

На правах рукописи



Плотников Александр Афанасьевич

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МИНИАТЮРНЫХ
ДЕТАЛЕЙ И ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ АЛМАЗНОГО
МИКРОВЫГЛАЖИВАНИЯ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ
СТАБИЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА**

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Рыбинск – 2005

Работа выполнена в Пермском государственном техническом университете

Научный руководитель

Заслуженный работник высшей школы
кандидат технических наук, профессор
Евсин Евгений Афанасьевич

Официальные оппоненты

доктор технических наук, профессор
Букатый Станислав Алексеевич

кандидат технических наук, доцент
Чарковский Юрий Касперович

Ведущая организация

ОАО «Пермский моторный завод» (г Пермь)

Защита диссертации состоится "16" июня 2005 г в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.210.01 Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева (152954, г Рыбинск, Ярославская область, ул. Пушкина, 53, ауд. 237)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева

Автореферат разослан "12" мая 2005 г

Учёный секретарь
диссертационного совета



Конюхов Б М

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В авиационном приборостроении и химическом машиностроении существует обширная группа миниатюрных деталей, имеющих малые размеры: диапазон диаметров от 1,0 до 6,0 мм, диапазон длин поверхностей от 1,0 до 16,0 мм. Кроме того, эти детали часто обладают малой жесткостью. При их изготовлении на финишных операциях применяют технологии шлифования, доводки, полирования. Данные операции абразивной отделочной обработки миниатюрных деталей имеют высокую трудоемкость и себестоимость, а также низкую производительность.

Существует технология алмазного микровыглаживания, при которой используется местная пластическая деформация, создаваемая в поверхностном слое миниатюрной детали вследствие определённого контактного взаимодействия сверхтвёрдого и гладкого деформирующего элемента – алмазного микровыглаживателя с обрабатываемой поверхностью. В сравнении с другими видами обработки алмазное микровыглаживание обеспечивает снижение себестоимости и повышение производительности изготовления миниатюрных деталей. В связи с этим данная технология является перспективной в производстве деталей этого класса. Таким образом, снижение себестоимости и повышение производительности изготовления миниатюрных деталей является актуальной задачей.

Однако применение алмазного микровыглаживания показало, что этот процесс может сопровождаться вибрациями технологической системы. Это приводит к нестабильности обеспечения качества поверхностного слоя миниатюрных деталей. Создание технологических условий стабильного обеспечения качества невозможно без получения соответствующих научных знаний.

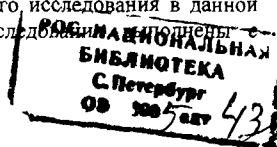
Таким образом, существует **научная проблема**, заключающаяся в отсутствии научного обоснования и критериев технологического обеспечения качества поверхностного слоя миниатюрных деталей и производительности алмазного микровыглаживания.

Целью работы является технологическое обеспечение заданного качества поверхностного слоя (КПС) миниатюрных деталей при повышении производительности алмазного микровыглаживания (АМВ) на основе динамической стабилизации процесса

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ особенностей технологии алмазного микровыглаживания миниатюрных деталей.
2. Определить условия возникновения колебаний при алмазном микровыглаживании.
3. Определить колебания алмазного микровыглаживателя при алмазном микровыглаживании.
4. Определить условия динамической устойчивости процесса алмазного микровыглаживания.
5. Разработать комплексный технологический критерий обеспечения качества поверхностного слоя миниатюрных деталей при наибольшей производительности алмазного микровыглаживания.
6. Для применения алмазного микровыглаживания в производстве создать:
 - алгоритм расчета значений производительных технологических режимов алмазного микровыглаживания миниатюрных деталей;
 - таблицы показателей качества поверхностного слоя миниатюрных деталей и технологических режимов алмазного микровыглаживания;
 - комбинированная обработка миниатюрных деталей с применением АМВ.
7. Технологическое обеспечение КПС миниатюрных деталей при наибольшей производительности АМВ применить в условиях производства.

Методы исследования Основным методом теоретического исследования в данной работе является математическое моделирование. Данные исследования



использованием теории обработки давлением, теории колебаний упругих систем с одной степенью свободы, графоаналитического метода, исследования операций с использованием основных научных положений технологии машиностроения, вычислительной математики

Помимо этого, для проверки достоверности предлагаемых моделей были проведены эксперименты

Научная новизна работы заключается в следующем

На основе проведенных исследований разработаны научно-обоснованные технологические условия стабильного обеспечения заданного качества поверхностного слоя миниатюрных деталей и повышения производительности алмазного микровыглаживания, в том числе:

- установлены наследственные факторы, вызывающие колебания технологической системы при алмазном микровыглаживании;
- определена интенсивность изменения напряжений в зоне деформирования при микровыглаживании миниатюрных деталей;
- получена математическая зависимость частоты вынужденных колебаний алмазного микровыглаживателя от соотношения подач при точении и алмазном микровыглаживании;
- установлены аналитические зависимости критических параметров алмазного микровыглаживания от значений подач при предварительном точении

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Разработан алгоритм расчета значений производительных технологических режимов алмазного микровыглаживания и получены таблицы показателей КПС миниатюрных деталей.

