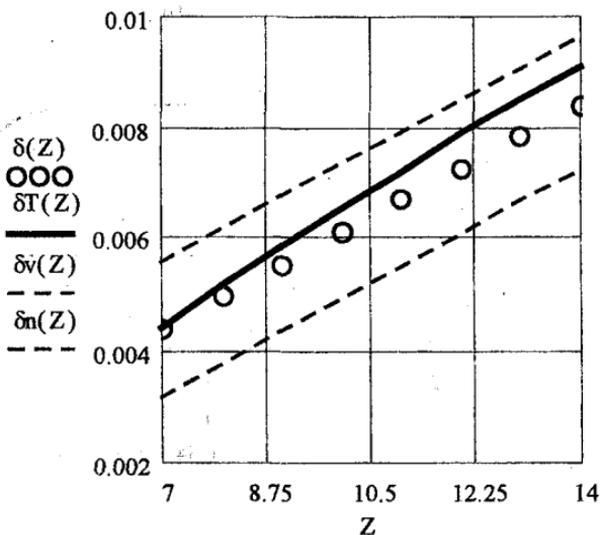


Рис. 2.24. Зависимость выпуклости профиля заготовки (мм) от размера  $Z$  зерен инструмента, мкм:  $\delta_T(Z)$  - теоретическая зависимость;  $\delta(Z)$  - экспериментальная зависимость;  $\delta_v(Z)$  и  $\delta_n(Z)$  - доверительные интервалы

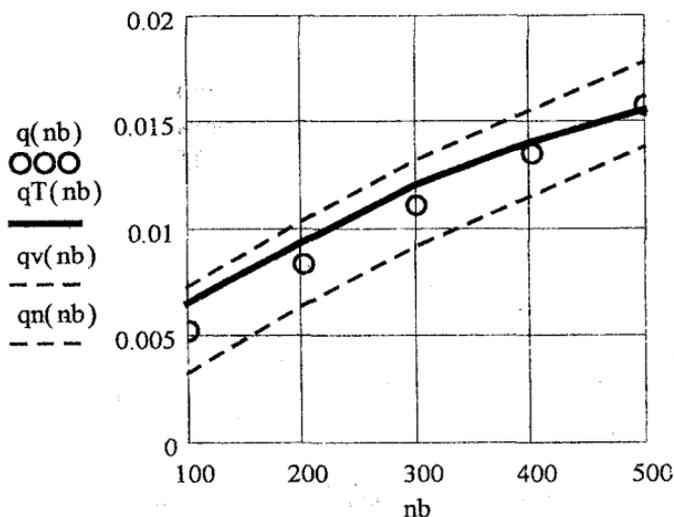


Рис. 2.25. Зависимость съема металла (мм) от частоты вращения инструментальной головки  $nb$ , об/мин:  $qT(nb)$  - теоретическая зависимость;  $q(nb)$  - экспериментальная зависимость;  $qv(nb)$  и  $qn(nb)$  - доверительные интервалы

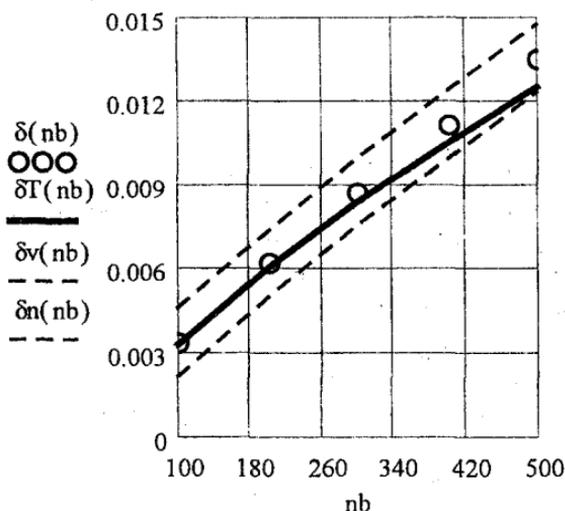


Рис. 2.26. Зависимость выпуклости профиля заготовки (мм) от частоты вращения инструментальной головки  $nb$ , об/мин:  $\delta T(nb)$  - теоретическая зависимость;  $\delta(nb)$  - экспериментальная зависимость;  $\delta v(nb)$  и  $\delta n(nb)$  - доверительные интервалы

Доверительные интервалы подсчитывались по общепринятой методике.

Среднее квадратическое отклонение экспериментальных данных  $s$  находилось путем обработки опытных данных. Число опытов в каждой точке опыта составляло  $n=3$ . В зависимости от числа степеней свободы  $k = n - 1$  и доверительной вероятности  $\gamma = 0,95$  по таблице Стьюдента определялось отклонение  $\beta$ . В частности, при  $k = 2$  и  $\gamma = 0,95$  отклонение  $\beta = 4,303$ . Затем по формуле

$$\varepsilon = \frac{\beta \cdot s}{\sqrt{n}}$$

находилась точность статистической оценки  $\varepsilon$ .

Доверительные границы определялись по формулам:

$$xv = x0 + \varepsilon;$$

$$xp = x0 - \varepsilon;$$

где  $x0$  - экспериментальное значение искомой величины;

$xv$  и  $xp$  - доверительные границы.

Как видно из рис. 2.23-2.26, результаты теоретических исследований адекватно описывают опытные данные. Следовательно, выполненный выше анализ достаточно точно описывает механизм удаления припуска при формообразующем суперфинишировании и его можно использовать в практических целях.

## Выводы

1. Выполнены исследования кинематических особенностей формообразующего суперфиниширования поверхностей типа дорожек качения наружных колец роликоподшипников. Выявлены закономерности формирования профиля абразивного бруска.

2. Рассмотрен механизм съема припуска и формирования профиля обрабатываемой поверхности в процессе формообразующего суперфиниширования и засаливания абразивного инструмента. Теоретически обоснована возможность рационального профилирования обрабатываемой поверхности при обеспечении начального линейного контакта бруска с изделием и периодического взаимодействия отдельных участков его рабочей поверхности с соответствующими участками поверхности заготовки в условиях нестационарных режимных факторов.

3. Разработана программа расчета в среде MathCAD PLUS 7.0 PRO, позволяющая вычислять с учетом указанных факторов радиус профиля бруска, глубину его контакта с заготовкой, ширину площадки контакта, ко-

эффицент засаливания брусков, съем металла вдоль профиля заготовки и величину ее выпуклости.

4. Аналитически исследовано влияние технологических факторов на параметры обработки. Показано, что наибольшее влияние на съем припуска и эффективность формообразования оказывают время обработки, частота вращения инструментальной головки и зернистость инструмента. Увеличение технологических факторов процесса приводит к возрастанию интенсивности съема припуска и формообразования обрабатываемой поверхности.

# ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

## 3.1. Объект и условия проведения исследований

Результаты исследований, выполненных в гл.2, показали, что при формообразующем суперфинишировании основное влияние на основные показатели качества обрабатываемой поверхности и на производительность процесса оказывают такие технологические факторы, как окружная скорость заготовки, угол наклона головки к оси заготовки, частота вращения инструментальной головки, давление брусков на обрабатываемую поверхность, время обработки и характеристика абразивных брусков.

Большое количество исследуемых факторов вызвало необходимость поэтапного проведения экспериментальных исследований, которые осуществлялись в условиях производства Научно-производственного предприятия нестандартных изделий машиностроения (НПП НИМ) с использованием его технологического оборудования. Измерение колец подшипников проводилось в измерительной лаборатории ОАО СПЗ-3.

Первый этап экспериментов заключался в исследовании степени влияния продолжительности обработки и характеристики брусков на выходные параметры обработки. На втором этапе определялось влияние режимов суперфиниширования на показатели качества колец.

Таким образом, цикл экспериментальных исследований состоял из следующих этапов:

Исследование влияния на величину съема металла  $q$ , величину выпуклости профиля  $\delta$ , шероховатость  $R_a$ , некруглость  $\Delta_{кр}$  и волнистость  $W_z$  поверхности, времени обработки  $\tau$ , твердости HRC и зернистости  $Z$  брусков.

Определение влияния угла пересечения осей вращения заготовки и инструментальной головки  $\alpha$ , частоты вращения брусков ( $n_b$ ), силы прижима брусков к обрабатываемой поверхности ( $P$ ) и частоты вращения изделия ( $n_z$ ) на величину съема металла  $q$ , волнистость  $W_z$  и отклонение от круглости  $\Delta_{кр}$  обрабатываемой поверхности, величину выпуклости профиля  $\delta$  и шероховатость  $R_a$ .

Весь цикл экспериментов проводился на многобрусковом суперфинишном автомате модели ВДА-70 производства НПП НИМ, позволяющем в широких пределах варьировать значениями исследуемых факторов.

В качестве объекта исследований использовали наружные кольца

Базовые поверхности  
обозначены "V"

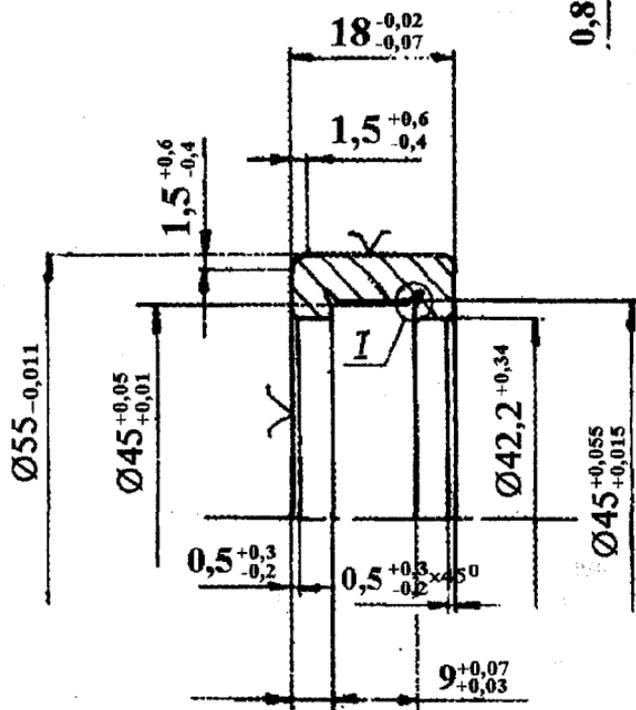
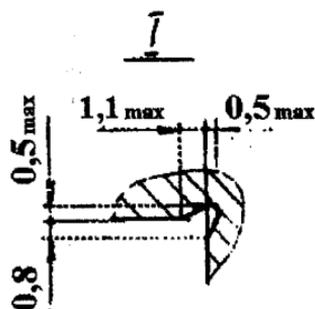


Рис. 3.1. Чертеж внутреннего кольца роликоподшипника 92705

радиального роликового подшипника № 92705 (рис. 3.1), как наиболее типичного представителя продукции, выпускаемой подшипниковой промышленностью. Кольца роликоподшипников изготовлены из стали ШХ-15 ГОСТ-801-78 и термически обработаны до твердости HRC 61...65. Выбор этой стали для проведения экспериментальных исследований обусловлен широким применением ее 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 ГОСТ 520-71. Роликовые дорожки подвергались предварительному и окончательному шлифованию и имели показатели качества поверхности дорожки качения, представленные в табл. 3.1.

Таблица 3.1

*Геометрические параметры колец подшипников перед суперфинишной обработкой*

Наименование параметров	Значения параметров
Волнистость поверхности, $W_z$ , мкм	0,50-1,10
Некруглость поверхности, Н, мкм	1,67-2,28
Шероховатость поверхности, $R_a$ , мкм	0,25-0,32
Выпуклость (+) или вогнутость (-) профиля $\Delta$ , мкм	- 0,5 ÷ -1,0

В процессе экспериментальных исследований использовали 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 поверхности деталей машин.

Обработку производили одним абразивным бруском, жестко закрепленным в державке инструментальной головки.

Условия проведения экспериментальных исследований представлены в табл. 3.2. Они были определены на основе изучения работ ряда авторов, расчетов и теоретических исследований, а также путем анализа результатов предварительных опытов [72-74, 118, 119].

Таблица 3.2

*Условия проведения экспериментальных исследований*

Наименование факторов процесса	Единицы измерения	Численные значения факторов
1	2	3
1. Абразивные бруски $12 \times 10 \times 25$ мм		БП12х663СМ7СМ1КЛ БП12х663СМ7М1КЛ БП12х663СМ14М1КЛ БП12х663СМ14СМ1КЛ
2. Частота вращения инструментальной головки	об/мин.	50 - 200
3. Сила прижима брусков	Н	40 - 120

1	2	3
4. Частота вращения заготовки	об/мин	940-2900
5. $\alpha$	градус	1° - 3°
6. Время обработки	с	3- 10
7. Твердость абразивных брусков	HRC	20 - 50
8. Зернистость абразивных брусков	мкм	M7 - M14
Смазывающе - охлаждающая жидкость (СОЖ)		Велосит (88%), керосин (10%), олеиновая кислота (2%)
10. Способ подачи СОЖ		поливом
11. Расход СОЖ	л/мин	20

### 3.2. Экспериментальная установка, измерительные приборы и оборудование

Общий вид экспериментального однопозиционного суперфинишного автомата с вертикальным расположением шпинделей изделий и суперфинишной головки производства Научно-производственного предприятия нестандартных изделий машиностроения представлен на рис. 3.2.

Внутри сварной станины автомата расположена бабка изделия, а на столе станка на специальной стойке закреплена инструментальная головка. В корпусе бабки изделия расположен шпиндель, внутренняя поверхность которого играет роль гидроцилиндра. Поршень гидроцилиндра соединен со штоком, на конце которого в гидростатических опорах устанавливается заготовка.

Для осуществления подвода брусков к обрабатываемой поверхности, создания рабочего давления в зоне обработки и отвода брусков от обрабатываемой поверхности применен гидравлический цилиндр двухстороннего действия.

Конструкцией станка предусмотрено устройство компенсации износа брусков, которое осуществляет автоматическое регулирование величины подвода и отвода державок в зависимости от износа брусков. Вращение шпинделя инструментальной головки осуществляется от двигателя постоянного тока. На конце шпинделя закреплен упор для крепления заготовки.

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

В станине смонтирована насосная установка гидросистемы станка и устройство для центробежной очистки СОЖ.

Путем разворота инструментальной головки относительно своей оси перед началом обработки ось шпинделя изделия устанавливается под заданным углом относительно оси инструментальной головки, после чего бабка изделия фиксируется на станине. Упор инструментальной головки устанавливается так, чтобы в рабочем положении заготовка была установлена симметрично относительно оси разворота бабки изделия. Абразивные бруски за счет изменения длины державок устанавливаются также симметрично относительно вертикальной оси поворота бабки изделия.

В исходном положении шпиндели изделия и инструментальной головки вращаются, а поршень шпинделя изделия находится в крайнем левом положении. В рабочую зону автооператора поступает очередная заготовка и автоматически фиксируется соосно со шпинделем изделия.

От специального гидропривода поршень шпинделя изделия перемещается вправо. На своем пути конец штока поршня захватывает заготовку, заготовка центрируется на нем с помощью гидростатического устройства и прижимается им к упору инструментальной головки. Тем самым заготовка ориентируется в необходимом положении относительно абразивных брусков. Срабатывает гидропривод инструментальной головки, прижимая абразивные бруски к заготовке и обеспечивая ее обработку.

После обработки бруски отводятся от обрабатываемой поверхности, поршень изделия перемещается влево, заготовка попадает в автооператор, освобождаясь там от штока и падая в накопитель. Далее цикл повторяется.

Станок может работать в наладочном и автоматическом режимах.

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 проведения экспериментальных исследований станок оснастили контрольно-измерительными приборами.

Контроль частоты вращения изделия и инструментальной головки осуществляли с помощью измерительных дисков, установленных на шкивах шпинделей изделий, инструмента и индукционных датчиков, электрически связанных с цифровыми тахометрами модели ТЦ-5.

Силу прижима абразивных брусков к обрабатываемой поверхности контролировали динамометром модели ДП-20, который устанавливали на лоток подачи заготовок в рабочую зону с возможностью взаимодействия с

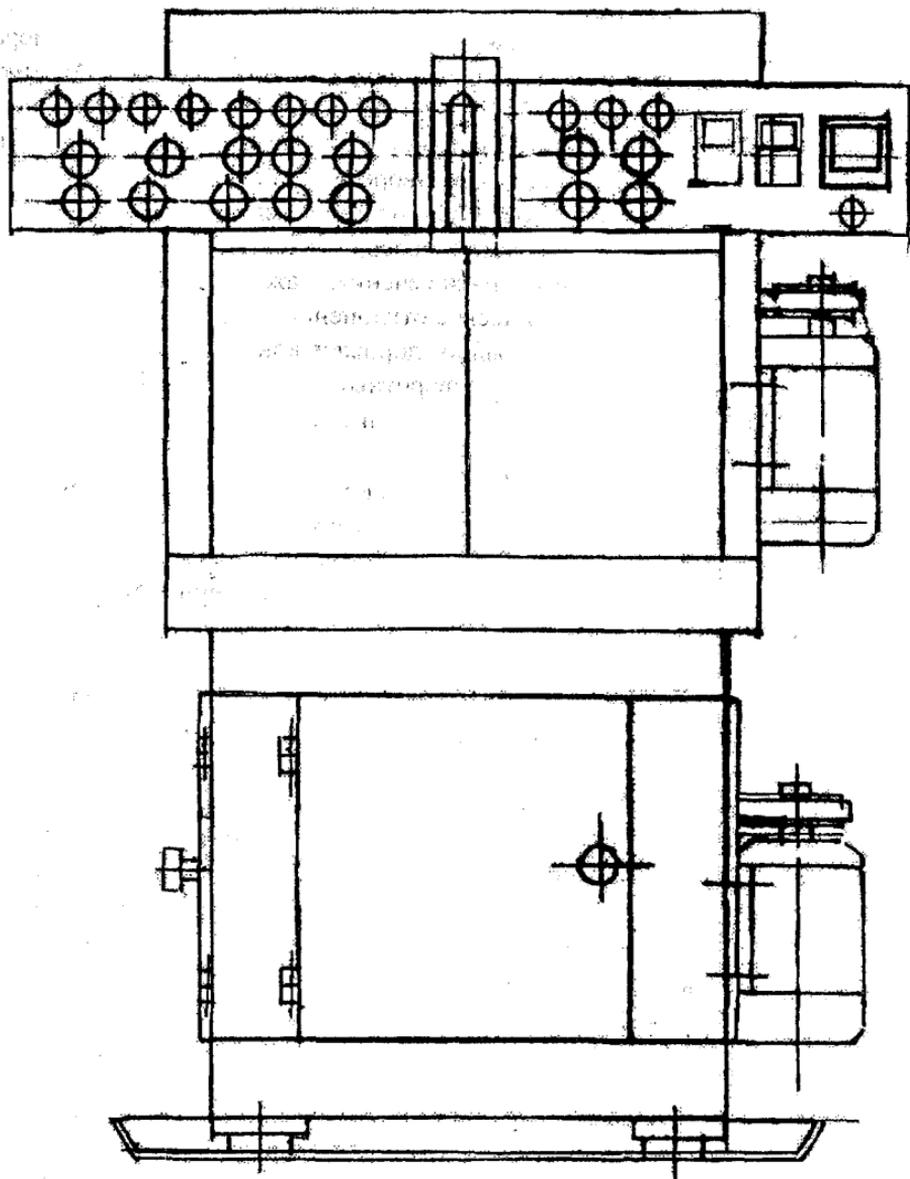


Рис. 3.2. Общий вид автомата ВДА-70Н

одним из рычагов инструментальной головки.

Время цикла обработки устанавливали с помощью реле времени. Измерение твердости абразивных брусков производили на приборе Роквелла ГОСТ 13407-67 по методике, изложенной в ГОСТ 18202-73.

Контроль диаметрального съема металла производили путем замера диаметра дорожки качения до и после обработки на приборе Д422М микрокаторами модели ШГП ГОСТ 6933-72 с ценой деления 0,0005 мм при постоянной температуре 20<sup>0</sup>С. Постоянство температуры обеспечивали выдержкой колец в 5%-ном водном растворе кальцинированной соды емкостью 10 литров при температуре 20<sup>0</sup>С в течение 5 минут.

Шероховатость обрабатываемой поверхности определяли как среднее значение из пяти измерений в пяти сечениях каждого из обработанных изделий /124/. Среднее арифметическое отклонение микропрофиля обработанной поверхности и форму профиля дорожки контролировали с помощью профилограф-профилометра "Поворотный Телисерф-4" путем записи и последующего анализа профилограмм, записанных с увеличением 20000 и 10000 соответственно.

Отклонение от круглости  $\Delta_{кр}$  и волнистость  $W_z$  обработанной поверхности изделия определяли по круглограммам, записанным с помощью прибора "Талиронд" модели 51. Запись волнистости осуществляли с фильтром С, некруглости- с фильтром В при увеличении 5000, 10000, 20000.