2. Разработана технология совмещенной обработки резанием и алмазным микровыглаживанием миниатюрных деталей

Внедрение результатов исследований. Результаты работы внедрены в Пермской научно-производственной приборостроительной компании и используются на кафедре «Технология машиностроения» Пермского государственного технического университета в учебном процессе в курсовом и дипломном проектировании

Достоверность результатов. Показана положительными итогами внедрения результатов исследований на предприятии (подтверждена актами внедрения), изготовлением партий деталей в серийном производстве, экономическими расчетами

Апробация работы. Основные положения и результаты работы были доложены и обсуждены на следующих конференциях, выставках и семинарах:

- Всероссийская научно-техническая конференция «Прогрессивные технологии обработки металлов давлением в машиностроении» Иркутск, 26-28 сентября 1996 г.
- Областная научно-практическая конференция «Машиностроению – прогрессивную технологию и высокое качество деталей» (26-30 мая 1983 г) Тольятти 1983 г
- 11-й научно-техническая конференция «Абразивно-алмазная обработка» (19-20 апреля 1983 г.) Пермский политехн ин-т Пермь. 1983 г.
- Всероссийская выставка «Вузы РСФСР – машиностроению». Тольятти 1983 г
- Областная научно-практическая конференция «Прогрессивная технология обработки маложестких деталей» (12-13 мая 1987 г) Тольятти 1987 г
- Научно-практическая конференция «Повышение эффективности использования в производстве станков с ЧПУ» 10-11 дек. 1987 г Алт политехн ин-т им И И Ползунова. Барнаул 1987г
- 28-й научно-технической конференции ПГТУ «Повышение качества изготовления и эксплуатационных характеристик деталей машин технологическими методами» (24-30 апреля 1995 г.). Перм гос. техн. ун-т. Пермь. 1995 г

- Юбилейная научно-техническая конференция «Высокие технологии в машиностроении и высшем образовании». (23-24 ноября 2000 г.). Перм. гос. техн. ун-т. Пермь. 2000 г.
- Научные семинары кафедры «Технология машиностроения», ПГТУ, Пермь, 1980-2004.

Публикации. По материалам выполненных исследований получены 2 авторских свидетельства, опубликовано 30 научных работ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников, приложений и содержит 181 страницу, включая 50 рисунков и 31 таблицу. Список использованных источников содержит 84 наименования. В приложениях представлена копия акта внедрения результатов, подтверждающих практическую ценность работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассматривается актуальность выбранной темы исследования, анализируется суть научной проблемы и ее научная новизна. Сделан вывод об актуальности научной проблемы и темы работы, о ее практической значимости. Также рассмотрены степень научной разработанности выбранной темы исследования, сформулированы цели и задачи исследования, определены объект и предмет исследования.

В соответствии с формулировкой выбранной темы объектом исследования является процесс алмазного микровыглаживания, выступающий в данном случае как общая категория научных изысканий и включающий в себя систему закономерностей, связей и отношений явлений процесса, в пределах которого существует и обозначена исследуемая проблема.

Предметом исследования является технологическое обеспечение качества поверхностного слоя миниатюрных деталей из сталей и цветных сплавов и производительности обработки на финишной операции алмазного микровыглаживания, являющееся частью объекта исследования и ограниченного конкретными логическими границами, в пределах которых также существует и выделена исследуемая нами проблема.

Далее охарактеризованы методологическая, теоретическая и информационная основа исследования, его практическая значимость, а также апробация результатов исследования. Даны базисные положения, выносимые на защиту.

На защиту выносятся следующие базисные положения.

1) Теоретические предпосылки процесса алмазного микровыглаживания миниатюрных деталей с анализом особенностей технологии алмазного микровыглаживания и миниатюрных деталей.

2) Обеспечение и прогнозирование стабильного качества миниатюрных деталей, работоспособности инструмента, производительности процесса алмазного микровыглаживания с теоретическим исследованием и расчетами напряжений неравномерного нагружения при алмазном микровыглаживании, динамическими расчетами частот вынужденных и собственных колебаний и выводом условия динамической стабильности процесса.

3) Технологическое обеспечение качества и производительности обработки миниатюрных деталей из сталей и цветных сплавов с результатами экспериментальных исследований интенсивности износа и износостойкости алмазных микровыглаживателей, качества поверхностей в зависимости от состояния инструмента и технологических параметров процесса.

4) Практическая значимость технологического обеспечения качества и производительности обработки миниатюрных деталей с рекомендациями по практическому применению.

Первая глава на основе краткого анализа даёт представление о технологии алмазного микровыглаживания миниатюрных деталей.

Основой для анализа являются труды отечественных и зарубежных авторов в области процессов поверхностного пластического деформирования. В первую очередь использованы фундаментальные работы по исследованию основных методов ППД таких известных отечественных исследователей, как Ю.Г. Шнейдер, В.М. Смелянский, Э.Г. Грановский, В.М.Торбило, Л.Г. Одинцов, а также таких зарубежных авторов, как В.П. Пшибыльский и других. Отмечено, что большую пользу в подготовке проведения и выполнении исследования по выбранной теме принесли работы отечественных авторов также успешно развивавших теорию процессов ППД в частности алмазного выглаживания, таких как Е.А. Евсин, А.Г. Мосталыгин и другие.

Основной целью применения алмазного микровыглаживания в приборостроения и химического машиностроения является:

- 1) повышение чистоты поверхности – определённое уменьшение высоты микронеровностей поверхности после предшествующей обработки,
- 2) упрочняющая обработка – создание определённых физико-механических свойств поверхностного слоя материала, приводящих к повышению сопротивления воздействию таких эксплуатационных факторов, как усталость, абразивный износ, коррозия и т.д.,
- 3) размерно-чистовая обработка – определённое повышение размерной точности с одновременным уменьшением шероховатости поверхности до требуемого значения
- 4) повышение производительности обработки миниатюрных деталей на финишных операциях за счет исключения дорогостоящих абразивных методов и применения производительных технологических режимов.

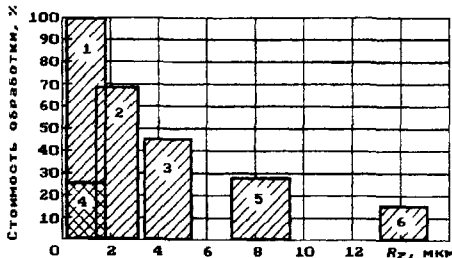
Кроме этого, алмазное микровыглаживание применяется для формирования микронеровностей поверхности с определёнными стереометрическими параметрами, например, высотой, формой, шагом, радиусом закругления вершин, впадин и т.д., а также для обеспечения определённых эксплуатационных свойств микровыглаженных поверхностей маложёстких, миниатюрных и тонкостенных деталей: шеек и цапф осей, валов, штифтов, втулок и т.д.; для улучшения их трибологических характеристик, уменьшения трения, повышения сопротивления абразивному износу.

Операции с применением алмазного микровыглаживания дешевле, менее трудоёмкие в сравнении с операциями традиционно применяемыми на финишных операциях механической обработки (рисунок 1). Так, например, при обработке миниатюрных деталей типа осей, стоек, втулок и штифтов применение алмазного микровыглаживания является наиболее экономичной и целесообразной технологической операцией из всех возможных.

Отмечено, что в практике применения алмазного микровыглаживания миниатюрных деталей в отдельных случаях наблюдаются вибрации микровыглаживающего инструмента,

что приводит к нестабильности обеспечения качества поверхностного слоя миниатюрных деталей.

В результате анализа делается вывод, что без соответствующего научного обоснования и критериев стабильного технологического обеспечения качества поверхностного слоя и производительности алмазного микровыглаживания невозможно обеспечить снижение трудоемкости и себестоимости финишных операций обработки миниатюрных деталей.



- 1 – притирка, доводка, полировка, 2 – чистовое шлифование; 3 – шлифование; 4 – алмазное микровыглаживание; 5 – чистовое точение; 6 – грубое точение

Рисунок 1 – Стоимость обработки поверхности заданной шероховатости, обрабатываемой разными методами

В конце первой главы формулируются цель и основные задачи работы
Вторая глава содержит описание разработанного методического и материально-технического обеспечения исследований

Для проведения теоретических и экспериментальных исследований с целью технологического обеспечения качества и производительности алмазного микровыглаживания миниатюрных деталей на основе комплексного критерия разработано методическое обеспечение, а именно: выбраны методы аналитических исследований и соответствующая методика математической обработки результатов для разработки и обоснования комплексного технологического критерия; определены методика планирования и регрессионный анализ многофакторных экспериментов для экспериментального исследования качества поверхностного слоя при микровыглаживании; разработана методика исследований износа алмазных микровыглаживателей и выбрана соответствующую методика математической обработки результатов экспериментов. Наряду с этим разработана технологическая оснастка, выбрано оборудование и образцы для проведения исследований

При проведении аналитических исследований применены методы, в которых использованы известные методики из соответствующих областей знаний

Определение напряжений неравномерного нагружения области деформирования выполнено по методике, использующей теорию обработки давлением.

Методика определения вынужденных колебаний алмазного микровыглаживателя включает в себя анализ вызывающих колебания факторов. Для определения частоты вынужденных колебаний применен графоаналитический метод. Данный метод состоит из этапов: определения границ областей влияния подач микровыглаживания $S_{\text{мик}}$ и резания S_r ; построения диаграмм векторов подач; вывода уравнения частоты вынужденных колебаний

Определение собственных колебаний алмазного микровыглаживателя выполнено на основе теории колебаний упругих систем с одной степенью свободы, с использованием принципа Даламбера, который заключается в том, что к движущейся с ускорением системе могут быть применены уравнения статики.

Методика создания комплексного технологического критерия включает в себя анализ условия получения стабильного качества поверхностного слоя при наилучшей производительности алмазного микровыглаживания. Для вывода комплексного критерия применен графоаналитический метод.

Математическая обработка результатов аналитических исследований производилась по методу приближения функций на основе регрессионного анализа

Экспериментальные методы исследований для технологического обеспечения качества и производительности алмазного микровыглаживания миниатюрных деталей на основе комплексного критерия включают в себя методики исследования качества поверхностного слоя и износа алмазных микровыглаживателей при производительных режимах обработки.

При экспериментальных исследованиях качества поверхностного слоя в зависимости от технологических параметров обработки, установленных на основе комплексного критерия, применена методика планирования и регрессионный анализ многофакторных экспериментов.

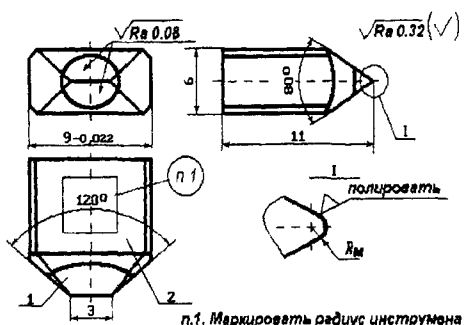
При проведении экспериментальных исследований износа алмазных микровыглаживателей поставлена задача определить характер износа алмаза и установить закономерность изменения работоспособности алмазного микровыглаживателя от величины пути трения, проходимого инструментом в процессе микровыглаживания поверхностей деталей.

Для оценки работоспособности алмазного микровыглаживателя, как инструмента для поверхностного пластического деформирования поверхностей миниатюрных и маложестких деталей, работающего в условиях производительных режимов, выбраны критерии, характеризующие как его непосредственный износ, так и его способность обеспечивать требуемое качество обработки.

Критерии оценки износа микровыглаживателя при микровыглаживании объективно показывают его способность противостоять износу при трении скольжения. Кроме того, необходимыми требованиями к критериям являются также простота их представления и достаточная лёгкость измерения универсальными измерительными приборами.

При исследовании износа алмазных микровыглаживателей для оценки работоспособности алмазного микровыглаживателя использованы критерии: площадь пятна контакта, интенсивность износа алмазного микровыглаживателя и его износостойкость, а также коэффициенты сглаживания и упрочнения.