### **3.3. Методика проведения многофакторного эксперимента и обработки экспериментальных данных**

Процесс обработки суперфинишированием является процессом многофакторным, поэтому для учета влияния всех факторов на технологические показатели обработки использовали рациональные 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 [120-125].

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 [120]. 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 [125].

Для определения механизма влияния исследуемых факторов на результаты обработки использовали интерполяционные модели на основе степенных функций. Модели для первой части эксперимента представлены в виде:

$$\begin{aligned}
 \delta &= C_{\delta} \cdot \tau^{e_{\delta}} \cdot HRA^{k_{\delta}} \cdot Z^{l_{\delta}}; \\
 q &= C_q \cdot \tau^{e_q} \cdot HRA^{k_q} \cdot Z^{l_q}; \\
 R_a &= C_R \cdot \tau^{e_R} \cdot HRA^{k_R} \cdot Z^{l_R}; \\
 W_z &= C_W \cdot \tau^{e_W} \cdot HRA^{k_W} \cdot Z^{l_W}; \\
 \Delta &= C_{\Delta} \cdot \tau^{e_{\Delta}} \cdot HRA^{k_{\Delta}} \cdot Z^{l_{\Delta}}.
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Модели для второй части экспериментов:

$$\begin{aligned}
 \delta &= C_{\delta} \cdot n_z^{a_{\delta}} \cdot n_b^{b_{\delta}} \cdot P^{c_{\delta}} \cdot \alpha^{d_{\delta}}; \\
 q &= C_q \cdot n_z^{a_q} \cdot n_b^{b_q} \cdot P^{c_q} \cdot \alpha^{d_q}; \\
 R_a &= C_{\delta} \cdot n_z^{a_R} \cdot n_b^{b_R} \cdot P^{c_R} \cdot \alpha^{d_R}; \\
 W_z &= C_W \cdot n_z^{a_W} \cdot n_b^{b_W} \cdot P^{c_W} \cdot \alpha^{d_W}; \\
 \Delta &= C_{\Delta} \cdot n_z^{a_{\Delta}} \cdot n_b^{b_{\Delta}} \cdot P^{c_{\Delta}} \cdot \alpha^{d_{\Delta}}.
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

В формулах (3.1) и (3.2) используются следующие обозначения:

$q$  - толщина снимаемого металла, мкм;

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

$\delta$  - величина выпуклости обработанной поверхности, мкм;

$W_z$  - амплитуда волнистости обработанной поверхности, мкм;

$\Delta$  - отклонение от круглости обработанной поверхности, мкм;

$C$  - коэффициенты пропорциональности;

$a - l$  - показатели степеней;

$n_z$  - частота вращения заготовки;

$n_b$  - частота вращения инструментальной головки;

$P$  - сила прижима бруска к заготовке, Н;

$\alpha$  - угол пересечения осей инструментальной головки и заготовки, град;

$\tau$  - время обработки, с;

$HRC$  - твердость брусков;

$Z$  - зернистость бруска, мкм.

Путем логарифмирования выражения (3.1) и (3.2) привели к линейному виду:

$$\ln \delta = \ln C_{\delta} + e_{\delta} \ln \tau + k_{\delta} \ln HRA + l_{\delta} \ln Z ;$$

$$\ln q = \ln C_q + e_q \ln \tau + k_q \ln HRA + l_q \ln Z ;$$

$$\ln R = \ln C_R + e_R \ln \tau + k_R \ln HRA + l_R \ln Z ;$$

$$\ln W = \ln C_W + e_W \ln \tau + k_W \ln HRA + l_W \ln Z ;$$

$$\ln \Delta = \ln C_{\Delta} + e_{\Delta} \ln \tau + k_{\Delta} \ln HRA + l_{\Delta} \ln Z .$$

$$\ln \delta = \ln C_{\delta} + a_{\delta} \ln n_z + b_{\delta} \ln n_b + c_{\delta} \ln P + d_{\delta} \ln \alpha ;$$

$$\ln q = \ln C_q + a_q \ln n_z + b_q \ln n_b + c_q \ln P + d_q \ln \alpha ;$$

$$\ln R_a = \ln C_R + a_R \ln n_z + b_R \ln n_b + c_R \ln P + d_R \ln \alpha ;$$

$$\ln W = \ln C_W + a_W \ln n_z + b_W \ln n_b + c_W \ln P + d_W \ln \alpha ;$$

$$\ln \Delta = \ln C_{\Delta} + a_{\Delta} \ln n_z + b_{\Delta} \ln n_b + c_{\Delta} \ln P + d_{\Delta} \ln \alpha .$$

Для исследования данного процесса суперфиниширования применили полный факторный эксперимент, при этом выбрали линейную модель уравнения регрессии, которая в кодированном виде записывается следующим образом:

для первой части экспериментов -

$$y = b_0 \cdot x_0 + b_1 x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3 ;$$

для второй части экспериментов -

$$y = b_0 \cdot x_0 + b_1 x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{14} x_1 x_4 + b_{23} x_2 x_3 + b_{24} x_2 x_4 + b_{34} x_3 x_4 + b_{1234} x_1 x_2 x_3 x_4 ;$$

где  $y$  - натуральные логарифмы параметра оптимизации;

$b_i$  - коэффициенты уравнения регрессии;

$x_i$  - факторы в кодированном виде.

Факторы, их уровни и интервалы варьирования при проведении всего экспериментального цикла приведены в табл.3.3 и 3.4. Расчеты произведены по формулам методики [120].

Первая часть экспериментов проводилась с использованием следующих значений параметров второй части экспериментов: абразивный брусок имел характеристику 63СМ7СМ1КЛ, а продолжительность обработки составляла 6 секунд.

Во второй части исследований режимы обработки имели следующие значения: частота вращения изделия - 2900 об/мин, частота вращения инструментальной головки - 50 об/мин, сила прижима брусков к обрабаты-

ваемой поверхности - 70 МПа, угол скрещивания осей вращения заготовки и инструмента -  $1^{\circ}$ .

Таблица 3.3

Действительные значения факторов, исследуемых во второй части экспериментальных исследований

Уровни варьирования	$n_z$ , об/мин	$n_b$ , об/мин	$P$ , МПа	$\alpha$ , град
верхний	2900	200	120	3
нижний	940	50	40	1
средний	1920	125	80	2
интервал	1960	150	80	2
условные обозначения	X1	X2	X3	X3

Таблица 3.4

Действительные значения факторов, исследуемых в первой части экспериментальных исследований

Уровни варьирования	$\tau$ сек	HRA, ед	$z$ , мкм
верхний	10	50	14
нижний	3	20	7
средний	6	35	10
интервал	7	30	7
условные обозначения	X1	X2	X3

Введя специальные обозначения, при которых верхний уровень факторов соответствовал +1, нижний -1, а основной 0, на первом этапе исследования строили планы матрицы планирования полного факторного эксперимента типа  $2^3$ , а на втором  $2^4$ .

Обработку результатов экспериментов и построение линейной модели уравнения регрессии производили по стандартной методике [120], а результаты заносили в журнал планирования эксперимента.

Значения коэффициентов пропорциональности и показателей степеней в интерполяционных моделях исследуемого процесса определяли по методике, изложенной в работе [120]. При этом, для перехода от кодированных значений факторов к их действительным значениям использовали уравнения преобразования, которые для факторов первой фазы экспериментов имеют вид:

$$x_1 = \frac{2(\ln \tau - \ln \tau_{\max})}{\ln \tau_{\max} - \ln \tau_{\min}} + 1; \quad x_2 = \frac{2(\ln HRA - \ln HRA_{\max})}{\ln HRA_{\max} - \ln HRA_{\min}} + 1;$$

$$x_3 = \frac{2(\ln Z - \ln Z_{\max})}{\ln Z_{\max} - \ln Z_{\min}} + 1$$

Для факторов второй фазы экспериментов уравнения преобразования имеют вид:

$$x_1 = \frac{2(\ln n_z - \ln n_{z \max})}{\ln n_{z \max} - \ln n_{z \min}} + 1; \quad x_2 = \frac{2(\ln n_b - \ln n_{b \max})}{\ln n_{b \max} - \ln n_{b \min}} + 1;$$

$$x_3 = \frac{2(\ln P - \ln P_{\max})}{\ln P_{\max} - \ln P_{\min}} + 1; \quad x_4 = \frac{2(\ln \alpha - \ln \alpha_{\max})}{\ln \alpha_{\max} - \ln \alpha_{\min}} + 1$$

На третьем этапе исследований после определения рациональных режимов обработки осуществили производственные испытания предложенного способа суперфиниширования, условия проведения которых, а также их результаты представлены в гл.5.

### Выводы

Разработана методика экспериментальных исследований влияния режимов суперфиниширования, характеристики применяемых брусков и времени обработки на показатели процесса и величину выпуклости профиля обработанной поверхности.

2. Подготовлен к проведению экспериментальных исследований опытный образец суперфинишного автомата для доводки дорожек качения подшипников.

## ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ФОРМООБРАЗУЮЩЕГО СУПЕРФИНИШИРОВАНИЯ

### 4.1. Зависимость эффективности и качества обработки от характеристики инструмента и времени суперфиниширования

Статистическая обработка экспериментальных исследований позволила получить следующие эмпирические модели, отражающие влияние на съем припуска, величину выпуклости, шероховатость, волнистость и отклонение от круглости обрабатываемой поверхности времени обработки, зернистости и твердости инструмента:

$$\begin{aligned}\delta &= 53.39 \cdot 10^{-3} \cdot do^{0,941} \cdot HRA^{0,34} \cdot \tau^{0,54}; \\ q &= 2,551 \cdot 10^{-3} \cdot Z^{0,51} \cdot \tau^{0,3} \cdot HRA^{-0,34}; \\ R_a &= 0,041 \cdot \tau^{-0,78} \cdot HRA^{0,17} \cdot Z^{0,81}; \\ W_z &= 0,136 \cdot \tau^{-0,33} \cdot HRA^{0,23} \cdot Z^{-0,37}; \\ \Delta &= 2,59 \cdot \tau^{-0,69} \cdot HRA^{0,36} \cdot Z^{-0,40}.\end{aligned}\tag{4.1}$$

Принятые обозначения и размерность величин в формуле (4.1) указаны в гл.3. Зависимости получены при обработке на следующих режимах:

$$n_z = 1950 \text{ об/мин.}, n_b = 125 \text{ об/мин.}, P = 80 \text{ Н и } \alpha = 2^0.$$

На рис. 4.1 и 4.2 показаны зависимости шероховатости поверхности заготовки от времени обработки, зернистости и твердости инструмента.

Как видно из рис. 4.1, с увеличением времени обработки шероховатость поверхности сначала резко уменьшается, а затем стабилизируется. Объясняется это тем, что сначала инструмент снимает шероховатый слой припуска, но по мере его удаления формируется новый стабильный шероховатый слой. Значительное влияние на шероховатость поверхности оказывает зернистость инструмента (рис. 4.2). С увеличением зернистости шероховатость поверхности возрастает. Объясняется это тем, что абразивные зерна в крупнозернистом инструменте более прочно закреплены в связке, чем в мелкозернистом, и, следовательно, они могут внедряться в обрабатываемую поверхность на большую глубину.

С возрастанием твердости инструмента прочность удержания зерен связкой также увеличивается, и поэтому шероховатость поверхности с увеличением твердости возрастает. Однако, как известно, твердость инструмента на прочность удержания зерен связкой оказывает меньшее влияние, чем зернистость, очевидно, поэтому ее влияние и на шероховатость поверхности менее значительное, чем зернистости.

Волнистость обрабатываемой поверхности менее существенно зависит

Шероховатость  $R_a$ , мкм

M7  
 $\tau$   
M10  
 $\tau$   
M14  
 $\tau$

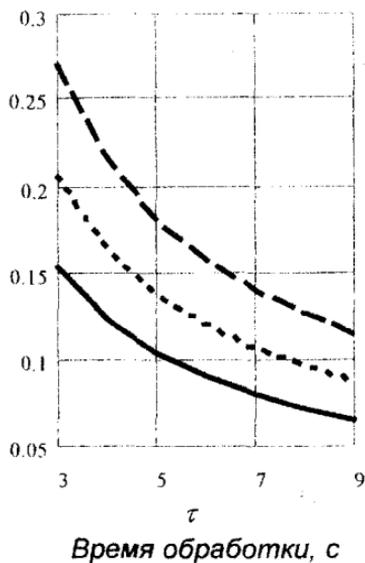


Рис. 4.1. Зависимость шероховатости поверхности заготовки  $R_a$  от времени обработки  $\tau$  при зернистости брусков M7, M10 и M14

Шероховатость  $R_a$ , мкм

HRA20<sub>Z</sub>  
HRA35<sub>Z</sub>  
HRA50<sub>Z</sub>

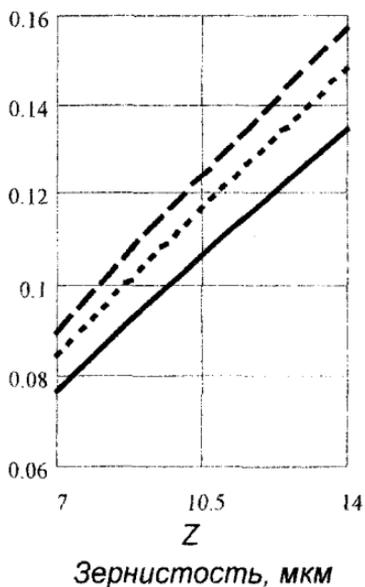


Рис. 4.2. Зависимость шероховатости поверхности заготовки  $R_a$  от зернистости инструмента  $Z$  и его твердости HRA

от технологических факторов, чем шероховатость поверхности. Из рис. 4.3 и 4.4 видно, что с возрастанием времени обработки с 3 с до 9 с (в три раза) волнистость поверхности уменьшается всего на 20-30%. С увеличением твердости инструмента с 20 до 50 ед. (в 2, 5 раза) волнистость поверхности возрастает всего на 15-20%. Более существенное влияние оказывает зернистость инструмента: с возрастанием зернистости в 2 раза волнистость увеличивается до 70%.

Объясняется это тем, что на величину волнистости наиболее существенное влияние оказывает жесткость кинематической связи инструмента и заготовки. Так как на станке, который использовался для экспериментальных исследований, абразивный брусок подавался на заготовку от жесткого механизма подачи, то относительные упругие перемещения заготовки и инструмента во впадинах и на гребнях волн были незначительны. Это компенсировалось повышенной нагрузкой на гребнях волн и их удалением с обрабатываемой поверхности.

Повышенное влияние на волнистость обработанной поверхности зернистости инструмента объясняется тем, что с возрастанием зернистости увеличивается глубина царапин от абразивных зерен, а так как они режут на разной глубине, то и разновысотность кольцевых канавок от зерен на обработанной поверхности с возрастанием зернистости увеличивается. Что и вызывает повышенную волнистость поверхности.

На рис. 4.5 и 4.6 представлены результаты исследования влияния времени обработки и характеристики инструмента на отклонение от круглости обработанной поверхности.

Как видно из рис. 4.5, время обработки более существенно влияет на отклонение от круглости, чем на величину волнистости обработанной поверхности. Объясняется это тем, что величина отклонения от круглости существенно больше величины волнистости и поэтому для ее удаления необходимо снять более значительный припуск. Если величина волнистости поверхности формируется за несколько первых оборотов заготовки, то для удаления отклонений от круглости необходимо значительное время. Однако со временем интенсивность исправления этой погрешности падает.

С возрастанием зернистости инструмента отклонение от круглости уменьшается (рис. 4.6). Это связано с тем, что более крупнозернистый инструмент обеспечивает более высокую интенсивность снятия припуска, чем мелкозернистый, а, следовательно, с повышением зернистости инструмента более активно удаляются гребешки неровностей.

Важно отметить, что менее твердый абразивный инструмент обеспечивает меньшее значение данной погрешности, чем более твердый инструмент. Объясняется это тем, что твердый инструмент более интенсивно засаливается, отчего его режущие свойства снижаются.

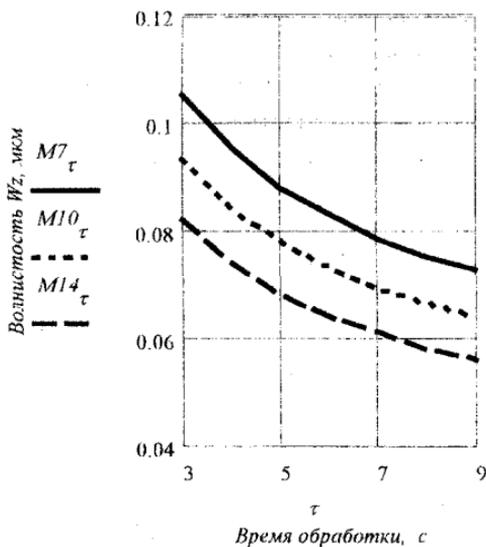


Рис. 4.3. Влияние времени обработки  $\tau$  при зернистости брусков M7, M10 и M14 на волнистость обработанной поверхности

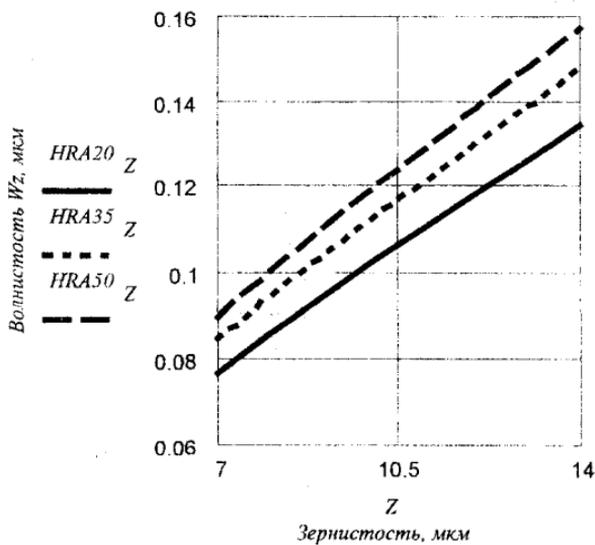


Рис. 4.4. Влияние зернистости инструмента  $Z$  и его твердости HRA на волнистость обработанной поверхности

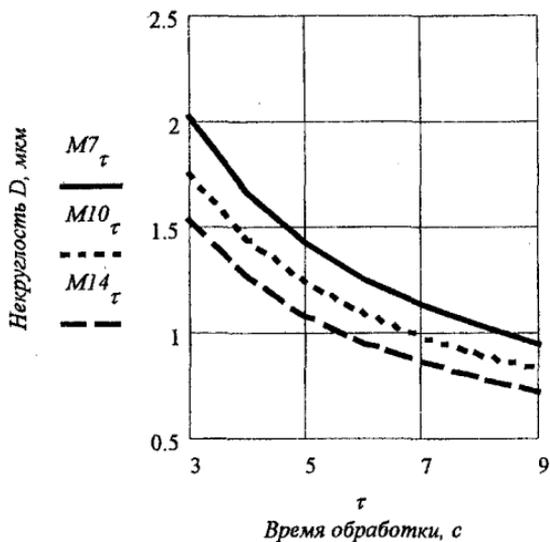


Рис. 4.5. Зависимость отклонения от круглости обработанной поверхности от времени обработки  $\tau$  при зернистости брусков M7, M10 и M14

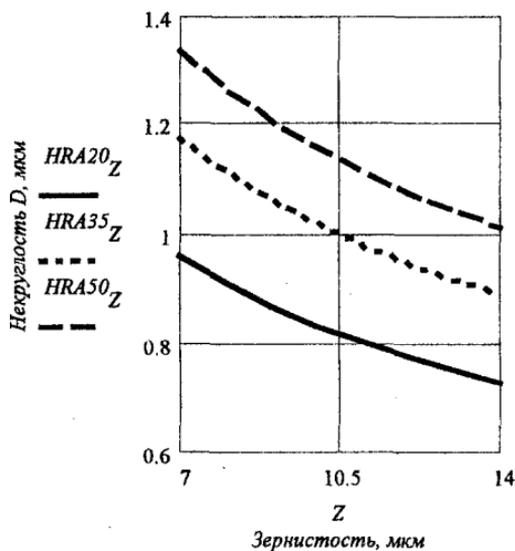


Рис. 4.6. Зависимость отклонения от круглости обработанной поверхности от зернистости инструмента  $Z$  и его твердости HRA

Высокая исправляющая способность исследуемого способа обработки, позволяющая существенно снижать даже погрешности с большим шагом, такие, как некруглость, положительно отличает его от классического суперфиниширования, при котором абразивный брусок с постоянной силой прижима скользит по вершинам и впадинам таких неровностей, снимая равный припуск.