Для проведения исследований разработаны методики расчета радиуса кривизны алмазного микровыглаживателя и определения площади пятна контакта выглаживающего инструмента с деталью. Методика определения площади пятна контакта защищена авторским свидетельством.



п.1. Маркировать радиус инструмента

1 – алмаз синтетический АСПК-3; 2 – оправка

Рисунок 2 – Конструкция алмазного микровыглаживателя

На рисунке 2 показан алмазный микровыглаживающий инструмент, разработанный для выполнения исследований. Микровыглаживатель состоит из сверхтвёрдого элемента 1 и стальной оправки 2. В качестве сверхтвёрдого элемента использован алмаз синтетический поликристаллический типа карбонадо марки АСПК-3. Алмаз запаян в оправку. Материал оправки – сталь 3.

В качестве станочной оснастки при проведении исследований и реализации процесса алмазного микровыглаживания, как в лабораторных условиях, так и на производстве, применена специальная

державка пружинного типа. Преимуществом пружинных державок является надежность их работы и возможность плавного регулирования силы прижима в большом диапазоне.

Третья глава содержит теоретическое обоснование и разработку комплексного технологического критерия, определяющего условие стабильного получения качества поверхностного слоя миниатюрных деталей при наибольшей производительности алмазного микровыглаживания.

Условие стабильного обеспечения качества поверхностного слоя при наибольшей производительности определяется особенностями технологии алмазного микровыглаживания и связанной с ними вероятностью возникновения колебаний.

При теоретическом исследовании этого явления выявлено влияние особенностей алмазного микровыглаживания на возможность возникновения колебаний путем определения неравномерности распределения напряжений в зоне деформирования, установлено условие неустойчивости алмазного микровыглаживания на основе определения частот вынужденных и собственных колебаний; определено условие и разработан комплексный технологический критерий, определяющий стабильное обеспечение качества поверхности при наибольшей производительности алмазного микровыглаживания миниатюрных деталей.

К особенностям технологии алмазного микровыглаживания можно отнести особенности обрабатываемых миниатюрных деталей, имеющих малые размеры конструктивных элементов, в том числе галтелей, сопряжений поверхностей, особенности микровыглаживающего инструмента, имеющего малый радиус рабочей части, малый объем зоны деформирования, применение определенных силовых и кинематических схем

обработки и положений инструмента относительно обрабатываемой детали. Эти особенности в той или иной мере могут влиять на возможность возникновения колебаний. Совокупность этих особенностей характеризуется понятием «масштабный фактор» алмазного микровыглаживания.

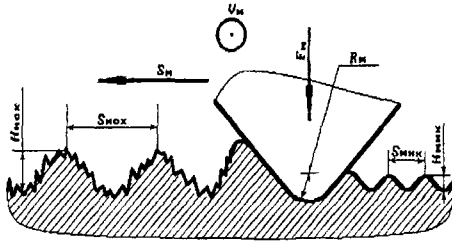


Рисунок 3 – Схема взаимодействия микровыглаживателя с обрабатываемой поверхностью

В процессе скольжения по обрабатываемой поверхности микровыглаживатель взаимодействует с регулярно расположенными микронеровностями от предшествующей обработки (рисунок 3), а также участками неравномерной микротвердости. Воздействие с их стороны может быть причиной вынужденных колебаний инструмента, которые в зависимости от скорости вращения V_m и подачи S_m микровыглаживателя могут войти в резонанс с собственными колебаниями технологической системы, что нарушает

условие получения стабильного качества поверхностного слоя.

Для решения задачи теоретического обоснования и разработки технологического обеспечения качества поверхностного слоя при наибольшей производительности алмазного микровыглаживания миниатюрных деталей на основе комплексного критерия необходимо установить условия стабильного обеспечения качества. Для этого необходимо на основе анализа технологических условий микровыглаживания, влияющих на распределение нагрузки по пятну контакта микровыглаживателя с поверхностью детали, а также анализа интенсивности распределения нагрузки и изменения деформации в зоне деформирования, определить интенсивность изменения напряжений в зоне деформирования; установить условие динамической устойчивости процесса алмазного микровыглаживания; определить условие стабильного обеспечения качества поверхностного слоя по комплексному технологическому критерию

При алмазном микровыглаживании масштабный фактор наиболее существенно проявляется в возникновении неравномерного распределения напряжений в зоне деформирования. Для определения этих напряжений за основу была взята методика, в которой принята наиболее известная схема нагружения – холодная прокатка тонкого листа. Применение данной методики к условиям алмазного микровыглаживания оправдана схожестью процессов, происходящих в зоне деформирования

Распределение напряжений в зоне деформирования $\Delta\sigma = \Delta\sigma(x, y, z)$ Рассмотрим схему нагружения при алмазном микровыглаживании цилиндрической детали (рисунок 4)

С учетом угла разворота инструмента и приведенного радиуса кривизны изменение напряжений в системе можно записать в виде

$$\Delta\sigma = \frac{1}{R} R_0 x \frac{d\sigma}{dx} + \frac{1}{R} \frac{d\sigma}{dx} \frac{x^3}{2 \frac{R_m}{\cos 2\alpha}} + \sigma \left(R_0 / R \right) + \sigma \left(3x^2 / 2 \frac{R_m}{\cos 2\alpha} R \right).$$

Выполним анализ скорости изменения деформаций вдоль зоны деформации. Для этого произведем следующее преобразование полученной формулы.

Так как изменение радиуса заготовки R по высоте в процессе алмазного микровыглаживания незначительно принимаем $R \approx R_0$. Исключив из представленного выше выражения второе и четвертое слагаемые вследствие их малости в сравнении с остальными, получаем в окончательном виде

$$\frac{\partial \Delta W}{\partial v} = x \frac{d\sigma}{dx} + \sigma \quad (1)$$

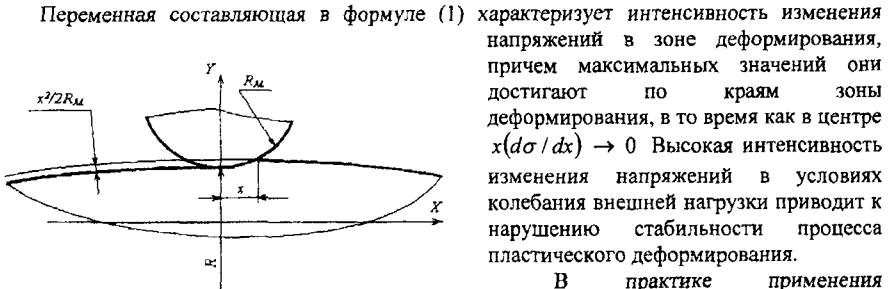
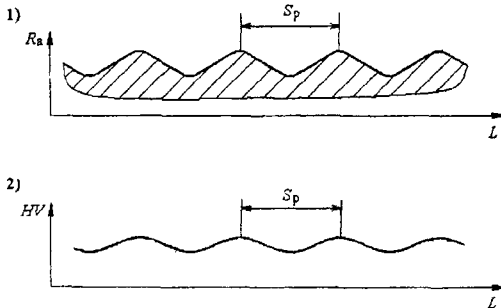


Рисунок 4 – Схема деформирования при микровыглаживании

В практике применения алмазного микровыглаживания миниатюрных деталей в отдельных случаях наблюдаются колебания микровыглаживателя в радиальном направлении при обработке предварительно проточенной поверхности, которая представляет собой регулярный микропрофиль, микронеровности которого повторяются с шагом равным подаче реза S_p . С той же регулярностью имеет место неравномерная микротвердость металла поверхностного слоя (рисунок 5).



1 – микропрофиль поверхности; 2 – распределение микротвёрдости в поверхностном слое

Рисунок 5 – Параметры поверхностного слоя детали после точения

подачей резания S_p при предварительном точении и подачей алмазного микровыглаживания S_m , имеющая вид

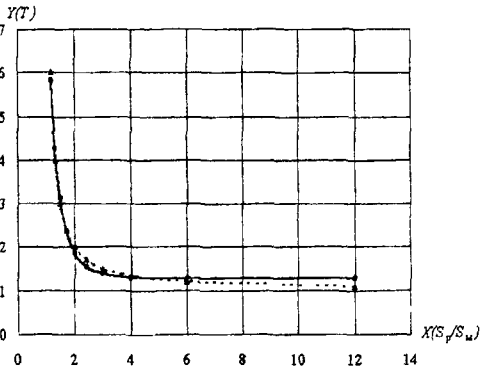
$$T = f\left(\frac{S_p}{S_m}\right). \quad (2)$$

Полученный период колебаний T вынуждающего фактора связан с частотой колебаний f соотношением

$$T = \frac{1}{f} \quad (3)$$

На траекторию движения реза накладывается траектория движения алмазного микровыглаживателя (рисунок 6), в результате чего происходят регулярные воздействия на последний от регулярных неровностей обточенной поверхности возникают вынужденные колебания алмазного микровыглаживателя.

Анализ частных случаев сочетаний подач показывает, что существует функциональная связь между периодом колебаний T вынуждающего фактора и технологическими параметрами процесса –



1 —●— кривая реального процесса; 2 —▲--- кривая моделируемого процесса
Рисунок 6 – График зависимости периода колебаний вынуждающего фактора T от отношения подач резания и алмазного микровыглаживания S_p/S_m

Учитывая (2), (3) и (4) получаем

$$f_{\text{м вын}} = f f_{\text{шп}} = \frac{f_{\text{шп}}}{1,272 + \frac{9,422}{\left(\frac{S_p}{S_m}\right)^4}} \quad (5)$$

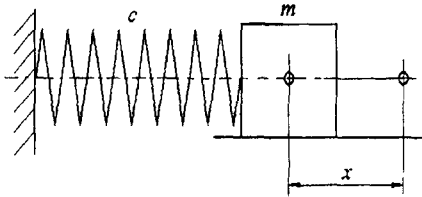


Рисунок 7 – Схема колебательной системы

колебательные движения микровыглаживателем, установленном в пружинной державке и выполняющим микровыглаживание, представляет собой линейную систему (рисунок 7).

Данная линейная система сводится к простейшей механической колебательной системе, которой является масса m в кг с пружиной, при условии линейности восстанавливающей силы пружины

Уравнение частоты собственных колебаний алмазного микровыглаживателя имеет вид

$$f_{\text{м соб}} = \sqrt{\frac{c}{\sum_{i=1}^n m_i}} \quad (6)$$

Кривая графика функции $T = f(S_p/S_m)$ для фактического процесса (кривая 1, рисунок 6) представляет собой гиперболу, характерную для дробных рациональных функций. Необходимо иметь в виду, что параметр f , называемый нами частотой колебаний вынуждающего фактора – неровностей от предшествующей токарной обработки – учитывает только колебания за один проход по развёртке обрабатываемой поверхности детали и не учитывает частоту вращения шпинделя $f_{\text{шп}}$. Поэтому с учетом $f_{\text{шп}}$ частота вынужденных колебаний алмазного микровыглаживателя $f_{\text{м вын}}$ может быть определена как

$$f_{\text{м вын}} = f f_{\text{шп}} \quad (4)$$

Система СПИД при алмазном микровыглаживании представляет из себя механическую систему с одной степенью свободы, так как инструмент – алмазный микровыглаживатель имеет возможность перемещаться в неподвижно закреплённом в резцедержателе приспособлении – пружинной державке только в одном направлении – по нормали к обрабатываемой поверхности. Вся система вместе с совершающим

где $\sum_{i=1}^n m_i = m_1 + m_2 + m_2 + \dots + m_n$ - сумма колеблющихся масс в процессе алмазного микровыглаживания.