Еще одним отличительным свойством исследуемого способа обработки является непрерывный съем металла в процессе длительного времени обработки. Как видно из рис. 4.7, в нашем случае съем металла сначала идет более интенсивно, а затем после удаления исходного шероховатого слоя стабилизируется и почти линейно зависит от времени. Таким образом, исследуемый способ обработки позволяет снимать регламентируемые слои материала заготовки и при необходимости удалять с поверхности различного рода дефекты.

Весьма существенное влияние на съем металла при суперфинишировании оказывает зернистость инструмента (рис. 4.8). Это влияние зернистости объясняется тем, что, во-первых, абразивные зерна крупнозернистого инструмента срезают более толстые стружки, чем зерна мелкозернистого инструмента, а, следовательно, удаляют с поверхности больше материала в единицу времени. Во-вторых, крупнозернистый инструмент имеет более крупные поры на своей рабочей поверхности, и, следовательно, внешняя нагрузка на инструмент в большей степени используется на резание, чем на трение стружки и шлама с обрабатываемой поверхностью. Все это и обеспечивает повышенные режущие свойства крупнозернистого инструмента.

Способность процесса к самоочистке рабочей поверхности инструмента объясняет влияние на съем металла твердости инструмента. Как видно из рис. 4.8, с уменьшением твердости инструмента съем металла возрастает. Но этот фактор оказывает слабое влияние на результаты обработки, так как исследуемый процесс обеспечивает хорошую очистку рабочей поверхности инструмента независимо от его твердости. Это заложено в кинематике исследуемого процесса, которая обеспечивает периодический выход из зоны контакта с заготовкой каждой точки рабочей поверхности и тем самым возможность освобождаться от стружки и шлама.

На рис. 4.9 и 4.10 представлены зависимости выпуклости профиля заготовки от исследуемых факторов. Из рис. 4.9 видно, что с течением времени обработки выпуклость профиля возрастает. Объясняется это тем, что при круговом движении инструментальной головки линия контакта абразивного бруска вдоль обрабатываемой поверхности движется по синусоидальному закону. При этом скорость движения этой линии в центре профиля превышает скорость ее движения по краям профиля. Следовательно, при хорошей очистке рабочей поверхности бруска от стружки и шлама по краям профиля брусок

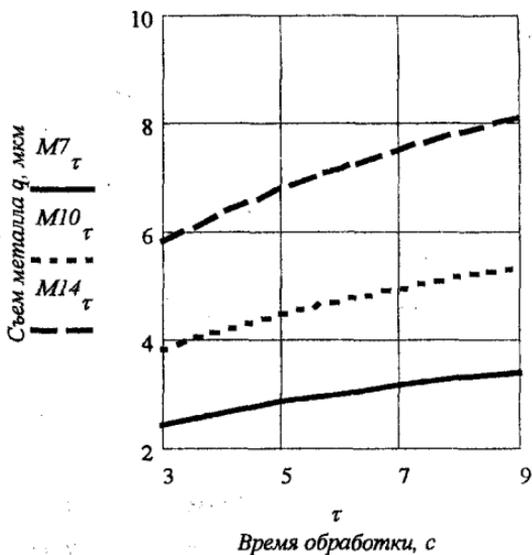


Рис. 4.7. Зависимость съема металла на диаметр  $q$  от времени обработки  $\tau$  при зернистости брусков M7, M10 и M14

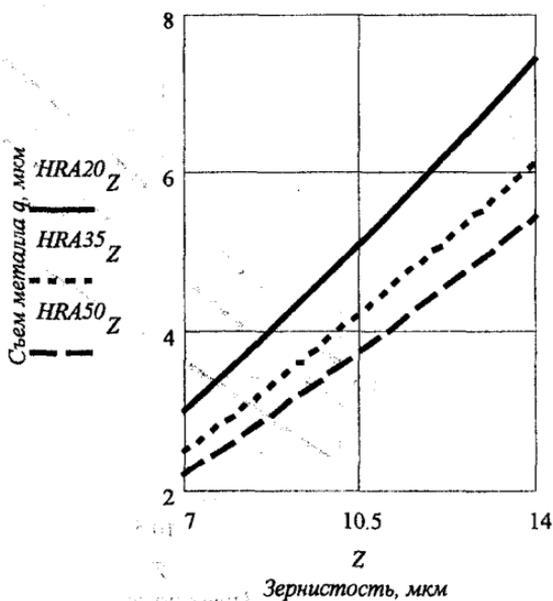


Рис. 4.8. Зависимость съема металла на диаметр  $q$  от зернистости инструмента  $Z$  и его твердости HRA

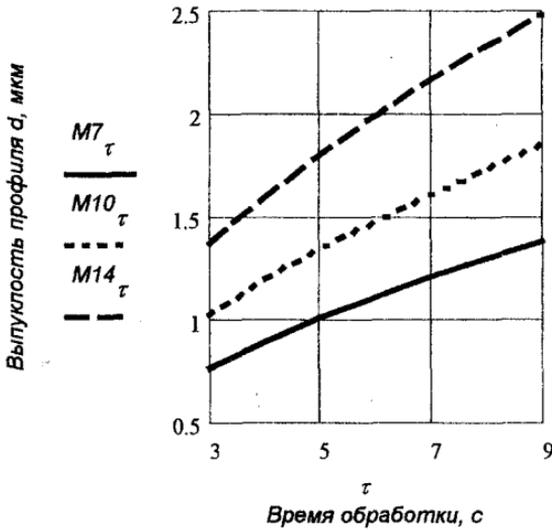


Рис. 4.9. Влияние времени обработки  $\tau$  при зернистости брусков  $M7$ ,  $M10$  и  $M14$  на выпуклость профиля обработанной поверхности

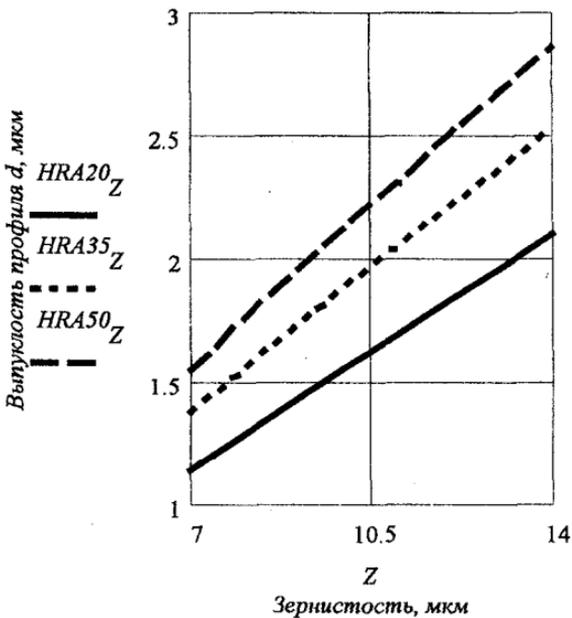


Рис. 4.10. Влияние зернистости инструмента  $Z$  и его твердости  $HRA$  на выпуклость профиля обработанной поверхности

будет снимать больше металла, чем по центру профиля. Это и обеспечивает возможность придания заготовке выпуклой формы.

Этот процесс идет медленно, формирование профиля осуществляется по мере снятия припуска. На практике часто важна не сама выпуклость профиля, а тенденция к его образованию. Классический процесс суперфиниширования обладает тенденцией к образованию вогнутости профиля, а это недопустимо, так как при вогнутом профиле детали в процессе работы подшипника возникает краевой эффект, в результате которого по краю площадки контакта возникают критические напряжения, часто приводящие к преждевременному выходу подшипника из строя. В технических условиях на операцию суперфиниширования некоторые заводы указывают: «допустима выпуклость профиля до 2 мкм». Однако в тяжело нагруженных роликовых подшипниках, работающих в условиях перекоса колец, иногда создают бомбину на роликах или кольцах до 6-10 мкм, что существенно увеличивает долговечность подшипников. Но обычно это трудно осуществимо технологически.

Исследуемый способ обработки позволяет легко создавать выпуклость профиля колец подшипников на операции суперфиниширования.

Особенно существенно величина выпуклости профиля обработанной поверхности зависит от зернистости инструмента (рис. 4.10). Увеличение зернистости в два раза приводит к возрастанию выпуклости профиля на 70%. Объясняется это тем, что более крупнозернистый инструмент обеспечивает более интенсивное снятие припуска, а, следовательно, более интенсивное формирование геометрической формы заготовки.

Твердость инструмента также оказывает влияние на величину выпуклости. Причем с увеличением твердости инструмента величина выпуклости возрастает, хотя, как мы видели на рис. 4.8, съем металла при этом уменьшается. Объясняется это тем, что более твердый инструмент менее подвержен износу, чем более мягкий, а, следовательно, он лучше сохраняет свою форму и более жестко формирует профиль заготовки, обеспечивая повышенное давление на заготовку по краям профиля. Более мягкий инструмент под действием повышенного давления по краям профиля, вызываемого кинематикой способа обработки, сам интенсивно изнашивается и поэтому влияние этого фактора проявляется менее значительно.

В целом же, как следует из выполненного анализа, исследуемый процесс суперфиниширования обеспечивает высокие режущие свойства инструмента, что позволяет интенсивно удалять исходный шероховатый, дефектный слой и формировать заданную геометрическую форму заготовки. В наибольшей степени на результаты профилирующего суперфиниширования оказывают время обработки и зернистость инструмента, регулируя которые, можно существенно управлять процессом. Твердость инструмента на результаты обработки оказывает менее значительное влияние.

## 4.2. Зависимость эффективности и качества обработки от режимов суперфиниширования

В результате обработки экспериментальных данных получены следующие зависимости выходных показателей суперфиниширования дорожек качения колец роликоподшипника от влияющих факторов:

$$\begin{aligned}\delta &= 6.72 \cdot 10^{-3} \cdot n_z^{0.244} \cdot n_b^{0.86} \cdot P^{0.121} \cdot \alpha^{0.23}; \\ q &= 3.502 \cdot 10^{-6} \cdot n_z^{0.32} \cdot n_b^{0.73-0.012 \cdot \ln(P)} \cdot P^{0.038} \cdot \alpha^{0.35}; \\ R_a &= 0,019 \cdot n_z^{-0,13} \cdot n_b^{0,17} \cdot P^{0,46} \cdot \alpha^{0,089}; \\ W_z &= 0,7 \cdot n_z^{-0,37} \cdot n_b^{-0,20} \cdot P^{0,34} \cdot \alpha^{-0,22}; \\ \Delta &= 36,7 \cdot n_z^{-0,57} \cdot n_b^{-0,35} \cdot P^{0,54} \cdot \alpha^{-0,32}.\end{aligned}\tag{4.2}$$

На этой стадии экспериментов время обработки составляло 7 с, зернистость инструмента - M14, твердость инструмента -HRA=20 ед. Характеристика инструмента - 63CM14CM1КЛ.

На рис. 4.11 и 4.12 представлены зависимости шероховатости обработанной поверхности  $R_a$  от частоты вращения заготовки  $n_z$ , от частоты обкатного движения инструментальной головки  $n_b$ , от силы прижима бруска к обрабатываемой поверхности  $P$  и угла пересечения осей заготовки и инструментальной головки  $\alpha$ . Как видно из рис. 4.11, с увеличением частоты вращения заготовки шероховатость обработанной поверхности уменьшается. Однако с увеличением частоты вращения заготовки в 3 раза шероховатость поверхности уменьшается всего на 20%. Объясняется это тем, что с увеличением частоты вращения заготовки число контактов каждой точки обрабатываемой поверхности с инструментом в единицу времени увеличивается, что увеличивает число царапин от зерен и снижает шероховатость поверхности.

Однако время каждого такого непрерывного контакта уменьшается, что увеличивает шероховатость поверхности. Эти два фактора компенсируют друг друга. Но с увеличением частоты вращения заготовки возрастает степень засаливания рабочей поверхности инструмента, что приводит к снижению шероховатости поверхности. А так как степень засаливания рабочей поверхности инструмента при формообразующем суперфинишировании невелика, то и влияние этого фактора незначительно.

Такое же слабое влияние на шероховатость поверхности и по той же причине оказывает и частота обкатного движения инструментальной головки. С увеличением частоты движения инструментальной головки в 4 раза шероховатость поверхности возрастает всего на 25%. Объясняется это влияние тем, что с возрастанием частоты движения инструментальной головки

уменьшается время непрерывного контакта каждой точки бруска с обрабатываемой поверхностью и снижается степень засаливания инструмента. Но так как исследуемый процесс обработки характеризуется способностью к самоочистке инструмента, то влияние этого фактора на шероховатость обработанной поверхности невелико.

Влияние на шероховатость поверхности угла пересечения осей вращения заготовки и инструментальной головки тоже невелико. С возрастанием угла пересечения осей в 3 раза шероховатость поверхности увеличивается всего на 10%. Это связано с тем, что уменьшение угла пересечения осей приводит к возрастанию степени засаливания инструмента, но даже при малых углах пересечения степень самоочистки инструмента достаточно велика и поэтому влияние этого фактора проявляется слабо.

Наиболее сильное влияние на шероховатость поверхности при формообразующем суперфинишировании оказывает сила прижима бруска к обрабатываемой поверхности. Из рис. 4.12 видно, что увеличение силы прижима в 3 раза приводит к увеличению шероховатости обработанной поверхности на 70%. Механизм влияния силы прижима бруска на шероховатость поверхности объясняется тем, что от ее значения зависит глубина внедрения зерен в обрабатываемую поверхность. С увеличением силы прижима глубина внедрения зерен возрастает, и, следовательно, повышается шероховатость обработанной поверхности. Степень этого влияния снижается с возрастанием силы прижима, что связано с ограниченной глубиной внедрения зерен в обрабатываемую поверхность, которая в среднем не может превышать критическую глубину внедрения, при которой зерна выпадают из связки.

На волнистость обработанной поверхности значительное влияние оказывает не только сила прижима бруска к заготовке, но и частота ее вращения (рис. 4.13 и 4.14). Из рис. 4.13 видно, что при увеличении частоты вращения заготовки в 3 раза волнистость уменьшается на 50%.

Объясняется это тем, что с увеличением частоты вращения заготовки возрастает сьем металла с обрабатываемой поверхности, а, следовательно, более активно удаляются волны, оставшиеся от предшествующей технологической операции.

С возрастанием силы прижима бруска к заготовке в 3 раза волнистость обработанной поверхности увеличивается на 40%. Объясняется это тем, что с возрастанием силы прижима увеличивается глубина не только поперечных, но и продольных царапин от зерен, что и приводит к повышенной волнистости обработанной поверхности.

Несколько меньшее влияние на волнистость обработанной поверхности оказывают частота обкатного движения инструментальной головки и угол пересечения ее оси с осью вращения заготовки. Так, с увеличением частоты движения головки в 4 раза волнистость обработанной поверхности уменьша-

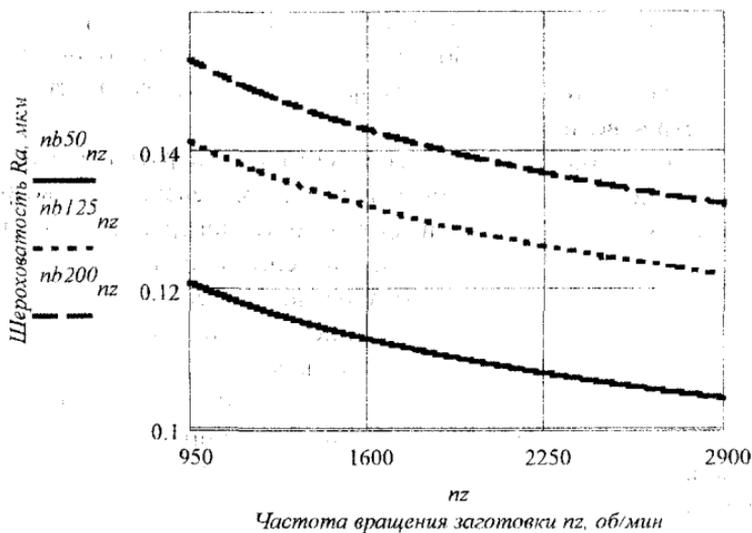


Рис. 4.11. Влияние частот вращения заготовки  $n_z$  и движения инструментальной головки  $n_b$  на шероховатость обработанной поверхности  $R_a$

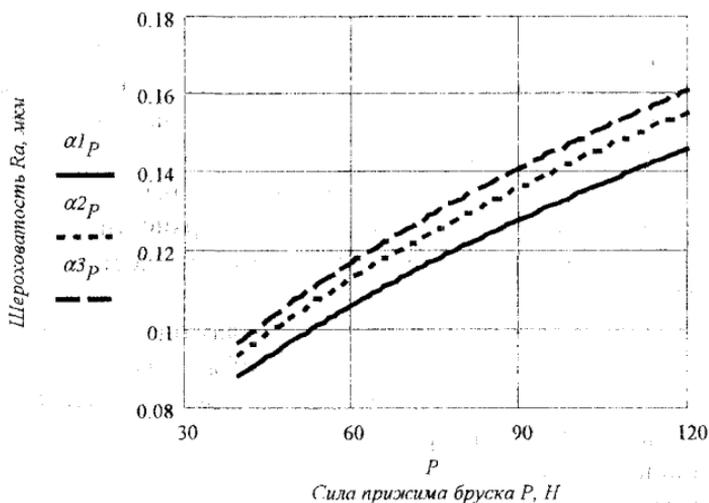


Рис. 4.12. Влияние силы прижима бруска  $P$  и угла пересечения осей  $\alpha$  на шероховатость обработанной поверхности  $R_a$

ется на 30%. Объясняется это тем, что с возрастанием частоты движения головки увеличивается съем металла, а, следовательно, более активно исправляется исходная геометрическая погрешность заготовки.

Таков же механизм влияния на волнистость обработанной поверхности и угла пересечения осей заготовки и инструментальной головки.

Из рис. 4.14 видно, что с возрастанием угла пересечения осей в 3 раза волнистость обработанной поверхности снижается на 30%. Это связано с уменьшением площадки контакта инструмента и заготовки и уменьшением степени засаливания инструмента, а, следовательно, с возрастанием съема металла при увеличении угла пересечения осей заготовки и инструментальной головки.

Указанный механизм влияния технологических факторов на погрешности геометрической формы заготовки имеет место и при формировании некруглости обработанной поверхности. На рис. 4.15 и 4.16 представлены зависимости исследуемых технологических факторов на величину отклонения от круглости.

Из рис. 4.15 видно, что с увеличением частоты вращения заготовки в 3 раза отклонение от круглости снижается в 2 раза. Объясняется это тем, что с увеличением частоты вращения заготовки возрастает съем металла, и, следовательно, более интенсивно исправляются погрешности формы.

В несколько меньшей степени, но все же весьма значительно, на отклонение от круглости обработанной поверхности влияет частота обкатного движения инструментальной головки (рис. 4.15). С увеличением частоты движения инструментальной головки в 4 раза отклонение от круглости уменьшается в 1,5 раза. Объясняется это тем, что с возрастанием частоты движения инструментальной головки уменьшается время контакта каждой точки рабочей поверхности инструмента с заготовкой, режущие свойства инструмента возрастают, а, следовательно, в большей степени исправляются погрешности заготовки.

Тот же эффект наблюдается и при увеличении угла пересечения осей инструментальной головки и заготовки (рис. 4.16). Как видно, с увеличением угла пересечения осей отклонение от круглости заготовки уменьшается, что объясняется более интенсивной очисткой инструмента от стружки и шлама, повышением режущих свойств инструмента и, как следствие, увеличением скорости съема припуска.

Однако, несмотря на то, что с возрастанием силы резания съем металла возрастает, отклонение от круглости увеличивается. Объясняется это тем, что с увеличением силы резания возрастает глубина взаимодействия инструмента и заготовки. Если эта глубина превышает высоту неровностей заготовки, то контактное давление на гребнях и во впадинах неровностей выравнивается, и

поэтому снижается чувствительность процесса к погрешности формы заготовки. С уменьшением силы прижима давление на гребнях неровностей получается существенно меньше, чем во впадинах, и, следовательно, на гребнях снимается больше металла, чем во впадинах, что приводит к уменьшению погрешности.

На рис. 4.17 и 4.18 представлены зависимости съема металла на диаметр заготовки от исследуемых технологических факторов. Из рис. 4.17 видно, что с возрастанием частоты вращения заготовки в 3 раза съем металла увеличивается в 1,3 раза. Объясняется это тем, что при возрастании частоты вращения заготовки увеличивается длина пути зерен по обрабатываемой поверхности в единицу времени, что способствует возрастанию съема материала. Однако с возрастанием частоты вращения заготовки увеличивается степень засаливания рабочей поверхности инструмента, что препятствует съему металла. Поэтому съем металла не прямо пропорционально зависит от частоты вращения заготовки.

Более существенно влияет на съем металла частота движения инструментальной головки (рис. 4.17). Увеличение частоты движения головки в 4 раза приводит к возрастанию съема металла в 1,8 раза. Объясняется это повышением режущих свойств инструмента при увеличении частоты движения головки.

Существенное влияние на съем металла оказывает сила прижима бруска к заготовке (рис. 4.18). Возрастание силы прижима в 3 раза приводит к увеличению съема металла в 1,8 раза. Объясняется это тем, что с увеличением силы прижима бруска к заготовке возрастает глубина царапин от зерен и общее число зерен, участвующих в резании.

Существенное влияние на съем металла оказывает угол пересечения осей инструментальной головки и заготовки. Из рис. 4.18 видно, что с возрастанием угла пересечения осей в 3 раза съем металла увеличивается на 40%. Это связано с тем, что при повышенных углах пресечения осей заготовки и инструментальной головки возрастает режущая способность инструмента, так как он лучше очищается от стружки и шлама в процессе обработки.

Режущая способность бруска оказывает решающее влияние и на формирование выпуклого профиля заготовки. Зависимость выпуклости профиля от режима профилирующего суперфиниширования показана на рис. 4.19 и 4.20. Как видно из рис. 4.19, частота вращения заготовки и частота движения инструментальной головки оказывают на выпуклость профиля обрабатываемой поверхности такое же влияние, как и на съем металла. Например, увеличение частоты вращения заготовки от 950 до 2900 об/мин (в 3 раза) способствует возрастанию выпуклости профиля на 25%, а возрастание частоты круговых движений инструментальной головки в 4 раза приводит к увеличению выпуклости профиля обработанной поверхности в 1,5 раза.

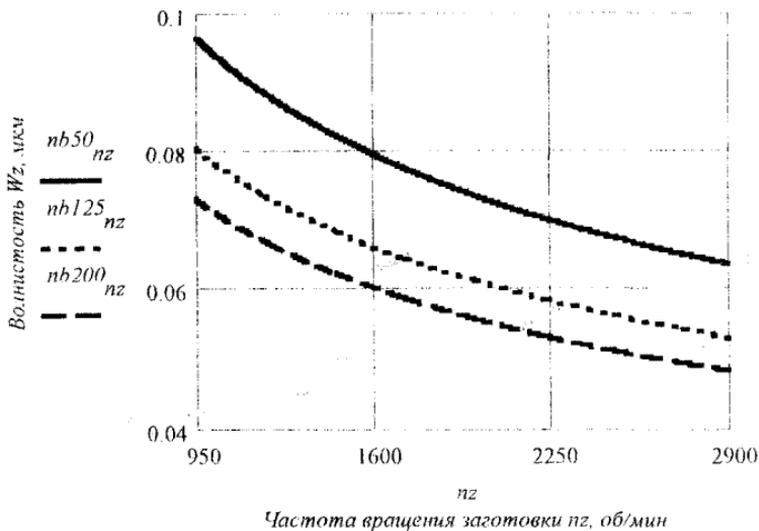


Рис. 4.13. Влияние частот вращения заготовки  $n_z$  и движения инструментальной головки  $n_b$  на волнистость обработанной поверхности  $W_z$

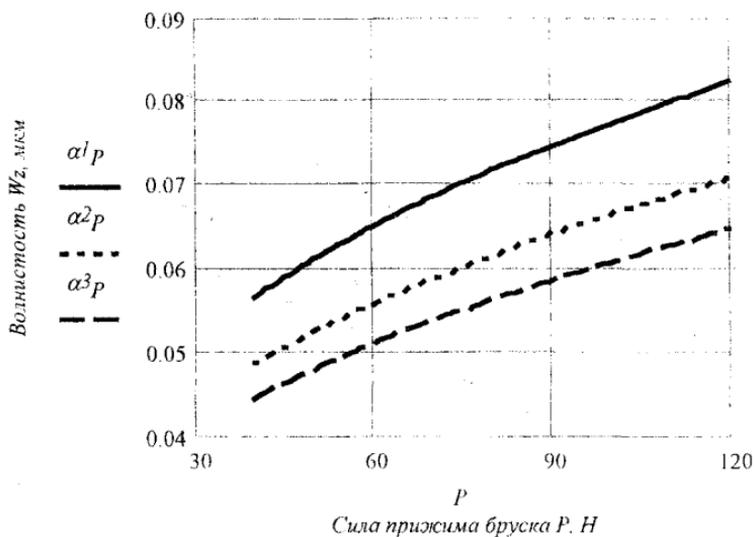


Рис. 4.14. Влияние силы прижима бруска  $P$  и угла пересечения осей  $\alpha$  на волнистость обработанной поверхности

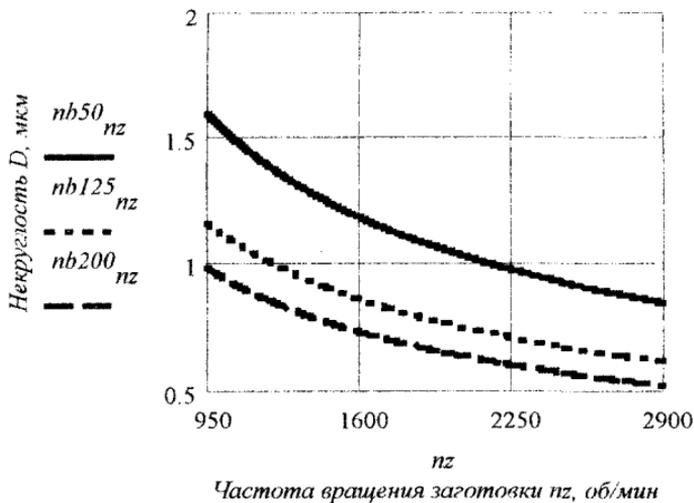


Рис. 4.15. Зависимость некруглости обработанной поверхности от частот вращения заготовки  $n_z$  и движения инструментальной головки  $n_b$

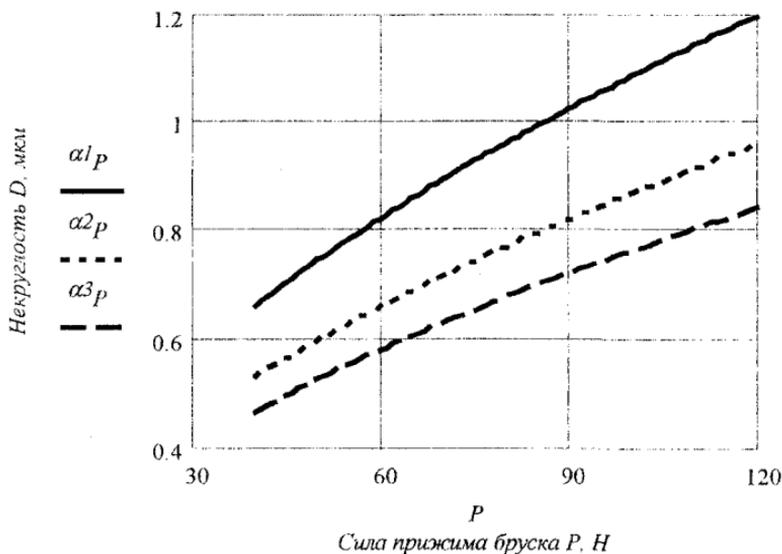


Рис. 4.16. Зависимость некруглости обработанной поверхности от силы прижима бруска  $P$  и угла пересечения осей  $\alpha$

Объясняется это тем, что при возрастании частоты круговых движений инструментальной головки возрастает режущая способность инструмента. С увеличением частоты вращения изделия увеличивается число контактов абразивных зерен с отдельными участками обрабатываемой поверхности в единицу времени, что способствует увеличению производительности съема припуска на всей поверхности обработки, а, следовательно, разницы в снимаемом припуске по краям профиля дорожки качения и в центре профиля.

Как было показано в гл.2, в силу кинематических особенностей исследуемого способа обработки скорость перемещения брусков по обрабатываемой поверхности носит переменный характер. По мере движения брусков от периферии обрабатываемого профиля к его центральной части их скорость увеличивается, а после прохождения плоскости симметрии заготовки уменьшается. Особенно она низка по краям профиля.

Таким образом, в центральной части обрабатываемого профиля скорость перемещения абразивных брусков максимальна, а по краям - минимальна. Поэтому с увеличением частоты вращения изделия суммарное время контакта брусков с центральной частью обрабатываемого профиля будет увеличиваться медленнее, чем суммарное время их контакта с его периферией. В результате этого, с повышением частоты вращения изделия будет увеличиваться величина выпуклости обрабатываемого профиля.

Из рис. 4.20 видно, что с увеличением силы прижима бруска к обрабатываемой поверхности величина выпуклости профиля заготовки возрастает. Так, с увеличением силы прижима с 40 до 120 Н (в 3 раза) величина выпуклости профиля увеличивается в 1,5 раза. Это объясняется увеличением припуска в единицу времени, а, следовательно, накопленной разницей в съеме припуска по центру и по краям профиля заготовки.

С возрастанием угла пересечения осей инструментальной головки и заготовки в 3 раза величина выпуклости профиля увеличивается в 1,3 раза. Это также связано с повышением режущей способности инструмента, а, следовательно, с возрастанием скорости удаления припуска с заготовки.

Сравнивая полученные в работе зависимости с результатами исследований других авторов, следует отметить, что они не противоречат общепринятым представлениям о механизме влияния режимов суперфиниширования на выходные параметры обработки. Некоторые расхождения результатов в сторону повышения величины съема вызваны увеличением числа активно режущих зерен, лучшими условиями очистки режущей поверхности от стружки и шлама, а также хорошими условиями самозатачивания зерен.

Схема формообразующего суперфиниширования деталей типа наружных колец роликоподшипников обеспечивает высокую исправляющую способность технологической операции суперфиниширования, позволяет значительно повысить исправляемую способность метода, который, по сравнению

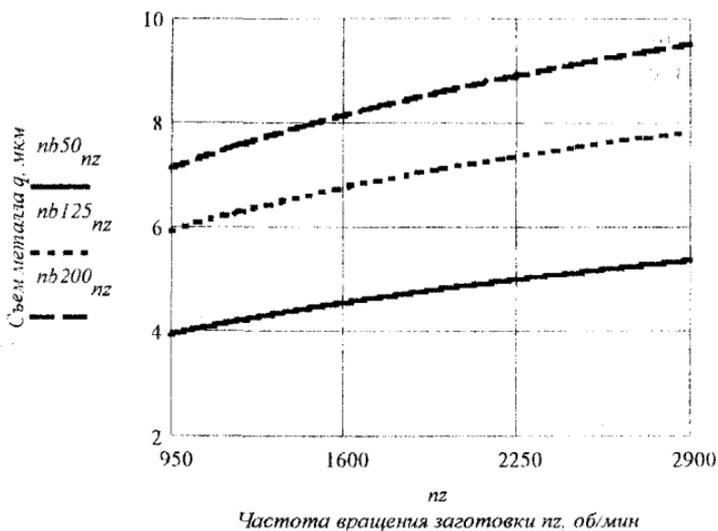


Рис. 4.17. Зависимость съема металла на диаметр  $Q$  от частот вращения заготовки  $n_z$  и движения инструментальной головки  $n_b$

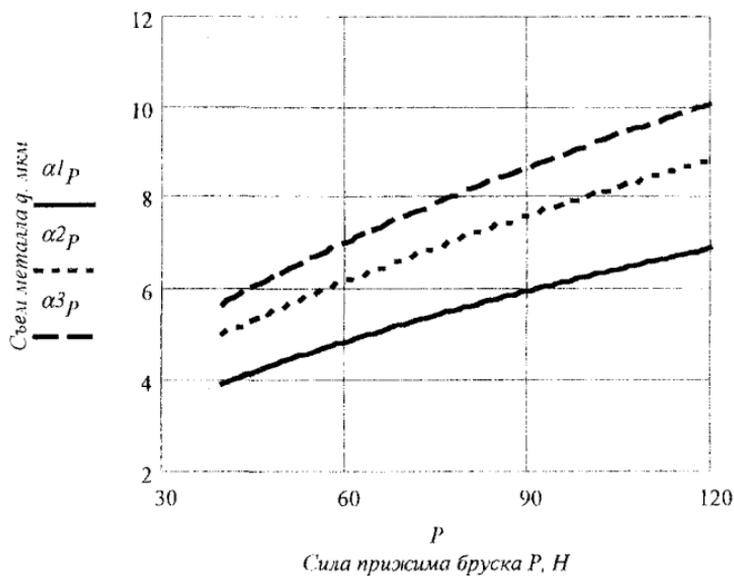


Рис. 4.18. Зависимость съема металла на диаметр  $Q$  от силы прижима бруска  $P$  и угла пересечения осей  $\alpha$

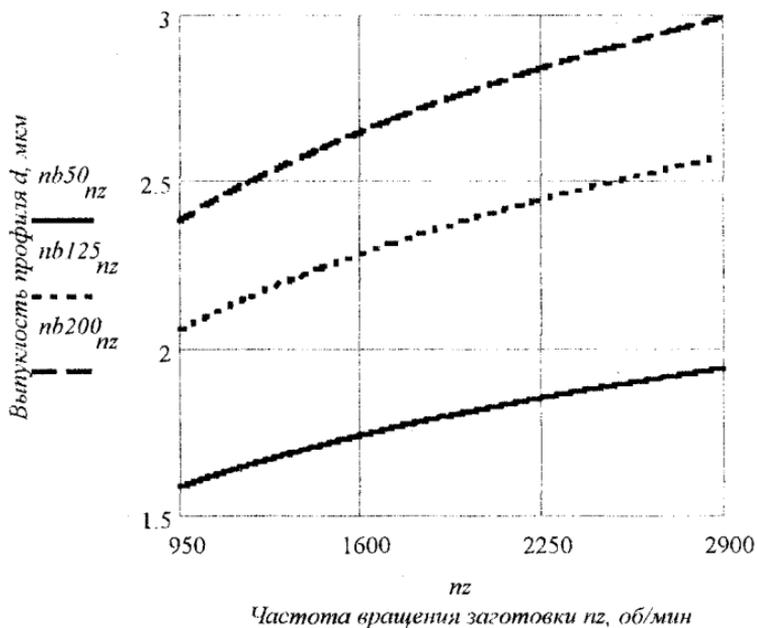


Рис. 4.19. Влияние времени обработки  $\tau$  при зернистости брусков M7, M10 и M14 на выуклость профиля обработанной поверхности

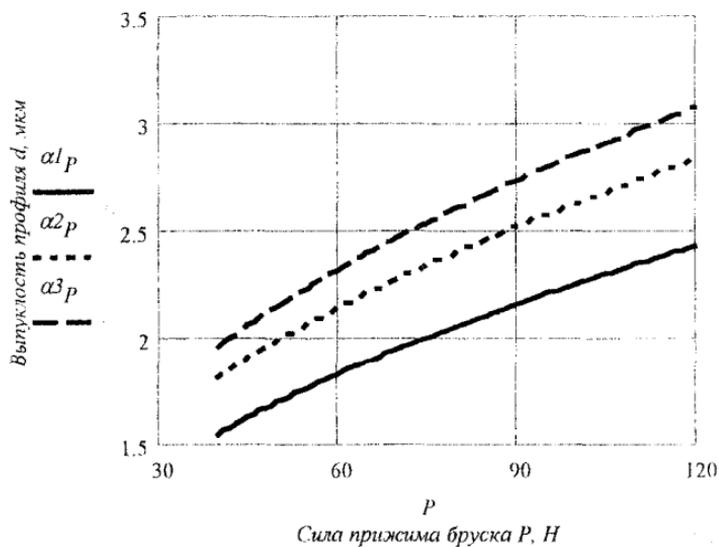


Рис. 4.20. Влияние зернистости инструмента  $Z$  и его твердости  $HRA$  на выуклость профиля обработанной поверхности

с традиционным способом, обеспечивает существенное снижение волнистости, отклонений от круглости обрабатываемой поверхности, а также позволяет гарантированно получать выпуклый профиль обработанной поверхности.

### 4.3. Методика определения рациональных условий обработки

На основе выполненных экспериментальных исследований по методике, изложенной в работе [122], можно найти рациональные условия формообразующего суперфиниширования. Для этого сначала необходимо построить математическую модель исследуемого процесса обработки, которая, как известно, представляет собой систему неравенств, ограничивающих условия и значения показателей процесса обработки, с указанием целевой функции.

Так как экспериментальные исследования выполнялись в два этапа, в результате которых были построены две независимые системы уравнений, отражающих основные закономерности исследованного процесса, то для построения математической модели следует свести эти две системы неравенств к одной системе. С этой целью по формулам (4.1) вычислили значения показателей обработки при тех значениях параметров, которые использовались во второй части экспериментов:  $\tau = 7\text{с}$ ,  $HRA = 20$  ед.,  $Z = 14$ . При этом были получены следующие результаты:

$$\begin{aligned} \delta &= 0,027 \cdot \tau^{0,54} HRA^{0,34} \cdot Z^{0,88} = 2,181; \\ q &= 0,43 \cdot \tau^{0,30} HRA^{-0,34} \cdot Z^{1,25} = 7,539; \\ R_a &= 0,041 \cdot \tau^{-0,78} HRA^{0,17} \cdot Z^{0,81} = 0,127; \\ W_z &= 0,136 \cdot \tau^{-0,33} HRA^{0,23} \cdot Z^{-0,37} = 0,054; \\ \Delta &= 2,59 \cdot \tau^{-0,69} HRA^{0,36} \cdot Z^{-0,40} = 0,692. \end{aligned} \quad (4.3)$$

После этого выражения (4.1) были подставлены в равенства (4.2), которые предварительно разделили на численные значения, представленные в выражениях (4.3). Получены следующие выражения:

$$\begin{aligned} \delta &= 2,2 \cdot 10^{-4} \cdot \tau^{0,54} \cdot HRA^{0,34} \cdot Z^{0,88} \cdot n_z^{0,19} \cdot n_b^{0,31} \cdot P^{0,41} \cdot \alpha^{0,23}; \\ q &= 5,7 \cdot 10^{-4} \cdot \tau^{0,30} \cdot HRA^{-0,34} \cdot Z^{1,25} \cdot n_z^{0,26} \cdot n_b^{0,42} \cdot P^{0,53} \cdot \alpha^{0,35}; \\ R_a &= 6,1 \cdot 10^{-3} \cdot \tau^{-0,78} \cdot HRA^{0,17} \cdot Z^{0,81} \cdot n_z^{-0,13} \cdot n_b^{0,17} \cdot P^{0,46} \cdot \alpha^{0,089}; \\ W_z &= 1,76 \cdot \tau^{-0,33} \cdot HRA^{0,23} \cdot Z^{-0,37} \cdot n_z^{-0,37} \cdot n_b^{-0,20} \cdot P^{0,34} \cdot \alpha^{-0,22}; \\ \Delta &= 137,4 \cdot \tau^{-0,69} \cdot HRA^{0,36} \cdot Z^{-0,40} \cdot n_z^{-0,57} \cdot n_b^{-0,35} \cdot P^{0,54} \cdot \alpha^{-0,32}. \end{aligned} \quad (4.4)$$

В выражениях (4.4) некоторые технологические факторы, которые служат для управления процессом суперфиниширования, являются переменными

ми. Некоторые из них трудно поддаются регулировке на том оборудовании, на котором осуществлялся данный процесс.

На созданном НПП НИМ с участием автора оборудовании основными технологическими факторами, служащими для управления процессом обработки, являются время обработки  $\tau$ , зернистость инструмента  $Z$  и сила прижима бруска к заготовке  $P$ . На основании выполненных исследований твердость инструмента желательнее использовать равной  $HRA=20$  ед., частота вращения заготовки должна быть по возможности наибольшая. Из конструктивных особенностей частота вращения заготовки на станке составляет  $n_z=1500$  об/мин. Частота обкатного движения инструментальной головки установлена  $n_b = 150$  об/мин., угол пересечения осей  $\alpha = 1,5^\circ$ . В принципе указанные технологические параметры при необходимости могут тоже изменяться, но для этого требуются более значительные затраты времени и средств: замена шкивов на шпинделе изделия и на инструментальной головке, а также замена эксцентрика в инструментальной головке, регулирующего ее угол наклона. Практика показывает, что постоянные параметры станка вполне обеспечивают необходимые эффективность и качество обработки. Поэтому при построении математической модели процесса воспользуемся указанными выше переменными и постоянными технологическими параметрами процесса суперфиниширования.