Таким образом, вывод уравнений собственных и вынужденных колебаний алмазного микровыглаживателя позволяет определить условие стабильного обеспечения качества поверхностного слоя миниатюрных деталей при алмазном микровыглаживании. При этом эти условия должны обеспечиваться при наибольшей производительности алмазного микровыглаживания. Это может быть обеспечено при применении комплексного технологического критерия, учитывающего все указанные факторы процесса алмазного микровыглаживания

В связи с необходимостью стабильного обеспечения качества поверхностного слоя деталей при наибольшей производительности алмазного микровыглаживания возникают задачи установления области стабильного протекания данного процесса, находящейся вне резонансной зоны, и режимов, обеспечивающих протекание процесса в этой области.

Для решения этой задачи необходимо установлены критические значения технологических параметров $S_{м\ крит}$ и $f_{шп\ крит}$, определяющие резонансную зону процесса алмазного микровыглаживания.

Исходя из того, что резонанс возникает при

$$f_{м\ соб} = n f_{м\ вын}, \quad (7)$$

получаем формулу критической подачи алмазного микровыглаживания

$$S_{м\ крит} = 0,571 \left[f_{шп} \left(\frac{m}{c} \right)^{0,5} - 1,272 \right]^{0,25} S_p. \quad (8)$$

Входящие в данную формулу параметры варьируются в определенных пределах, определяемых технологическими возможностями процесса алмазного микровыглаживания, требованиями к обеспечению заданных показателей качества обработанных поверхностей, а также производительностью микровыглаживания

Для определения критических значений числа оборотов шпинделя $N_{шп\ крит}$ преобразуем уравнение (5) с использованием выражения (7) В результате получаем.

$$N_{шп\ крит} = 60 \left(\frac{c}{m} \right)^{0,5} \left[1,272 + 9,422 \left(\frac{S_m}{S_p} \right)^4 \right]. \quad (9)$$

Входящие в формулу (9) параметры, так же как и в случае критической подачи микровыглаживания, варьируются в определенных пределах, определяемых технологическими возможностями процесса алмазного микровыглаживания и производительностью алмазного микровыглаживания.

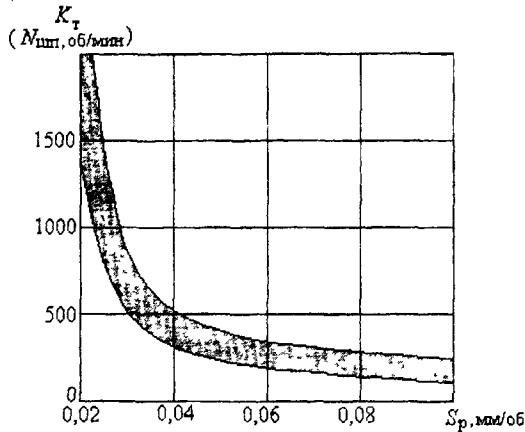
Полученные формулы критической подачи алмазного микровыглаживания (8) и критических чисел оборотов шпинделя (9) дают возможность точного расчета динамически неблагоприятных режимов обработки и определения областей режимов, обеспечивающих качество поверхностного слоя и производительность алмазного микровыглаживания

Комплексный технологический критерий качества и производительности K_T при алмазном микровыглаживании необходим для научно обоснованного стабильного обеспечения качества поверхностного слоя деталей при наибольшей производительности алмазного микровыглаживания миниатюрных деталей. Он представляет собой функцию двух составляющих - числа оборотов шпинделя $N_{шп}$ и подачи алмазного микровыглаживания S_m

$$K_T = f(N_{шп}, S_m)$$

Оба компонента технологического критерия влияют на качество и производительность при алмазном микровыглаживании. Однако подача в большей степени влияет на качество поверхностного слоя (шероховатость и микротвердость), Число оборотов шпинделя, в свою очередь, определяет производительность алмазного микровыглаживания

Таким образом, увязывая оба компонента в одном комплексном технологическом критерии K_T , можно решить задачу технологического обеспечения качества и производительности при алмазном микровыглаживании




 – критические значения комплексного технологического критерия $K_{T \text{ крит}}$

Рисунок 8 – Комплексный технологический критерий качества поверхностного слоя миниатюрных деталей и наибольшей производительности алмазного микровыглаживания

Комплексный критический технологический критерий $K_{T \text{ крит}}$ (рисунок 8) представляет собой функцию двух составляющих – критического числа оборотов шпинделя $N_{шп \text{ крит}}$ и критической подачи алмазного микровыглаживания $S_{м \text{ крит}}$.

$$K_{T \text{ крит}} = f(N_{шп \text{ крит}}, S_{м \text{ крит}}).$$

Уравнение комплексного критического технологического критерия качества и производительности для алмазного микровыглаживания в общем виде

$$K_{T \text{ крит}} = 60 \left(\frac{c}{m} \right)^{0.5} \left[1,272 + 9,422 \left(\frac{S_{м \text{ крит}}}{S_p} \right)^4 \right] \quad (9)$$

Физический смысл комплексного критического критерия качества и производительности при алмазном микровыглаживании заключается в том, что это фактически критическое число оборотов шпинделя, определенное для критической подачи алмазного микровыглаживания.