Будем считать, что все значения показателей качества в выражении (4.4) заданы, вернее, ограничены с одной стороны. Прологарифмируем равенства (4.4) и запишем их с учетом принятых ограничений, в том числе ограничений, определяемых условиями экспериментальных исследований:

$$\begin{aligned} \ln \delta &\geq \ln(2,2 \cdot 10^{-4} \cdot HRA^{0,34} \cdot n_z^{0,19} \cdot n_b^{0,31} \cdot \alpha^{0,23}) + 0,54 \ln \tau + 0,88 \ln Z + 0,41 \ln P; \\ \ln q &\geq \ln(5,7 \cdot 10^{-4} \cdot HRA^{-0,34} \cdot n_z^{0,26} \cdot n_b^{0,42} \cdot \alpha^{0,35}) + 0,3 \ln \tau + 1,25 \ln Z + 0,53 \ln P; \\ \ln R_a &\leq \ln(6,1 \cdot 10^{-3} \cdot HRA^{0,17} \cdot n_z^{-0,13} \cdot n_b^{0,17} \cdot \alpha^{0,089}) - 0,78 \ln \tau + 0,81 \ln Z + 0,46 \ln P \\ \ln W_z &\leq \ln(1,76 \cdot HRA^{0,23} \cdot n_z^{-0,37} \cdot n_b^{-0,20} \cdot \alpha^{-0,22}) - 0,33 \ln \tau - 0,37 \ln Z + 0,34 \ln P; \\ \ln \Delta &\leq \ln(137,4 \cdot HRA^{0,36} \cdot n_z^{-0,57} \cdot n_b^{-0,035} \cdot \alpha^{-0,32}) - 0,69 \ln \tau - 0,4 \ln Z + 0,54 \ln P; \\ \ln \tau &\geq \ln 3 \\ \ln \tau &\leq \ln 10; \\ \ln Z &\geq \ln 7; \\ \ln Z &\leq \ln 14; \\ \ln P &\geq \ln 40; \\ \ln P &\leq \ln 120; \end{aligned} \tag{4.5}$$

---


$$f(\tau) = \ln \tau_{\min}.$$

Неравенства (4.5) представляют собой математическую модель, которую можно использовать для оптимизации условий формообразующего суперфиниширования. Однако для осуществления процесса оптимизации выражения (4.5) необходимо представить в более удобном для этого виде. Обозначим:

$$x = \ln \tau; \quad y = \ln Z; \quad z = \ln P.$$

$$\begin{aligned} b1 &= \ln \delta - \ln(2,2 \cdot 10^{-4} \cdot HRA^{0,34} \cdot n_z^{0,19} \cdot n_b^{0,31} \cdot \alpha^{0,23}); \\ b2 &= \ln q - \ln(5,7 \cdot 10^{-4} \cdot HRA^{-0,34} \cdot n_z^{0,26} \cdot n_b^{0,42} \cdot \alpha^{0,35}); \\ b3 &= \ln R_a - \ln(6,1 \cdot 10^{-3} \cdot HRA^{0,17} \cdot n_z^{-0,13} \cdot n_b^{0,17} \cdot \alpha^{0,089}); \\ b4 &= \ln W_z - \ln(1,76 \cdot HRA^{0,23} \cdot n_z^{-0,37} \cdot n_b^{-0,20} \cdot \alpha^{-0,22}); \\ b5 &= \ln \Delta - \ln(137,4 \cdot HRA^{0,36} \cdot n_z^{-0,57} \cdot n_b^{-0,035} \cdot \alpha^{-0,32}). \end{aligned} \quad (4.6)$$

С использованием обозначения (4.6) неравенства (4.5) примут вид:

$$\begin{aligned} 0,54x + 0,88y + 0,41z &\leq b1; \\ 0,3x + 1,25y + 0,53z &\leq b2; \\ -0,78x + 0,81y + 0,46z &\geq b3; \\ -0,33x - 0,37y + 0,34z &\geq b4; \\ -0,69x - 0,4y + 0,54z &\geq b5; \\ x &\geq 1,1; \\ x &\leq 2,3; \\ y &\geq 1,95; \\ y &\leq 2,64; \\ z &\geq 3,69; \\ z &\leq 4,79; \end{aligned} \quad (4.7)$$

---


$$f(\tau) = x_{\min}$$

Решение системы неравенств (4.7) возможно осуществить на основе методов линейного программирования. Для поиска минимально допустимого времени обработки можно воспользоваться наиболее часто применяемым для оптимизации технологических процессов симплекс-методом и соответствующим стандартным программным обеспечением.

## Выводы

1. Выполнены экспериментальные исследования, которые позволили установить зависимости влияния основных технологических факторов: угла пересечения осей изделия и инструментальной головки, силы прижима брусков к обрабатываемой поверхности, зернистости, твердости брусков, времени обработки, частот вращения инструментальной головки и изделия, – на

показатели операции формообразующего суперфиниширования наружных колец роликоподшипников: шероховатость обработанной поверхности, волнистость, некруглость, съём металла, и выпуклость дорожки качения.

2. Показано, что наиболее существенное влияние на результаты формообразующего суперфиниширования оказывают зернистость инструмента, угол пересечения осей инструментальной головки и изделия, сила прижима брусков к обрабатываемой поверхности и частота вращения инструментальной головки. С увеличением значений этих факторов шероховатость поверхности, величина выпуклости и съём металла возрастают, а с уменьшением - снижаются.

3. Установлено, что, в отличие от традиционного процесса суперфиниширования, формообразующее суперфиниширование обеспечивает существенное снижение не только волнистости, но и гранности, и некруглости, а также придает обработанной поверхности выпуклую форму, что, как известно, благоприятно сказывается на работоспособности подшипников. Разработана математическая модель процесса формообразующего суперфиниширования, позволяющая осуществлять поиск рациональных условий обработки с учетом принятых ограничений по значениям показателей технологического процесса и режимов ее осуществления.

© 2010 г. ООО «ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНИКА»

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНИКА»

Москва, ул. Вавилова, д. 10, стр. 1, 125080

Тел. (495) 251-15-00

Факс (495) 251-15-01

Сайт: [www.techinfo.ru](http://www.techinfo.ru)

Электронная почта: [info@techinfo.ru](mailto:info@techinfo.ru)

Средствами издательства «Техника»

использованы материалы из

журнала «Техника»

№ 11, 2010 г.

Страницы 10-11

© 2010 г. ООО «ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНИКА»

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНИКА»

Москва, ул. Вавилова, д. 10, стр. 1, 125080

Тел. (495) 251-15-00

Факс (495) 251-15-01

Сайт: [www.techinfo.ru](http://www.techinfo.ru)

Электронная почта: [info@techinfo.ru](mailto:info@techinfo.ru)

Средствами издательства «Техника»

использованы материалы из

журнала «Техника»

№ 11, 2010 г.

Страницы 10-11

# ГЛАВА 5. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

## 5.1. Предлагаемая технология суперфиниширования деталей подшипников

Выполненные исследования процесса формообразующего суперфиниширования позволили глубже понять механизм этого сложного процесса и предложить новую технологию его применения.

В качестве прототипа предлагаемого способа использовался способ чистовой обработки вращающейся детали абразивными брусками, закрепленными в инструментальной головке, при котором оси детали и инструментальной головки располагают под острым углом [126]. Инструментальная головка вращается вокруг своей оси, пересекающей с осью детали в точке симметрии обрабатываемой поверхности.

Недостатком данного способа является сложность формирования выпуклой формы профиля внутренней поверхности детали, так как давление бруска по центру обрабатываемой поверхности в этом случае выше, чем по краям.

Задачей предлагаемого изобретения являлось повышение качества обработки – обеспечение выпуклой формы профиля внутренней обрабатываемой поверхности детали.

Поставленная задача решается тем, что в известном способе чистовой обработки вращающейся детали абразивными брусками, закрепленными в инструментальной головке, при котором оси детали и инструментальной головки располагают под острым углом, инструментальной головке придают круговое колебательное движение вокруг точки, расположенной в плоскости симметрии обрабатываемой поверхности и смещенной от оси вращения детали на расстояние, равное:

$$\frac{D + \Delta}{2} \leq L \leq \frac{B^2 + 4\Delta^2}{8\Delta} + \frac{D}{2},$$

где  $B$  - длина образующей обрабатываемой поверхности, мм;

$\Delta$  - требуемая величина выпуклости (вогнутости) профиля, мм;

$D$  - диаметр обрабатываемой поверхности, мм.

Так как в предлагаемом способе чистовой обработки инструментальной головке придают круговое движение вокруг точки, находящейся на расстоянии, зависящем от размеров обрабатываемой поверхности и требуемой величины выпуклости этой поверхности, то в процессе обработки

наибольшее давление бруска на обрабатываемую поверхность будет происходить на периферийных участках профиля, и следовательно, на этих участках будет происходить более интенсивный сьем металла, а обрабатываемая поверхность будет приобретать заданную выпуклость. В то же время обеспечивается самозатачивание инструмента, активное снятие припуска и исправление погрешности формы детали. При слишком большом расстоянии от центра колебательного движения инструментальной головки до оси вращения детали невозможно получить заданную величину выпуклости, при слишком малом расстоянии - профиль обрабатываемой поверхности не получится плавным, так как по краям будет иметь выступы.

Сущность изобретения поясняется чертежами, где на рис. 5.1 изображена схема осуществления способа обработки.

К детали 1 диаметром  $D$  и высотой  $B$ , установленной на шпинделе изделия 2 и вращающейся вокруг своей оси 1-1 со скоростью  $V_1$ , поджимают абразивный брусок 3, закрепленный в державке 4. Державка 4 жестко закреплена на кулачке 5, который установлен в инструментальной головке 6 с возможностью перемещаться в ее радиальных пазах (не показано) на различное расстояние относительно оси инструментальной головки 6. Ось 2-2 инструментальной головки 6 установлена под углом  $\alpha$  к оси, параллельной оси 1-1 вращения детали 1, так, что она пересекается с плоскостью симметрии обрабатываемой поверхности в т.  $m$  на расстоянии  $L$  от оси 1-1 вращения детали 1. Инструментальной головке 6 придают круговое движение со скоростью  $V_2$  вокруг указанной т.  $m$ .

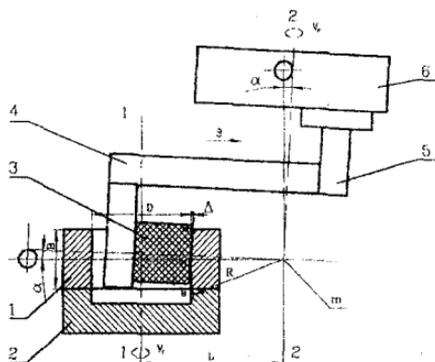


Рис 5.1. Схема способа формообразующего суперфиниширования деталей типа наружных колец роликоподшипников

При перемещении кулачка 5 в радиальных пазах инструментальной головки 6 от ее центра с подачей  $S$  державка 4 подводит брусок 3 к обрабатываемой поверхности детали 1, при перемещении кулачка 5 к центру головки 6 брусок 3 отводится от обрабатываемой поверхности детали 1.

Так как инструментальная головка 6 совершает плавное круговое движение вокруг т.  $m$ , то и абразивный брусок 3, соединены с головкой 6 с помощью державки 4 и кулачка 5, также совершает круговое движение вокруг этой точки под углом  $\alpha$ , а каждая точка рабочей поверхности бруска описывает сферу с радиусом, равным ее расстоянию от т.  $m$ . Это движение можно разложить на составляющие: возвратно-поступательные движения вдоль и перпендикулярно профилю детали и периодический поворот относительно этого профиля на угол  $\pm \alpha$ .

Если профиль детали имеет прямолинейную форму, то точки профиля  $a$  и  $b$ , находящиеся на его периферии, расположены от центра колебательного движения - точки  $m$ , на большем расстоянии, чем центральная точка профиля  $b$ . Поэтому в процессе обработки давление бруска 3 на периферийные точки детали  $a$  и  $b$  будет больше, чем на центральную точку  $b$ , и, следовательно, съем металла на периферийных точках профиля будет больше, чем в центральной, и профиль будет приобретать выпуклую форму. Абразивный брусок 3 по краям в точках  $a$  и  $b$  также будет изнашиваться более значительно, чем в центральной точке  $b$ , и тоже будет иметь выпуклую форму, а, следовательно, контакт бруска с деталью будет линейным.

Процесс образования профиля детали будет идти до тех пор, пока величина выпуклости профиля не достигнет значения, равного:

$$\Delta = (L - D/2) - \sqrt{(L - D/2)^2 - B^2/4},$$

где  $B$  - длина образующей обрабатываемой поверхности, мм;

$\Delta$  - требуемая величина выпуклости (вогнутости) профиля, мм;

$D$  - диаметр обрабатываемой поверхности, мм.

По мере приближения к этому значению выпуклости контакт бруска с деталью будет приближаться к сплошному, давление на периферийных участках бруска и детали будет приближаться к давлению на центральных участках и, наконец, станет равным ему, а брусок приобретет форму, совпадающую с полученной формой поверхности детали.

Однако на практике не обязательно процесс обработки доводить до установившегося, при котором величина выпуклости профиля детали будет определяться указанной выше формулой:

$$L = (\Delta^2 + B^2/4)/2\Delta + D/2.$$

Наоборот, даже контакт бруска с деталью будет сохраняться линейным, а скорость формирования профиля детали будет более высокой, если уменьшить расстояние  $L$  по сравнению с расчетным, но процесс обработки в этом случае надо останавливать при достижении выпуклости заданной величины.

Минимальное значение  $L$  ограничивается размерами детали. Если эта величина будет меньше

$$L \leq \frac{(D + B)}{2},$$

то периферийные участки абразивного бруска будут иметь сплошной контакт с периферийными участками детали, съём на этих участках уменьшится и профиль детали будет иметь очень нежелательные выпуклости по краям.

Предлагаемый способ может использоваться для обработки наружных и внутренних поверхностей различной формы. Только в указанных формулах следует использовать положительное значение  $\Delta$  для выпуклых внутренних и вогнутых наружных поверхностей, и отрицательное значение для вогнутых внутренних и выпуклых наружных поверхностей.

**Пример.** Пусть обработке подвергается дорожка качения наружного кольца роликоподшипника 2205:  $B=18$  мм.,  $D=48$  мм. Требуемая величина выпуклости составляет  $\Delta=0,006$  мм.

Максимальное расстояние –

$$L = (0,006^2 + 18^2 / 4) / 2 \cdot 0,006 + 48 / 2 = 6774 \text{ мм.}$$

Минимальное расстояние –

$$L = (48 + 18) / 2 = 32 \text{ мм.}$$

Таким образом, расстояние точки кругового движения инструментальной головки до оси детали должно находиться в пределах

$$32 \text{ мм} \leq L \leq 6774 \text{ мм.}$$

Преимуществами этого способа являются следующие:

1. Возможность формирования выпуклого профиля внутренней поверхности заготовки, что не обеспечивают известные способы многобрусковой обработки и другие способы.

2. Предложенный способ не требует точной установки оси расположения инструментов относительно обрабатываемой поверхности. Если суперфиниширование осуществляется многобрусковым инструментом, как в прототипе, любое смещение точки пересечения осей головки и детали относительно точки симметрии обрабатываемой поверхности приводит к биению инструмента и, как следствие, снижению эффективности обработки. Выход из этого положения обеспечивался тем, что инструментальная

головка выполнялась плавающей в плоскости, перпендикулярной оси головки. Однако это приводило к понижению жесткости головки и снижению исправляющей способности устройства. Предложенный способ вообще не требует наличия подобных компенсирующих устройств, повышает жесткость технологической системы, обеспечивает эффективное исправление погрешностей геометрической формы деталей.

3. Упрощается наладка технологического оборудования, так как любая погрешность взаимного расположения инструментальной головки и заготовки компенсируется соответствующим износом абразивных брусков.

4. Так как вращение суперфинишной головки отсутствует, то исключаются вызываемые этим вибрации технологической системы, а следовательно, качество обработки повышается, требования к жесткости станка снижаются, а значит, уменьшаются его металлоемкость и стоимость.

В то же время, как и в предыдущем способе, в данном способе суперфиниширования обеспечивается самозатачивание инструмента, активное снятие припуска и исправление погрешности формы детали. Это повышает производительность и качество обработки.

## **5.2. Предлагаемое технологическое оборудование**

Выполненные исследования и предложенная технология суперфинишной обработки деталей явилась основой для создания новой модели суперфинишного автомата модели ВДА-70Н. Автомат разработан при участии автора специалистами Саратовского Научно-производственного предприятия нестандартных изделий машиностроения (НПП НИМ). Серийное изготовление этих автоматов осуществляет дочерняя фирма НПП НИМ ООО «Станкоподшипник». Ранее этими фирмами выпускались и в настоящее время выпускаются многобрусковые суперфинишные автоматы для обработки внутренних колец шарико- и роликоподшипников. Одной из первых таких моделей являлась модель МДА 2500 с горизонтальным расположением шпинделей изделия и инструментальной головки, оси вращения которых располагались под острым углом друг к другу. Следующим шагом в совершенствовании конструкции технологического оборудования явилось создание автоматов КХВ-50 и КХВ-80, отличающихся от МДА-2500 пониженными габаритными размерами и рядом конструктивных усовершенствований: использованием пневматического привода линейных перемещений, более простой конструкцией шпиндельного узла изделия и др. Указанные автоматы успешно эксплуатируются на СПЗ и ВПЗ.

Принципиально новым направлением в создании технологического оборудования для суперфинишной обработки явилась разработка суперфи-

нишного автомата вертикального исполнения моделей ВДА-1, ВДА-2 и ВДА-30В, в основу которых был заложен описанный способ обработки [126] и устройство для его осуществления [127]. Модель ВДА-30В отличается от ВДА-1 и ВДА-2 тем, что инструментальная головка вращается не в радиальных подшипниках, а в сферическом подшипнике, что упрощает конструкцию станка и повышает его надежность. Указанные автоматы предназначены для суперфинишной обработки внутренних колец шариковых и роликовых подшипников и успешно работают на СПЗ, ВПЗ и 10-м ГПЗ. Станки демонстрировались на международных выставках новых технологий и инноваций и удостоены золотой медали в Брюсселе «Эврика-97» и бронзовой медали в Женеве. Международные награды свидетельствуют о новизне и высоком уровне выполненных разработок.

Фотография суперфинишного автомата ВДА-70Н показана на рис. 5.2. На рис. 5.3 показана рабочая зона автомата и диплом к медали на международной выставке, а на рис. 5.4 - конструкция автомата ВДА-70Н. Во многом конструкция автомата ВДА 70Н напоминает конструкцию автомата ВДА 30В. Из фотографии, приведенной на рис. 5.2, видно, что автомат имеет сварную станину, на которой установлены все механизмы станка: бабка изделия, привод вращения, инструментальная головка с центральной осью, патрон, несущий державки инструментов, и механизм прижима инструментов. В отличие от автомата ВДА 30В, в котором закрепление колец по торцу осуществлялось путем поджима кольца к свободно вращающемуся упору инструментальной головки, в данном автомате привод осевого перемещения шпинделя изделия отсутствует. Это существенно упрощает конструкцию шпинделя изделия. Зажим колец по торцу осуществляется либо магнитным патроном, либо двумя роликами, которые перемещаются от специального гидроцилиндра.

Прижимные ролики видны на фотографии рабочей зоны станка (рис. 5.3). В центре фотографии, приведенной на рис. 5.3, виден механизм привода инструментальной головки. В верхней части рабочей зоны виден гидроцилиндр, служащий приводом механизма подачи бруска. Справа виден накопитель колец, которые по крутому склизу под действием своего веса спускаются на рабочий стол станка. Стол станка установлен на специальных стойках. Под действием штока гидроцилиндра кольца перемещаются вдоль стола и подаются в рабочую зону, где и осуществляется их обработка.

Из рис. 5.4 видно, что конструкция автомата состоит из двух основных частей: суперфинишной головки, расположенной сверху, и шпинделя изделия, расположенного снизу. Корпус шпинделя изделия неподвижно закреплен на станине станка.

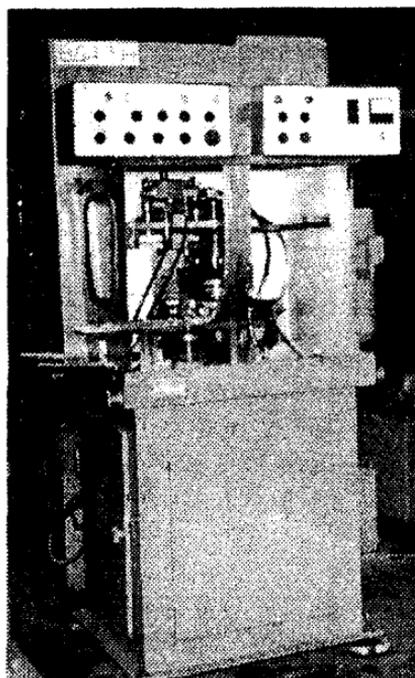
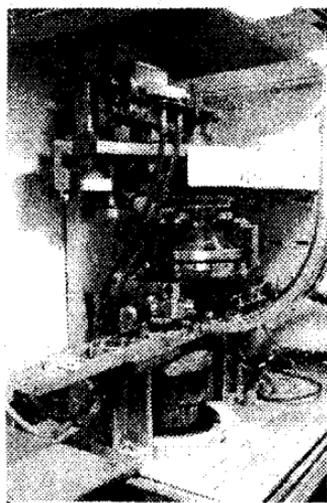


Рис. 5.2. Фотография суперфинишного автомата ВДА 70Н



# DIPLÔME



Рис. 5.3. Рабочая зона суперфинишного автомата ВДА 70Н и диплом к бронзовой медали на международной выставке в Женеве

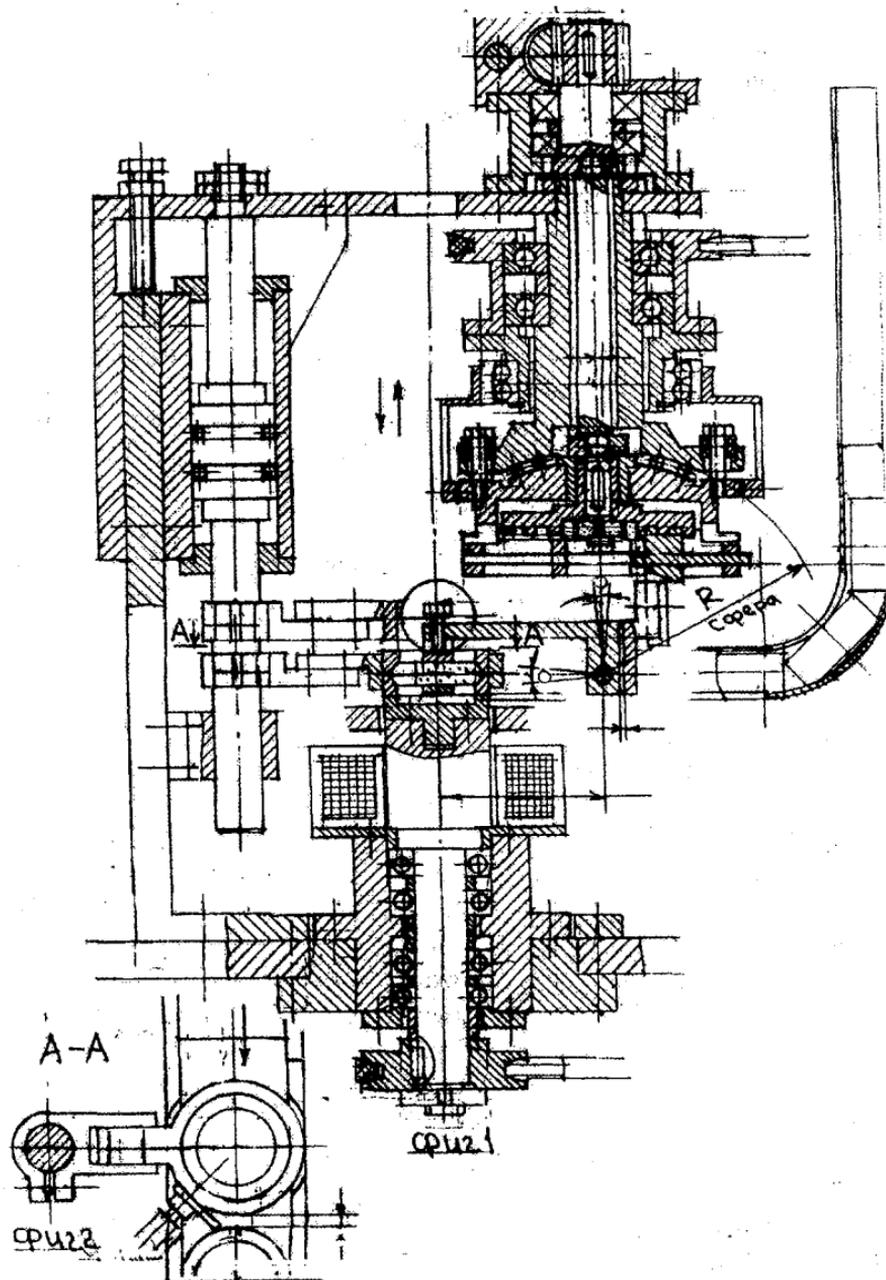


Рис. 5.4. Конструкция автомата ВДА-70Н для суперфиниширования наружных колец подшипников

Шпиндель изделия установлен в подшипниках, снабжен магнитным патроном и получает вращение от специального привода (не показан) с помощью клиноременной передачи.

Инструментальная головка состоит из двух частей: подвижной нижней и неподвижной верхней. Из рисунка видно, что эти две части шарнирно связаны между собой. Верхняя часть головки неподвижно закреплена на кронштейне, который перемещается в вертикальном направлении специальным гидроцилиндром. Этим обеспечивается ввод бруска в отверстие заготовки и вывод его из отверстия после окончания суперфиниширования. Внутри неподвижной части инструментальной головки размещены механизмы шарнирного перемещения брусков и подвода-отвода брусков

относительно обрабатываемой поверхности. Механизм шарнирного перемещения головки состоит из кулачка, вращающегося в подшипниках от специального привода, и подшипников, плотно прижимаемых к кулачку и жестко связанных с помощью кронштейнов с подвижной частью головки. Таким образом, при вращении кулачка подвижная часть головки приводит в движение патрон, который передает абразивному бруску круговое движение относительно центра сферы. Фактически брусок описывает в пространстве конус с углом при вершине, зависящей от эксцентриситета кулачка и радиуса сферы. Центр сферы не совпадает с центром симметрии заготовки, а находится от него на расстоянии 120 мм. При этом рабочая часть бруска описывает сферу с радиусом, равным расстоянию ее от центра сферы инструментальной головки. За счет этого осуществляется самозатачивание инструмента, а на обрабатываемой поверхности формируется выпуклый профиль.

Механизм подвода-отвода брусков выполнен по типу самоцентрирующего патрона и состоит из гидроцилиндра, шток которого имеет рейку, кинематически связанную с зубчатым колесом, закрепленным на оси. Ось установлена в подшипниках в неподвижной части головки и передает вращение от зубчатого колеса диску, расположенному в подвижной части головки и имеющему спирали Архимеда. С помощью спирали Архимеда осуществляется перемещение державки бруска, которая установлена в направляющих подвижной части головки.

Работа механизма осуществляется следующим образом. Из лотка с помощью гидроцилиндра, шток которого снабжен упорной призмой, заготовка подается на торец шпинделя изделия и закрепляется с помощью магнитного патрона или прижимных роликов. Упорная призма одновременно играет роль жесткой опоры, при помощи которой заготовка центрируется на шпинделе изделия. После этого инструментальная головка опускается вниз, в результате чего абразивный брусок вводится в отверстие заготовки.

Срабатывает механизм подвода бруска, и он прижимается с заданной силой к обрабатываемой поверхности. Сила прижима регулируется давлением в гидроцилиндре. Нижняя подвижная часть инструментальной головки совершает шарнирное движение и передает его абразивному бруску. Брусок совершает плавное круговое движение вокруг точки пересечения осей инструментальной головки и оси симметрии заготовки. Это обеспечивает интенсивную очистку рабочей поверхности бруска от стружки и шлама. После удаления припуска механизм отводит брусок от обрабатываемой поверхности, инструментальная головка поднимается вверх и брусок выводится из отверстия заготовки. Следующая заготовка подается в зону обработки, выталкивая предыдущую в специальный накопитель.

Автоматы ВДА-70-Н изготовлены для Ростовского подшипникового завода, где они успешно эксплуатируются на операциях суперфиниширования наружных колец конических подшипников 7606.01, 7607.01 и 7608.01. Автоматы имеют быстросменные наладки, которые позволяют в течение 20-30 минут осуществлять переналадку оборудования.

Основные технические характеристики автомата ВДА 70Н представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Основные технические характеристики автомата ВДА-70Н

Наименование параметров	Размерность	Значения Параметров
1	2	3
1. Размеры заготовок : наружный диаметр высота кольца	мм	40-100 15-30
2. Производительность	шт/час	450-750
3. Число позиций	ед.	1
4. Частота вращения шпинделя изделия	об/мин	3000
5. Частота кругового движения головки	об/мин	100-500
6. Угол кругового движения головки	град.	1-3
7. Сила прижима бруска к заготовке	Н	30-150
8. Состав технологической жидкости: масло индустриальное И-5А ГОСТ 20799-75; олеиновая кислота марки "Б", вязкость Сст (при t=50°)	%	96-98 2-4
9. Расход технологической жидкости	л/мин	5
10. Объем бака технологической жидкости	л	95

1	2	3
11. Объем бака рабочей жидкости гидро-системы: масло индустриальное И-5А ГОСТ 20799-75	л	200
12. Суммарная установленная мощность электродвигателей	кВт	5
13. Уровень шума	дБ	менее 85
14. Габаритные размеры	м	0,8 × 0,8 × 1,9
15. Вес	т	1.2

К настоящему времени изготовлена партия автоматов ВДА 70Н. Несколько автоматов поставлено Саратовскому подшипниковому заводу. Они налажены на обработку наружных колец роликоподшипников 92705, которые использовались в качестве образцов при проведении экспериментальных исследований в гл. 4 данной работы. Выполненные исследования позволили найти рациональные условия обработки. Частота вращения заготовки на ВДА 70Н не регулируется и составляет 3000 об/мин. Частота кругового движения инструментальной головки также регулируется в пределах 100-500 об/мин. Рекомендуемая частота вращения головки 500 об/мин. Пониженная частота требуется при обработке желобов колец подшипников, когда необходимо обеспечить пониженную шероховатость поверхности и равномерный припуск вдоль обрабатываемой поверхности.

Эксцентрик, на который опирается подвижная часть инструментальной головки, выполнен сменным. В станках, поставленных СПЗ, он обеспечивает угол пересечения осей головки и заготовки, равный  $1,5^{\circ}$ .

Воспользовавшись математической моделью процесса формообразующего суперфиниширования, приведенной в гл. 4, нами были найдены рациональные условия обработки этих колец: зернистость бруска М7, твердость -20 ед., сила его прижима к заготовке - 120Н, время обработки - 6с. В качестве ограничений использовались следующие параметры: шероховатость обработанной поверхности  $R_a \leq 0,14$  мкм, волнистость  $W_z \leq 0,1$  мкм, отклонение от круглости  $\Delta \leq 0,6$  мкм, съем металла  $q \geq 6$  мкм, величина выпуклости профиля  $\delta \geq 0,6$  мкм. Эти данные соответствуют техническим требованиям, предъявляемым к технологической операции суперфиниширования наружных колец подшипников 92705 отделом главного технолога СПЗ. При этих условиях суперфиниширования были получены результаты, указанные в табл.5.2.

Результаты обработки наружных колец роликоподшипников 92705  
в производственных условиях

Наименование показателей	До обработки	После обработки
1. Шероховатость поверхности, мкм	0,22-0,30	0,10-0,12
2. Волнистость, мкм	0,20	0,05
3. Отклонение от круглости, мкм	0,72-0,68	0,35-0,58
4. Съем металла на диаметр, мкм	-	6-7
5. Выпуклость профиля	-	0,8-1,0

Как видно из табл. 5.2, все значения показателей качества отвечают принятым ограничениям и соответствуют техническим условиям на выполнение данной технологической операции.

На рис. 5.5 в качестве примера показана профилограмма и круглограмма одного из обработанных на станке ВДА 70Н колец, взятых случайным образом из производственной партии.

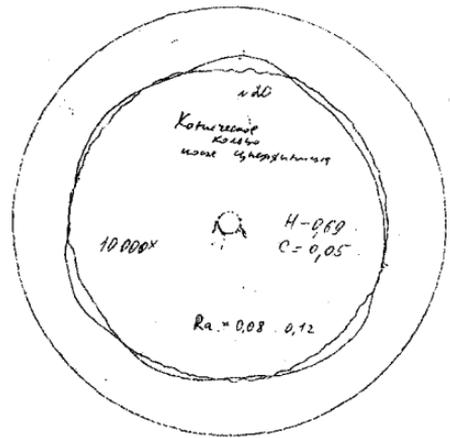
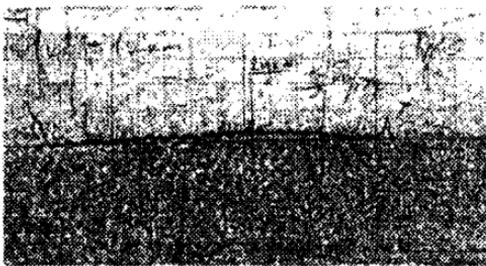


Рис. 5.5. Профилограмма и круглограмма наружного кольца подшипника 92705

Несколько автоматов ВДА 70Н было изготовлено для Ростовского подшипникового завода. Автоматы предназначены для обработки трех типоразмеров наружных колец конических роликоподшипников: 6-7606АУ, 6-7607АУ и 6-7510А. Операционные эскизы заготовки и детали показаны на рис. 5.6 и 5.7.

Кольца отличались не только размерами, но и углом конуса дорожки качения, который составлял на кольцах двух типоразмеров  $11^{\circ}51'35''$ , а на третьем кольце-  $15^{\circ}38'32''$ . Технические требования на суперфинишную операцию, предъявляемые Ростовским заводом, представлены в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Технические требования на операцию суперфинишной обработки  
наружных колец подшипников 6-7607АУ

Наименование требований	До обработки	После обработки
Непостоянство диаметра	0,0035 мм	0,0035 мм
Отклонение от круглости	0,002 мм	0,002 мм
Осевое биение	0,008 мм	0,008 мм
Разностенность	0,007 мм	0,007 мм
Отклонение от прямолинейности	0-0,0015 мм	0-0,0015 мм
Волнистость	0,0012 мм	0,0002 мм
Отклонение угла конуса	$\pm 0,0012$	$\pm 0,0012$
Шероховатость $R_a$	0,4 мкм	0,12 мкм
Ожоги, выявляемые холодным травлением		не допускаются

Как видно из табл. 5.3, большинство требований связано с тем, чтобы сохранить те геометрические параметры, которые получены на предшествующей шлифовальной операции, а задачей суперфиниширования являлось снизить шероховатость в 3-4 раза и волнистость в 6 раз.

Для выполнения заказа Ростовского подшипникового завода нами были выполнены экспериментальные исследования, аналогичные тем, что приводятся в гл.4, и определены рациональные условия обработки. Их результаты изложены в нашей публикации [118].

Фактические параметры суперфинишной обработки колец подшипника 6-7607АУ представлены в табл. 5.4.

Таблица 5.4

Геометрические параметры колец подшипников 607607АУ перед и после суперфинишной обработки

Наименование параметров	До обработки	После обработки
Волнистость поверхности, $W_z$ , мкм	0,50-1,10	0,05
Некруглость поверхности, Н, мкм	1,67-2,28	1,12-1,17
Шероховатость поверхности, $R_a$ , мкм	0,25-0,30	0,05 - 0,07
Выпуклость (+) или вогнутость (-) профиля $\Delta$ , мкм	- 3,0 - -10,0	+2 ÷ +4
Изменение угла конуса, сек	-	-20

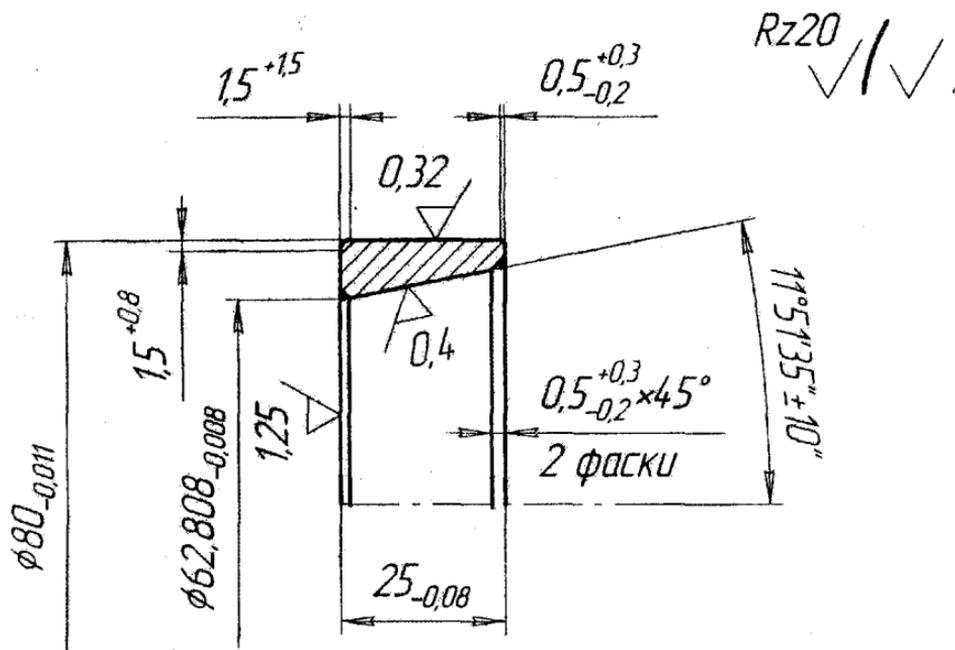


Рис. 5.6. Чертеж заготовки наружного кольца подшипника 6-7607AY

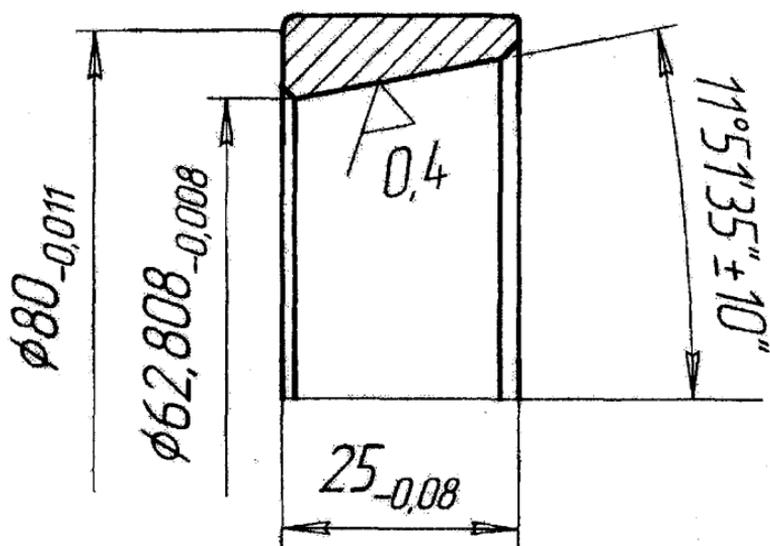


Рис. 5.7. Операционный эскиз детали наружного кольца подшипника 6-7607AY

Как видно из табл. 5.4, показатели качества конических колец подшипников после операции суперфиниширования по предложенному способу существенно улучшаются. Некруглость поверхности внутренних колец снижается в 1,5 раза, наружных колец - в 1,7 раза, волнистость колец уменьшается в 5-10 раз и не превышает 0,05 мкм.

Шероховатость поверхности наружных и внутренних колец при суперфинишной обработке брусками зернистости M14 не превышает 0,15 мкм, что надежно обеспечивает требования технических условий на изготовление подшипников. При необходимости шероховатость обработанной поверхности можно снизить до 0,08 мкм путем использования абразивных брусков зернистости M7.

Весьма эффективно исправляется непрямолинейность образующей дорожек качения колец. Обычно после шлифования образующая дорожек качения получается вогнутой, что недопустимо по техническим условиям. После операции суперфиниширования предложенным способом этот брак исправляется, а профиль дорожки качения становится выпуклым в пределах 2-4 мкм, что, как известно, способствует повышению долговечности подшипников.

Из табл. 5.4 видно, что в процессе суперфиниширования несколько изменяется угол конуса дорожек качения. Однако это изменение незначительно и не превышает 20 угловых секунд, что составляет менее 10% от допуска на этот геометрический параметр.

Для всех трех типов колец были выполнены сменные наладки. Смена наладок осуществлялась простым снятием стойки, на которой крепятся автооператор, накопитель и толкатель, и заменой ее другой. Для снятия и установки стойки достаточно ослабить или завернуть 4 болта, с помощью которой она крепится к столу станка.

Таким образом, предложенный способ может успешно использоваться для обработки не только цилиндрических колец, но и колец конических подшипников.