Комплексный критерий дает возможность определить конкретные технологические режимы алмазного микровыглаживания, обеспечивающие стабильное получение качества поверхностей и максимальную производительность обработки миниатюрных деталей

Четвертая глава содержит результаты экспериментальных исследований технологического обеспечения качества поверхностного слоя миниатюрных деталей при наибольшей производительности алмазного микровыглаживания на основе комплексного технологического критерия. Глава содержит подробное описание результатов исследований показателей качества поверхностного слоя (шероховатость и микротвердость) миниатюрных деталей в зависимости от технологических параметров, характера и закономерностей износа микровыглаживающего инструмента, износостойкости алмазных микровыглаживателей, а также зависимости параметров качества поверхности от состояния инструмента, работающего на режимах, обеспечивающих высокую производительность обработки

Установлено, что применение комплексного технологического критерия стабильно обеспечивает качество поверхности миниатюрных деталей на режимах алмазного микровыглаживания, дающих наилучшую производительность процесса

Экспериментальные исследования показали, что при алмажном микровыглаживании обеспечивается значение шероховатости $R_a = 0,08-0,4$ мкм, что обеспечивает необходимое качество обработки миниатюрных деталей.

Установлено, что при алмажном микровыглаживании может быть достигнуто значение упрочнения 30 – 40 %, что обеспечивает необходимое качество обработки миниатюрных деталей. Толщина упрочненного слоя при этом составляет величину до 0,03 мм.

Алмазное микровыглаживание, выполненное с учетом комплексного технологического критерия, не влияет на точность размеров миниатюрных деталей. Установлено, что при алмажном микровыглаживании рассеяние размеров практически не изменяется, происходит смещение кривой распределения по оси абсцисс на величину уменьшения диаметра Δd в пределах высоты микронеровностей

Исследованы и установлены зависимости параметров износа от длины пути трения алмазного микровыглаживателя для легированных (16Х16НЗМАД) и конструкционных (сталь 20) сталей, а также цветных сплавов (латунь ЛС59-1Т, дюралюминий Д1Т)

Установлена зависимость площади пятна контакта от длины пути трения для данных материалов, имеющая вид нелинейной функции

Для стали 20:

$$F = 0,0571L_m^{0,0842}$$

Для стали 16Х16НЗМАД:

$$F = 0,0653L_m^{0,2601}$$

Для латуни ЛС59-1Т:

$$F = 0,0396L_m^{0,2023}$$

Для дюралюминия Д1Т:

$$F = 0,0838L_m^{0,0196}$$

На основании полученных результатов экспериментов исследованы и установлены значения интенсивности износа алмазных микровыглаживателей dF/dL_m от длины пути трения при микровыглаживании, а также зависимости износостойкости алмазных микровыглаживателей I_m от длины пути трения для разных материалов миниатюрных деталей

Для стали 20

$$dF/dL_m = 0,0048L_m^{-0,9156}$$

Для стали 16Х16НЗМАД

$$dF/dL_m = 0,017L_m^{-0,7397}$$

Для латуни ЛС59-1Т:

$$dF/dL_m = 0,008L_m^{-0,7993}$$

Для дюралюминия Д1Т:

$$dF/dL_m = 0,0017L_m^{-0,9864}$$

Для стали 20:

$$I_m = 4,9737L_m^{0,9158}$$

Для стали 16Х16НЗМАД:

$$I_m = 9,0046L_m^{0,7399}$$

Для латуни ЛС59-1Т

$$I_m = 12,3737L_m^{0,7977}$$

Для дюралюминия Д1Т:

$$I_m = 3,3890L_m^{0,9804}$$

Результаты исследований подтверждают высокую износостойкость алмазных микровыглаживателей, применяемых в технологии алмазного микровыглаживания

Уравнения коэффициента сглаживания для каждого микровыглаживаемого материала получены в следующем виде

Для стали 20·

$$K_{\text{сгл}} = 3,4666L_{\text{м}}^{-0,2421}$$

Для стали 16Х16НЗМАД.

$$K_{\text{сгл}} = 2,2920L_{\text{м}}^{0,1391}$$

Для латуни ЛС59-1Т:

$$K_{\text{сгл}} = 3,2477L_{\text{м}}^{-0,2348}$$

Для дюралюминия Д1Т:

$$K_{\text{сгл}} = 4,9843L_{\text{м}}^{-0,2253}$$

Результаты исследований показывают, что при алмазном микровыглаживании сталей на режимах, установленных с учетом комплексного технологического критерия, наилучшее качество обработки алмазный микровыглаживатель обеспечивает до достижения им суммарного пройденного пути трения 6–7 км. Удовлетворительное качество обработки – до 18-20 км.

Уравнения коэффициента упрочнения для каждого микровыглаживаемого материала получены в следующем виде.

Для стали 20·

$$K_{\text{упр}} = 1,3009L_{\text{м}}^{0,0511}$$

Для стали 16Х16НЗМАД:

$$K_{\text{упр}} = 1,8693L_{\text{м}}^{-0,1424}$$

Для латуни ЛС59-1Т.

$$K_{\text{упр}} = 1,2927L_{\text{м}}^{-0,0644}$$

Для дюралюминия Д1Т

$$K_{\text{упр}} = 1,3607L_{\text{м}}^{-0,0458}$$

Результаты исследований показывают, что при обработке сталей сохраняется хорошее состояние инструмента на пути трения до 6-8 км. На этом участке он обеспечивает удовлетворительное сглаживание (в 3,5 – 2,0 раза) и упрочнение (в 1,6 – 1,2 раза). При обработке цветных сплавов сохраняется хорошее состояние инструмента на пути трения до 18-20 км. На этом участке он обеспечивает удовлетворительное сглаживание (в 4,2 – 2,0 раза) и упрочнение (в 1,3 раза)

Подтверждено, что применение комплексного технологического критерия обеспечивает высокое качество поверхностей миниатюрных деталей при максимальной производительности алмазного микровыглаживания.

Таким образом, экспериментальные исследования, проведенные в условиях стабильного технологического обеспечения качества поверхностного слоя миниатюрных деталей при наибольшей производительности алмазного микровыглаживания на основе комплексного технологического критерия подтверждают научную обоснованность научной гипотезы и позволяют утверждать о решении выявленной ранее научной проблемы

Пятая глава дает представление о практической значимости результатов исследований (таблицы 1, 2)

Для внедрения результатов научных исследований в производство разработан алгоритм расчета производительных технологических режимов алмазного микровыглаживания и составлены таблицы показателей качества поверхностного слоя миниатюрных деталей.