### **5.3 Экономическая эффективность практического использования результатов исследований**

Экономический эффект от использования результатов данной работы обеспечивается в сфере производства подшипников за счет повышения производительности операции суперфиниширования деталей подшипников и уменьшения капитальных вложений. Существующие конструкции суперфинишных автоматов, в основу которых, как правило, заложен класси-

ческий метод однобрусковой обработки, осуществляется в два технологических перехода. Такие станки выпускают известные германские фирмы “Супфина” и “Теленхауз”, стоимость которых составляет астрономическую для нашего производства цифру - 250000...350000 долларов США. Подобные станки выпускает единственный в СНГ завод “Ильич” в г. Санкт-Петербурге. Стоимость этого станка составляет 300 -500 тыс. рублей. Эти станки сложны в настройке, особенно при обработке желобов колец подшипников, бруски быстро изнашиваются, в результате чего требуется частая подналадка станка, бруски быстро засаливаются, что снижает производительность обработки, слабо исправляется исходная некруглость колец и погрешности формы деталей.

Рассмотрим возможный экономический эффект, получаемый от использования предложенной нами конструкции станка модели ВДА в сравнении со станками аналогичного назначения фирмы “Супфина” и завода “Ильич”. Расчет выполнен на основе методики, изложенной в работах [73, 74, 106]. Исходные данные для такого анализа представлены в таблице 5.5.

Таблица 5.5

*Исходные данные для анализа экономической эффективности от внедрения ВДА-70Н на операции суперфиниширования колец 6-92705-01*

Наименование показателей	Един. измер.	“Супфина” ФРГ	Завод “Ильич”	ВДА
Объем выпуска	тыс. шт.	1500	1500	1500
Оборудование:				
модель;		Супфина	ЛЗ-105	ВДА-
количество;	шт.	1	2	70Н
стоимость;	усл.ед.	250000	14000	1
мощность;	квт	8	8	12000
коэфф. загрузки	-	0.89	0.75	5
				0.75
Штучное время	час	0,003	0,004	0,002
Число операций	шт.	1	1	1
Разряд работ	-	6	6	4
Норма заработной платы	усл. ед./час	0,6	0,6	0,3

Расчет годового экономического эффекта от внедрения нового оборудования производится по формуле:

$$\Delta = \left[ (C_1 + E_n \cdot K_{y\partial 1}) \cdot \frac{B_2}{B_1} \times \frac{P_1 + E_n}{P_2 + E_n} + \frac{(u_1' - u_2') - E_n(K_2' - K_1')}{P_2 + E_n} - (C_1 + E_n \cdot K_{y\partial 2}) \right] \cdot A,$$

где  $\Delta$  - годовой экономический эффект;

$C_1$  и  $C_2$  - себестоимость объема работ по базовому и новому вариантам в расчете на единицу продукции;

$E_n$  - нормативный коэффициент эффективности,  $E_n=0,15$ ;

$K_{y\partial 1}$  и  $K_{y\partial 2}$  - удельные капитальные вложения в производственные фонды по базовому и новому вариантам;

$B_1$  и  $B_2$  - годовые объемы продукции, выпускаемой при использовании единицы соответственного базового и нового средств труда, шт.;

$B_2 / B_1$  - коэффициент учета роста производительности единицы нового средства труда по сравнению с базовым;

$\frac{P_1 + E_n}{P_2 + E_n}$  - коэффициент учета изменения срока службы нового средства труда по сравнению с базовым;

$P_1$  и  $P_2$  - доли отчислений от балансовой стоимости на полное восстановление базового и нового средства труда. Рассчитываются как величины, обратные срокам службы средства труда, определяемым с учетом морального износа;

$\frac{(u_1' - u_2') - E_n(K_2' - K_1')}{P_2 + E_n}$  - экономия потребителя на текущих издерж-

ках эксплуатации и отчислениях от сопутствующих капитальных вложений на весь срок службы нового средства труда по сравнению с базовым;

$K_1'$  и  $K_2'$  - сопутствующие капитальные вложения потребителя при использовании базового и нового средства труда в расчете на объем продукции, производимой с помощью нового средства труда;

$u_1'$  и  $u_2'$  - годовые эксплуатационные издержки потребителя при использовании им базового и нового средства труда в расчете на объем продукции, производимой с помощью нового средства труда;

$A$  - годовой объем выпуска продукции в расчетном году, шт.

В результате того, что издержки и сопутствующие капитальные затраты у потребителя не изменяются, экономия потребителя на текущих издержках эксплуатации и отчислениях от сопутствующих капитальных вложений за весь срок службы равна нулю. Годовые объемы продукции, выпускаемой при использовании единицы как базового, так и нового средства труда, остаются неизменными, т.е.  $B_1=B_2$ . Следовательно, коэффициент учета роста производительности единицы нового средства труда по сравнению с базовым равен единице, т.е.  $B_1/B_2=1$ .

После преобразования с учетом этих замечаний предыдущая формула примет вид:

$$\Xi = \left[ (C_1 + E_n \cdot K_{y01}) \cdot \frac{P_1 + E_n}{P_2 + E_n} - (C_1 + E_n \cdot K_{y02}) \right] \cdot A.$$

В указанной формуле величину  $(P_1 + E_n)/(P_2 + E_n)$  принимаем равной 1,2, так как использование данных автоматов снижает отклонение от круглости и, следовательно, повышает качество обработки.

Для расчета себестоимости обработки по старому и новому вариантам определим затраты на заработную плату, на электроэнергию, на амортизацию оборудования, на ремонт оборудования, на капитальные вложения.

Основная и дополнительная заработная плата определяются по формуле:

$$Z_{\text{з}} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_{\text{мн}} \cdot \sum_{i=1}^m C_i T_{\text{шт},i},$$

где  $C_i$  - часовая тарифная ставка по операциям;

$m$  - число технологических операций;

$K_1$  - коэффициент, учитывающий оплаты отпусков, за работу в ночное время, за обучение учеников и т.д. ( $K_1 = 1,08$ );

$K_2$  - коэффициент, учитывающий отчисления в пенсионный фонд, фонд медицинского страхования, соцстрах и т.д. ( $K_2 = 1,4$ );

$K_3$  - коэффициент, учитывающий премии и другую доплату ( $K_3 = 1,2$ );

$T_{\text{шт},i}$  - штучное время на  $i$ -ю операцию в часах;

$K_{\text{мн}}$  - коэффициент, учитывающий сокращение расценок при много-станочном обслуживании ( $K_{\text{мн}} = 1,0$ ).

Соответственно по вариантам:

$$Z_1 = 1,08 \cdot 1,4 \cdot 1,2 \cdot 0,6 \cdot 0,003 = 0,0032 \text{ усл.ед./шт.};$$

$$Z_2 = 1,08 \cdot 1,4 \cdot 1,2 \cdot 0,6 \cdot 0,004 = 0,0044 \text{ усл.ед./шт.};$$

$$Z_3 = 1,08 \cdot 1,4 \cdot 1,2 \cdot 0,3 \cdot 0,002 = 0,0011 \text{ усл.ед./шт.}$$

Затраты на электроэнергию определяются по формуле:

$$Z_{\text{э}} = N_{\text{у}} \cdot K_N \cdot K_T \cdot T_{\text{шт}} \cdot S_{\text{э}},$$

где  $N_{\text{у}}$  - суммарная мощность электродвигателей;

$K_N$  - коэффициент использования мощности ( $K_N = 0,5$ );

$K_T$  - коэффициент использования электродвигателей ( $K_T = 1,0$ );

$S_{\text{э}}$  - стоимость 1 квт.ч электроэнергии.

Для каждого из сравниваемых вариантов:

$$Z_{31} = 8 \cdot 0,5 \cdot 0,003 \cdot 0,02 = 0,00024 \text{ усл.ед./шт.}$$

$$Z_{32} = 8 \cdot 0,5 \cdot 0,004 \cdot 0,02 = 0,00032 \text{ усл.ед./шт.}$$

$$Z_{33} = 5 \cdot 0,5 \cdot 0,002 \cdot 0,02 = 0,0001 \text{ усл.ед./шт.}$$

Затраты на амортизацию оборудования рассчитываются по формуле:

$$Z_a = \frac{Ц_0 \cdot n \cdot k_a}{100 \cdot A} \cdot k_3$$

где  $C_0$  - стоимость единицы оборудования ;

$n$  - количество единиц оборудования на данной операции;

$k_3$  - коэффициент использования оборудования;

$k_a$  - процент амортизационных отчислений ( $k_a = 12,5\%$ ).

Численное значение амортизационных отчислений:

$$Z_a = \frac{250000 \cdot 1 \cdot 12,5}{100 \cdot 1500000} \cdot 0,89 = 0,0185 \text{ усл.ед./шт.};$$

$$Z_a = \frac{14000 \cdot 1 \cdot 12,5}{100 \cdot 1500000} \cdot 0,75 = 0,00087 \text{ усл.ед./шт.};$$

$$Z_a = \frac{12000 \cdot 1 \cdot 12,5}{100 \cdot 1500000} \cdot 0,75 = 0,0006 \text{ усл.ед./шт.}$$

Определим затраты на ремонт оборудования по видам работ при одинаковом количестве ремонтов в год:

$$Z_p = n \cdot (H_M K_M + H_Э K_Э) \cdot k_3 \cdot k_T / A,$$

где  $n$  - количество единиц оборудования на данной операции;

$H_M$  - группа ремонтной сложности по видам работ (для 8-й ремонтной сложности  $H_M = 31$  усл. ед.);

$H_Э$  - норматив годовых затрат на ремонт электрической части (для 8-й ремонтной сложности  $H_Э = 7$  усл. ед.);

$K_M$  - категория сложности ремонта механической части ( 4 );

$K_Э$  - категория сложности ремонта электрической части ( 2 );

$k_T$  - коэффициент точности оборудования ( 1,5 ).

Для каждого из трех вариантов:

$$Z_{p1} = 1 \cdot (31 \cdot 4 + 7 \cdot 2) \cdot 0,89 \cdot 1,5 / 1500000 = 0,00012 \text{ усл.ед./шт.}$$

$$Z_{p2} = 2 \cdot (31 \cdot 4 + 7 \cdot 2) \cdot 0,75 \cdot 1,5 / 1500000 = 0,00020 \text{ усл.ед./шт.}$$

$$Z_{p3} = 1 \cdot (31 \cdot 4 + 7 \cdot 2) \cdot 0,75 \cdot 1,5 / 1500000 = 0,00010 \text{ усл.ед./шт.}$$

Затраты на обслуживание и эксплуатацию оборудования:

$$Z_o = n \cdot K_{мч} \cdot T_{шт.} \cdot S_o,$$

где  $S_o$  - стоимость эксплуатации оборудования в единицу времени (  $S_o = 0,25$  усл. ед./час.);

$K_{мч}$  - коэффициент машино-часа.

В том числе по вариантам:

$$Z_{01} = 1 \cdot 0,25 \cdot 0,003 \cdot 1,2 = 0,0009 \text{ усл.ед./шт.}$$

$$Z_{02} = 2 \cdot 0,25 \cdot 0,004 \cdot 1,2 = 0,0024 \text{ усл.ед./шт.}$$

$$Z_{03} = 1 \cdot 0,25 \cdot 0,002 \cdot 1,2 = 0,0006 \text{ усл.ед./шт.}$$

Капитальные затраты определяем по формуле:

$$K = n \cdot Ц_0 / A,$$

в том числе по вариантам:

$$K1 = 1 \cdot \frac{250000}{1500000} = 0,167 \text{ усл.ед./шт.}$$

$$K2 = 2 \cdot \frac{14000}{1500000} = 0,018 \text{ усл.ед./шт.}$$

$$K1 = 1 \cdot \frac{12000}{1500000} = 0,008 \text{ усл.ед./шт.}$$

Результаты расчета технико-экономических показателей технологических процессов комплектования подшипников по трем сравниваемым вариантам приведены в табл. 5.6. При этом учитывалось, что себестоимость изготовления продукции по существующему варианту осуществляется на старом, изношенном технологическом оборудовании и составляет 0,018 усл. ед.

Таблица 5.6

Показатели технико-экономической эффективности промышленного использования ВДА-70Н

Наименование Показателей	Ед. измер.	“Супфина” ФРГ	Завод “Ильич”	Новая техника
1	2	3	4	5
Годовой объем выпуска	тыс.шт.	1500	1500	1500
Капитальные вложения	усл. ед.	250000	28000	12000
Себестоимость годового объема выпуска, в том числе:		34350	12300	3750
•основная и дополнит. зарплата;		4800	6600	1650
•амортизация оборуд.;		27750	1350	900
•электроэнергия;		300	450	150
•обслуживание и ремонт оборудования;		150	300	150
•эксплуатация и содержание оборудования;		1350	3600	900
•прочие расходы ;				-

1	2	3	4	5
Годовой экономический эффект: <ul style="list-style-type: none"> <li>• «Теленхауз»</li> <li>• ЛЗ</li> <li>• СПЗ</li> </ul>	усл. ед.			-44850 10500 21450
Срок окупаемости капитальных вложений: <ul style="list-style-type: none"> <li>• «Теленхауз»</li> <li>• ЛЗ</li> <li>• СПЗ</li> </ul>	год			- 2,6 0,6

Одна условная единица примерно соответствует одному доллару США. Курс доллара США на 01.05.1999г. в рублевом эквиваленте составлял примерно 25 руб., поэтому годовой экономический эффект от внедрения новой технологии и оборудования в условиях ОАО СПЗ составлял 536000 руб. в расчете на один автомат.

Одним из важнейших показателей эффективности новой техники является срок окупаемости капитальных вложений, который, как видно из табл. 5.6, составляет всего 0,6 года. Таким образом, затраты на внедрение новой техники быстро окупаются.

### Заключение

1. Проведен анализ состояния существующей технологии суперфиниширования деталей типа наружных колец подшипников качения, который показал необходимость ее дальнейшего совершенствования. Особого внимания заслуживает исследование технологических возможностей и на этой основе – дальнейшее совершенствование формообразующего суперфиниширования, как наиболее перспективной технологии окончательной обработки такого типа деталей подшипников.

2. Выполнены исследования кинематических особенностей формообразующего суперфиниширования наружных колец роликоподшипников, которые позволили определить влияние условий обработки на форму абразивного бруска и на степень его самозатачивания в процессе снятия припуска.

3. Рассмотрен механизм снятия припуска и формирования профиля

обрабатываемой поверхности в процессе формообразующего суперфиниширования внутренних поверхностей деталей, теоретически обоснована возможность рационального профилирования обрабатываемой поверхности при обеспечении определенных условий, в том числе заданной степени очистки рабочей поверхности инструмента от стружки и шлама.

4. Разработана программа численного расчета съема припуска и выпуклости формы профиля заготовки в процессе формообразующего суперфиниширования внутренних поверхностей. Выполнен анализ влияния технологических факторов формообразующего суперфиниширования внутренних поверхностей на результаты обработки. Определена область рациональных условий обработки. Показано, что предложенные математические модели адекватно описывают результаты опыта.

5. Выполнены экспериментальные исследования, которые позволили установить зависимости влияния основных технологических факторов на показатели операции формообразующего суперфиниширования при обработке наружных колец роликоподшипника 92705. Показано, что основное влияние на результаты суперфиниширования оказывают зернистость инструмента, угол пересечения осей инструментальной головки и изделия, сила прижима брусков к обрабатываемой поверхности и время обработки. С увеличением значений первых трех факторов шероховатость поверхности, волнистость, отклонение от круглости, величина выпуклости и съем металла возрастают, а с уменьшением - снижаются.

6. Установлено, что формообразующее суперфиниширование обеспечивает существенное снижение не только волнистости, но и гранности и некруглости, а также придает обработанной поверхности выпуклую форму, что, как известно, благоприятно сказывается на работоспособности подшипников.

7. Выполненные исследования позволили определить рациональные условия обработки дорожек качения роликоподшипников типа 92705: время обработки  $\tau = 6-7$  с., частота вращения изделия  $n_z = 3000$  об/мин., частота вращения инструментальной головки  $n_b = 500$  об/мин., сила прижима бруска к обрабатываемой поверхности  $P = 60$  Н., угол пересечения осей изделия и инструментальной головки  $\alpha = 1,5$  градуса, зернистость брусков M14, твердость CM2.

8. На основе выполненных исследований предложена новая технология формообразующего суперфиниширования деталей типа наружных колец подшипников качения, разработана соответствующая техника ее осуществления, определена область рационального применения. Для защиты

приоритета на использование данной технологии подана заявка на патент и получено положительное решение Роспатента.

9. Результаты исследований внедрены в Саратовском НПШ НИМ, которое с 1998г. осуществляет производство суперфинишных автоматов модели ВДА-70Н, в основу которых заложена предложенная технология. Автоматы поставляются Саратовскому подшипниковому заводу, а также Ростовскому подшипниковому заводу. Расчет экономической эффективности от использования данных автоматов показал, что в условиях СПЗ срок их окупаемости составляет менее одного года, обеспечивается годовой экономический эффект в сумме 536 тыс. рублей в расчете на одну единицу оборудования. Автоматы обеспечивают производительность 450-750 изделий в час, высокое качество, удовлетворяющее требованиям, предъявляемым к подшипникам 6...2 классов точности.

## Библиографический список

1. Билик Ш.М. Макрогеометрия деталей машин. - М.: Машиностроение, 1973. - С.336.
2. Брозголь И.М. Влияние доводки рабочих поверхностей колец на уровень вибрации подшипников //Труды ин-та/ ВНИПП. -М., 1962. - №4. -С.42-48.
3. Вайтус Ю.М., Максимова Л.А., Лившиц З.Б. и др. Исследование распределения долговечности сферических двухрядных роликоподшипников при испытании на усталость //Труды ин-та/ ВНИПП. - М., 1975. -№4(86). - С.16-19.
4. Вениаминов К.Н., Василевский С.В. Влияние финишной операции на долговечность подшипников качения //Труды ин-та/ ВНИПП. - М., 1989. - №1. - С.3-23.
5. Елизаветин М.А., Сатель Э.А. Технологические способы повышения долговечности машин. - М.: Машиностроение, 1969. - 389 с.
6. Колтунов И.Б. и др. Прогрессивные процессы абразивной, алмазной и эльборовской обработки в подшипниковом производстве. - М.: Машиностроение, 1976. - 30 с.
7. Подшипники качения: Справочник-каталог. //Под ред. В.Н.Нарышкина и Р.В.Коросташевского. - М.: Машиностроение, 1984. - 280с.
8. Рудзит Л.А. Микрогеометрия и контактное взаимодействие поверхностей. - Рига: Знание, 1975. - 176 с.
9. Рыжов Э.В., Суслов А.Г., Федоров В.П. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. -М.: Машиностроение, 1979.-С.82-96.
10. Heydepy M., Gohar R. The influence of axial profile on pressure distribution in radially loaded rollers //J. of Mechanical Engineering Science.- 1979.-V.21.-P.381-388.
11. Зыков Е.И., Китаев В.И. и др. Повышение надежности и долговечности роликоподшипников. - М.: Машиностроение, 1969. - 109 с.
12. Королев А.В. Расчет и конструирование подшипников качения: Учебное пособие /СПИ.- Саратов, 1984. - 63с.
13. Кочетков А.М., Сандлер А.И. Прогрессивные процессы абразивной, алмазной и эльборовской обработки в станкостроении. - М.: Машиностроение, 1976. - 31с.
14. Спришевский А.И. Подшипники качения. - М.: Машиностроение, 1969. - 631с.
15. Welterentwickelte DKFDDR Zylinderrollenlager in leistung gesteigerter Ausfuhrung ("E"-Lager)// Hansa. - 1985. - 122. - N5. - P.487-488.

16. Бережинский В.М. Влияние перекоса колец бомбинированного конического роликоподшипника на характер контакта торца ролика с опорными бортами //Тр.ин-та/ ВНИИП. - М., 1981.-№2. С.28-30.
17. Вирабов Р.В., Борисов В.Г. и др. К вопросу о перекосе роликов в направляющих качения // Изв.вузов. Машиностроение. - 1978. - №10. С.27-29.
18. Галахов М.А., Фланман Я.Ш. Оптимальная форма бомбинированного ролика //Вестн.машиностроения. - 1986. - №7. - С.36-37.
19. Жевтунов В.П. Выбор и обоснование функции распределения долговечности подшипников качения //Тр.ин-та /ВНИИП. - М., 1966. - №1(45). - С.16-20.
20. Квасов В.И., Циханович А.Г. Влияние перекосов на долговечность цилиндрических роликоподшипников // Контактно-гидродинамическая теория смазки и ее практическое применение в технике: Сб. статей. - Куйбышев, 1972. - С.29-30.
21. Лейках Л.М. Перекос роликов в направляющих качения //Вести. машиностроения.- 1977. - №6. - С.27-30.
22. Папшев Д.Д. и др. Точность формы профиля поперечного сечения колец подшипников // Обработка высокопрочных сталей и сплавов инструментом из сверхтвердых синтетических материалов. - Куйбышев, 1980. - №2. - С.42-46.
23. Папшев Д.Д., Бударина Г.И. и др. Точность формы профиля поперечного сечения колец подшипников // Межвуз.сб.науч.тр. - Пенза, 1980. - №9 - С.26-29.
24. Спицин Н.А. Теоретические исследования в области определения оптимальной формы цилиндрических роликов //Тр.ин-та/ ВНИИП. - М., 1963. - №1(33). С. 12-14.
25. Demaid A.P., Mather I. Hollow-ended rolles reduce bearing wear //Des Eng. - 1972. - N11. - P.211-216.
26. Королев А.В. Выбор оптимальной геометрической формы контактирующих поверхностей деталей машин и приборов. - Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1972.
27. Орлов А.В. Оптимизация рабочих поверхностей опор качения.- М.: Наука, 1973.
28. А.с. 800450 (СССР), МНИ 16С 33/34. Ролик для подшипников качения /В.Э.Новиков // Бюл. изобр. 1981.№ 4.
29. А.с. 1141237 (СССР), МИМ 16С 19/06. Подшипник качения / А.В.Королев // Бюл. изобр. 1985. № 7.
30. Болкунов В.В., Дорофеев В.Ю. Новые конструкции подшипников способствуют техническому прогрессу и созданию конкурентноспособной машиностроительной продукции // Прогрессивные направления развития

технологии машиностроения: Межв. научн. сб. - Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1993. - С. 9-18.

31. Куликов С.И., Ризванов Ф.Ф. и др. Прогрессивные методы хонингования. - М.: Машиностроение, 1983. - 136 с.

32. Красненков В.И. О применении теории Герца к одной пространственной контактной задаче //Изв.вузов. Машиностроение. - 1956. №1. - С.16-25.

33. Опоры осей и валов машин и приборов /Н.А.Спицин, М.М. Машнев, Е.Н.Красковский и др. - М.;Л.: Машиностроение, 1970. - 520с.

34. Патент 12.48.411П ФРГ, МКИ 16С 19/52 33/34. Цилиндрический роликоподшипник //РЖ. Машиностроительные материалы, конструкции и расчет деталей машин. Гидропривод. -1984. №12.

35. Пинегин С.В., Орлов А.В., Табачников Ю.Б. Прецизионные опоры качения и опоры с газовой смазкой. - М.: Машиностроение, 1984. - С. 18.

36. Саверский А.С. и др. Влияние перекоса колец на работоспособность подшипников качения: Обзор. - М.: НИИАвтопром, 1976. - 55 с.

37. Спицин Н.А. и др. Высокоскоростные шарикоподшипники: Обзор. - М.: НИИ Автосельхозмаш, 1966. - 42с.

38. 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.

39. Чихирев А.Я., Давиденко О.Ю., Решетников М.К. Результаты экспериментальных исследований способа размерного суперфиниширования желобов колец шарикоподшипников //Чистовые методы обработки: Межвуз. сб./СПИ.-Саратов,1984. - С. 18-21.

40. Яхин Б.А. Прогрессивные конструкции подшипников качения // Тр.ин-та/ ВНИИП. -М., 1981. -№4. - С. 1-4.

41. Ящерицин П.И. Исследование механизма образования шлифованных поверхностей и их эксплуатационных свойств: Дис. ... докт.техн.наук: 05.02.08. - Минск, 1962. -210 с.

42. Чихирев А.Я. Расчет кинематической зависимости при доводке поверхностей вращения с криволинейной образующей // Чистовая обработка деталей машин: Межвуз. сб./ СПИ. - Саратов, 1982. - С. 7-17.

43. Королев А.А., Давиденко О.Ю. 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. междуна. конф. -Пенза, 1996. - С. 102-103.

44. Бродский А.С. О форме шлифовального и ведущего круга при бесцентровом шлифовании выпуклой поверхности роликов с продольной подачей //Тр. ин-та/ ВНИПП. - М., 1985. -№4(44). - С.78-92.
45. Выставка. "Станки ФРГ в Москве" / Сост. Н.Г.Эдельман //Подшипниковая промышленность: Научн.-техн. реф. сб. - М.: НИИАвтопром, 1981. Вып.3. - С. 32-42.
46. Комиссаров Н.И., Рахматуллин Р.Х. Технологический процесс обработки бомбонированных роликов //Экспресс - информация. Подшипниковая промышленность. -М.: НИИАвтопром, 1974. Вып.11. - С.21-28.
47. Королев А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. - 191с.
48. Кузнецов И.П. Методы бесцентрового шлифования поверхностей тел вращения (деталей подшипников качения): Обзор /ВНИИЗ. - М., 1970. - 43 с.
49. 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.
50. Кремьен З.И. и др. Суперфиниширование высокоточных деталей - М.: Машиностроение, 1974. - 114 с.
51. Митирев Т.Т. Расчет и технология изготовления выпуклых дорожек качения колец роликовых подшипников // Подшипник. - 1951. - С.9-11.
52. Гордеев А.В. Гибкий абразивный инструмент, применяемый в машиностроении: Обзорная информ. /Филиал ЦНИИТЭИавтосельхозмаша.- Тольятти, 1990. - 58с.
53. Гришкевич А.В., Капуста В.А., Топоров О.А. Способ отделочной обработки стальных закаленных деталей // Вестник машиностроения. - 1973. №9 - С.55-57.
54. Еланова Т.О. Финишная обработка изделий алмазными шлифовальными инструментами:-М.: ВНИИТЭМР, 1991 - 52с.
55. Наерман М.С. Прогрессивные процессы абразивной, алмазной и эльборовой обработки в автомобилестроении. - М.: Машиностроение, 1976. - 235 с.
56. Евсеев Д.Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке. –Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. - 127с.
57. Редько С.Г. Процессы теплообразования при шлифовании металлов. - Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1962. - 331 с.
58. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. - М.: Машиностроение, 1974. - 280 с.

59. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование. - Л.: Машиностроение, 1979. - 248 с.
60. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. - М.: Машиностроение, 1975. -176 с.
61. Королев А.В., Новоселов Ю.К. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Часть 1. Состояние рабочей поверхности инструмента. - Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1987. - 160 с.
62. Королев А.В., Новоселов Ю.К. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Часть 2. Взаимодействие инструмента и заготовки при абразивной обработке. - Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1989. - 160 с.
63. А.с. № 598736 (СССР). Способ чистовой обработки деталей типа колец подшипников качения / О.В.Таратынов // Бюл. изобр. 1978.№ 11.
64. А.с. 475255 (СССР), МНИ В 24В 1/100, 35/00. Способ отделочной обработки цилиндрических поверхностей, ограниченных буртами /А.В. Гришкевич, А.В. Ступина // Бюл. изобр. 1982. № 5.
65. А.с. 837773 (СССР), МКИ В24В 1/00, 19/06. Способ суперфиниширования беговых дорожек подшипников качения /В.А.Петров, А.Н.Рузанов // Бюл. изобр. 1981.№ 22.
66. А.с. 880702 (СССР). МНИ В24В 33/02. Хонинговальная головка /В.А. Капуста, В.Г. Евтухов, А.В. Гришкевич // Бюл. изобр. 1981. № 8.
67. Бочкарева И.И. Исследование процесса образования выпуклой поверхности цилиндрических роликов при бесцентровом суперфинишировании с продольной подачей: Дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. - Саратов, 1974.
68. Ермаков Ю.М., Степанов Ю.С. Современные тенденции развития абразивной обработки. - М., 1991. - 52 с. (Машиностроительное пр-во. Сер. Технология и оборуд. Обработки металлов резанием: Обзор. информ. //ВНИИТЭМР. 1997. Вып.3.
69. 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.
70. Кремьен З.И. и др. Суперфиниширование высокоточных деталей - М.: Машиностроение, 1974. - 114 с.
71. Патент №3007314 (ФРГ) Способ суперфиниширования дорожек качения колец с буртиками и устройство для его осуществления // Залька. Выдержки из патентных заявок для всеобщего ознакомления.-1982. - С.13-14.
72. Королев А.А., Давиденко О.Ю. и др. Технологическое обеспечение изготовления опор качения с рациональной геометрией контакта. -Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1996. - 92с.

73. Королев А.В., Чистяков А.М., Давиденко О.Ю., Королев А.А. Новые прогрессивные технологии машиностроительного производства. Ч.2. Теоретические основы многобрускового формообразующего суперфиниширования с локализацией контакта инструмента и обрабатываемой поверхности. - Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1997. - 216с.

74. Королев А.В., Чистяков А.М., Давиденко О.Ю. Новые прогрессивные технологии машиностроительного производства. Ч.3. Технология многобрускового формообразующего суперфиниширования с локализацией контакта инструмента и обрабатываемой поверхности. - Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1997. - 152с.

75. Чихирев А.Я. Разработка и исследование способа суперфиниширования криволинейных поверхностей вращения с прямолинейной осевой осцилляцией инструментов: Дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. - Саратов, 1983.

76. Гебель И.Д. и др. Ультразвуковой суперфиниш. - Л.: ЛДНТП, 1978. - 218 с.

77. Родзевич Н.В. Обеспечение работоспособности спаренных цилиндрических роликоподшипников //Вестник машиностроения. - 1967. №4. - С.12-16.

78. Корьячев А.Н., Блохина Н.М. Оптимизация значения контролируемых параметров при обработке желоба колец шарикоподшипников способом винтовой осцилляции //Исследования в области технологии механической обработки и сборки. - Тула, 1982. -С.66-71.

79. Доводочный автомат модели 91А. /Техническое описание. 4ГПЗ,- Куйбышев, 1979. - 42с.

80. Ипполитов Г.М. Абразивно-алмазная обработка. -М.: Машиностроение, 1969. -335 с.

81. Кремень З.И., Массарский М.Л. Турбоабразивная обработка деталей сложного профиля: Методические рекомендации. - М.: НИИмаш, 1979.-38с.

82. Кремень З.И., Массарский М.Л. Турбоабразивная обработка деталей - новый способ финишной обработки //Вестник машиностроения. - 1977. - №8. -С. 68-71.

83. Кремень З.И. Технологические возможности нового способа абразивной обработки кипящим слоем абразива //Эффективность процессов механической обработки и качество поверхности деталей машин и приборов: Сб. науч.тр. - Киев: Знание, 1977. -С. 16-17.

84. Кремень З.И. Новое в механизации и автоматизации ручных операций отделочной абразивной обработки деталей сложного профиля

//Тезисы докладов Всесоюзного научно-технического симпозиума «Шлифование-82». - М.: НИИмаш, 1982. - С. 37-39.

85. Королев А.В., Давиденко О.Ю. Формообразующая абразивная обработка прецизионных деталей многобрусковыми инструментальными головками //Сб. докл. международной науч.-техн. конф. по инструменту. - Мишкольц (ВНР), 1989. - С.127-133.

86. Королев А.А. Совершенствование технологии формообразующего многобрускового суперфиниширования деталей типа колец подшипников качения: Дис...канд. техн. наук. -Саратов, 1996. - 129с.

87. Королев А.В., Чистяков А.М. Высокоэффективная технология и оборудование для суперфиниширования точных деталей //Конструкторско-технологическая информатика -2000: Труды конгресса. Т1 / IV международный конгресс. - М.: Станкин, 2000.- С. 289-291.

88. А.с. № 292755 (СССР), МКИ В24В 19/06. Способ суперфиниширования с дополнительным движением бруска / С.Г. Редько, А.В. Королев, А.И. Спришевский // Бюл. изобр. 1972.№ 8.

89. Плотников В.М. Исследование процесса суперфиниширования желобов колец шарикоподшипников с дополнительным движением бруска: Дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. -Саратов, 1974. - 165с.

90. А.с. №381256 (СССР), МКИ В24Н 1/00, 19/06. Способ окончательной обработки деталей / С.Г. Редько, А.В.Королев, М.С. Крепс и др.// Бюл. изобр. 1975. № 10.

91. Королев А.В., Капутьник С.И., Евсеев Д.Г. Комбинированный способ шлифования - доводки качающимся кругом. - Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1983. - 96 с.

92. Патент № 3958371 (США). Способ абразивной обработки / А.В.Королев, С.Г. Редько// Бюл. изобр. 1978. № 14.

93. Патент № 1002030. (Италия). Способ и устройство для абразивной обработки / А.В. Королев, С.Г. Редько // Бюл. изобр. 1979. № 4.

94. Патент № 3958568 (США). Устройство для абразивной обработки/ А.В. Королев, С.Г. Редько // Бюл. изобр. 1981. № 13.

95. А.с. № 916268 (СССР), МКИ В24В 35/00. Головка для суперфинишной обработки поверхностей вращения с криволинейной образующей /А.В.Королев, А. Я. Чихирев // Бюл. изобр. 1980. № 7.

96. Королев А.В., Чихирев А. Я. Суперфинишные головки для доводки желобов шарикоподшипников //Чистовая обработка деталей машин: Межвуз. научн. сб./СПИ. - Саратов, 1982. - С.8-11.

97. А.с. № 199593 (СССР), МКИ В24Н 1/100, 19/06. Способ абразивной обработки поверхностей вращения/ А. В. Королев // Бюл. изобр. 1985. -№ 47.

98. Давиденко О.Ю., Гуськов А.В. Способ брусковой доводки с повышенной универсальностью и технологической гибкостью //Состояние и перспективы развития ГПС механообработки в условиях хозрасчета и самофинансирования: Межвуз. науч. сб. - Ижевск, 1989. -С. 30.

99. Давиденко О.Ю., Савин С.В. Многобрусковое суперфиниширование дорожек качения колец роликоподшипников // Чистовая обработка деталей машин: Межвуз. сб. - Саратов, 1985. - С.51-54.

100. А.с. №1337238 (СССР), МКИ В24В 35/00. Способ чистовой обработки / А.В. Королев, О.Ю. Давиденко, А.Г. Маринин// Бюл. изобр. 1987. № 17.

101. Патент № 1706134 (РФ). Способ чистовой обработки абразивными брусками / А.В. Королев, А.М. Чистяков, О.Ю. Давиденко // Бюл. изобр. 1991. -№ 5.

102. Патент №1738605 (РФ). Способ чистовой обработки/ А.В.Королев, О.Ю. Давиденко // Бюл. изобр. 1992.- № 21.

103. Королев А.А. Исследование рационального режима многобрусковой доводки и разработка практических рекомендаций по его осуществлению // «Technology-94»: Тез. докл. междунаод. науч.-техн. конф. - СПб, 1994. -С. 62-63.

104. Королев А.А., Давиденко О.Ю. Формирование параболического профиля роликовой дорожки на стадии многобрусковой доводки //Прогрессивные направления развития технологии машиностроения: Межвуз. науч. сб. - Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1995. -С.20-24.

105. Королев А.А., Игнатьев А.А., Добряков В.А. Испытание доводочных автоматов МДА-2500 на технологическую надежность //Прогрессивные направления развития технологии машиностроения: Межвуз. науч. сб. - Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1993. -С. 62-66.

106. Патент № 1781015 А1 (SU). Хонинговальная головка/ А.В.Королев, Ю.С. Зацепин // Бюл. изобр. 1992. № 46.

107. Патент № 1823336 (SU). Станок для хонингования дорожек качения колец подшипников / А.В. Королев, А.М. Чистяков и др.// Бюл. изобр. 1993. № 36.

108. Патент № 2009859 (РФ) Устройство для абразивной обработки / А.В. Королев, И.А. Яшкин, А.М. Чистяков // Бюл. изобр. 1994. № 6.

109. Патент № 2036773 (РФ). Устройство для абразивной обработки. / А.В. Королев, П.Я. Коротков и др.// Бюл. изобр. 1995. № 16.

110. Патент № 2057631 (РФ). Устройство для обработки беговых дорожек колец подшипников / А.В. Королев, П.Я. Коротков и др.// Бюл. изобр. 1996. № 10.

111. Патент № 2070850 (РФ). Устройство для абразивной обработки беговых дорожек колец подшипников /А.В. Королев, Л.Д. Рабинович и др.

// Бюл. изобр. 1996. № 36.

112. Патент № 2072293 (РФ). Устройство для абразивной обработки / А.В.Королев, Л.Д. Рабинович, Б.М. Бржозовский // Бюл. изобр. 1997. № 3.

113. Патент № 2072294 (РФ). Способ чистовой обработки / А.В. Королев и др. // Бюл. изобр. 1997. № 3.

114. Патент № 2072295 (РФ). Способ чистовой обработки / А.В.Королев и др. // Бюл. изобр. 1997. № 3.

115. Патент № 2086389 (РФ) Устройство для чистовой обработки / А.В. Королев и др. // Бюл. изобр. 1997. № 22.

116. Патент 2024385 (РФ). Способ чистовой обработки/ А.В.Королев, Комаров В.А. и др. // Бюл. изобр. 1994. № 23

117. Патент № 2074083 (РФ) Устройство для суперфиниширования/ А.В. Королев и др. // Бюл. изобр. 1997. № 2.

118. Асташкин А.В., Королев А.В. Эффективность суперфиниширования конических поверхностей деталей подшипников // Актуальные проблемы анализа и обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем: Сб. докл. междунар. науч.-техн. конф. – Пенза: ПГУ, 1998. – С. 209-211.

119. Асташкин А.В. Механизм процесса формообразующего суперфиниширования дорожки качения наружных колец роликоподшипников // Актуальные проблемы анализа и обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем: Сб. докл. междунар. науч.-техн. конф. – Пенза: ПГУ, 1998. – С. 218-220.

120. Методика выбора и оптимизации контролируемых параметров технологического процесса: РДМУ 109-77. – М.: Стандарты, 1976. – 63с.

121. Муцянюк В.М., Островский В.И. Планирование экспериментов при исследовании процесса шлифования // Абразивы и алмазы. – 1966. – № 3. – С. 27-33.

122. Монахов В.М., Беляев Э.С., Краснер А.Я. Методы оптимизации. – М.: Просвещение, 1978. – 175с.

123. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. – М.: Наука, 1965. – 340 с.

124. Народецкий И.М. Статистические оценки надежности подшипников качения // Тр. ин-та /ВНИПИ. – М., 1965. – №4(44): С. 4-8.

125. Чеповецкий И.Х. Основы финишной алмазной обработки. – Киев: Наук.думка, 1980. – 467 с.

126. Родзевич Н.В. Экспериментальное исследование деформаций и сопряжений по длине контактирующих сплошных цилиндров // Машиноведение. – 1966. – №1. – 0.9-13.

127. Родзевич Н.В. Выбор и расчет оптимальной образующей тел качения для роликоподшипников // Машиноведение. – 1970. – №4. – С.14-16.

Введение.....	3
<b>Глава 1. Современная технология суперфиниширования деталей типа колец подшипников качения.....</b>	<b>5</b>
<b>Глава 2. Основы формирования профиля заготовки на операциях суперфиниширования.....</b>	<b>25</b>
2.1. Механизм профилирования обрабатываемой поверхности.....	25
2.2. Алгоритм расчета величин снимаемого припуска и профиля обработанной поверхности.....	65
2.3. Анализ влияния технологических факторов на выходные параметры обработки.....	75
Выводы.....	86
<b>Глава 3. Методика экспериментальных исследований и обработки экспериментальных данных.....</b>	<b>88</b>
3.1. Объект и условия проведения исследований.....	88
3.2. Экспериментальная установка, измерительные приборы и оборудование.....	91
3.3. Методика проведения многофакторного эксперимента и обработки экспериментальных данных.....	94
Выводы.....	98
<b>Глава 4. Экспериментальные исследования технологических возможностей формообразующего суперфиниширования.....</b>	<b>99</b>
4.1. Зависимость эффективности и качества обработки от характеристики инструмента и времени суперфиниширования.....	99
4.2. Зависимость эффективности и качества обработки от режимов суперфиниширования.....	108
4.3. Методика определения рациональных условий обработки.....	118
Выводы.....	120
<b>Глава 5. Практические рекомендации и эффективность использования полученных результатов.....</b>	<b>122</b>
5.1. Предлагаемая технология суперфиниширования деталей подшипников.....	122
5.2. Предлагаемое технологическое оборудование.....	126
5.3. Экономическая эффективность практического использования результатов исследований.....	136
Заключение.....	142
Библиографический список.....	145

Научное издание

КОРОЛЕВ Андрей Альбертович

СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМООБРАЗУЮЩЕГО  
СУПЕРФИНИШИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ  
ДЕТАЛЕЙ ВРАЩЕНИЯ СЛОЖНОГО ПРОФИЛЯ

Редактор З.И. Шевченко

Лицензия ЛР № 020271 от 15.11.96

Подписано в печать 15.02.01.

Формат 60×84 1/16

Бум. тип. Усл. печ.л. 9,06(9,75)

Уч.-изд.л 9,5

Тираж 100 экз. Заказ 476

С98

Саратовский государственный технический университет  
410054 г. Саратов, ул. Политехническая, 77

Копипринтер СГТУ, 410054 г. Саратов, ул. Политехническая, 77