На основе полученных результатов разработан способ комбинированной обработки с применением алмазного микровыглаживания, на который получено авторское свидетельство

За разработку технологии алмазного микровыглаживания миниатюрных деталей на республиканской научно-практической конференции получен диплом

Таблица 1 – Сравнение трудоемкости методов обработки миниатюрных деталей

№ пп	Тип деталей	Штучное время обработки, мин	
		Шлифование	Алмазное микровыглаживание
1	Оси	7,81	2,58
2	Стойки	5,00	1,41
3	Втулки	4,28	1,65
4	Штифты	3,75	1,23

Таблица 2 – Основные технико-экономические показатели применения технологии алмазного микровыглаживания на базе комплексного технологического критерия

Наименование показателя	Старая технология	Новая технология (АМВ при КТК)
Приведенные затраты годового объема работ, руб	114595,6	25361,4
Выпуск на одного основного рабочего, шт/год	17404	52686
Годовой экономический эффект, руб	-	89234
Рост производительности труда, %	-	202

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Решена производственная проблема – достигнуто снижение себестоимости производства за счет уменьшения трудоемкости обработки миниатюрных деталей на базе технологического обеспечения качества поверхностного слоя миниатюрных деталей и повышения производительности алмазного микровыглаживания на основе динамической стабилизации процесса.

2. Решена научная проблема и достигнута цель исследования – разработано научное обоснование стабильного технологического обеспечения качества поверхностного слоя миниатюрных деталей при наибольшей производительности алмазного микровыглаживания на основе динамической стабилизации процесса, для этого:

- выполнен анализ особенностей технологии алмазного микровыглаживания миниатюрных деталей и определены условия возникновения колебаний;
- определены колебания алмазного микровыглаживателя при алмазном микровыглаживании миниатюрных деталей;
- определены условия динамической устойчивости алмазного микровыглаживания;
- разработан комплексный технологический критерий стабильного обеспечения качества поверхностного слоя миниатюрных деталей при наибольшей производительности алмазного микровыглаживания.

3. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя миниатюрных деталей при наибольшей производительности алмазного микровыглаживания внедрено на приборостроительном предприятии и показало высокую эффективность при обработке миниатюрных деталей авиационных приборов. Разработан алгоритм расчета производительных технологических режимов алмазного микровыглаживания и составлены таблицы показателей качества поверхностного слоя миниатюрных деталей. Создан способ комбинированной обработки с применением алмазного микровыглаживания. Достигнуто снижение трудоемкости обработки миниатюрных деталей типа ось, стойка, втулка, штифт более чем в 2,5 раза, получен рост производительности труда на 202%, увеличен выпуск продукции на одного основного рабочего в 3 раза, получен годовой экономический эффект 89234 рубля.

Результаты исследований используются в учебном процессе на кафедре «Технология машиностроения» ПГТУ при изучении ряда технологических дисциплин, в курсовом и дипломном проектировании

4 Применение динамической стабилизации процесса решает задачу технологического обеспечения заданного качества поверхностного слоя миниатюрных деталей и повышения производительности алмазного микровыглаживания не только для внедренных, но и других типов миниатюрных деталей, как авиационного приборостроения, так и химического машиностроения

5 Результаты научного исследования доказали, что технологическое обеспечение заданного качества поверхностного слоя миниатюрных деталей при наибольшей производительности алмазного микровыглаживания – это эффективный путь совершенствования технологических процессов, являющийся основой для дальнейшего изучения и развития следующих направлений:

- создание новых технологий отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием, например, с применением плосковершинного микровыглаживания;
- управление качеством поверхностного слоя обрабатываемых деталей за счет регулирования кривизны рабочего профиля деформирующего инструмента;
- контроль качества поверхностного слоя миниатюрных деталей при алмазном микровыглаживании, например, с применением экспресс-метода контроля остаточных напряжений;
- других предметных областей.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

- 1 **Плотников, А.А.** Микровыглаживание [Текст] / А. А. Плотников, В М Торбило // Вузы РСФСР – машиностроению: планшет – Тольятти: Тольят. политехн ин-т, 1983. – С. 1
- 2 **Плотников, А. А.** Исследование процесса микровыглаживания деталей приборов [Текст] / А. А. Плотников, В М. Торбило // Прогрессивная технология обработки маложестких деталей: тез. докл научно-технической конференции – Тольятти: изд-во Тольят политехн. ин-та, 1987. – С. 96.
- 3 **Плотников, А.А.** Плосковершинное микровыглаживание многоэлементным инструментом [Текст] / А А Плотников, Г В Плотникова // Химическое и нефтяное машиностроение – 1988. – № 1. – С. 29
- 4 **Плотников, А.А.** Упрочнения и остаточные напряжения в поверхностном слое деталей при алмазном микровыглаживании [Текст] / А А Плотников // Прогрессивные технологии обработки металлов давлением в машиностроении: тез. докл всероссийской научно-практической конференции. – Иркутск: Иркутский гос техн. ун-т 1996. – С. 25 – ISBN 5-230-00928-4.
- 5 Алмазное микровыглаживание поверхностей маложестких миниатюрных деталей [Текст] информационный листок № 92 94. Пермский центр научно-технической информации. – Пермь: ЦНТИ, 1994. – С.1-2.
- 6 **Плотников, А. А.** Расчет частоты вынужденных колебаний алмазного микровыглаживателя [Текст] / А А Плотников, А А Плотникова // Механика и технология материалов и конструкций. Вестник ПГТУ №8 – Пермь ПГТУ, 2004 – С 218–236 ISBN 5-88151-432-7.
- 7 **Плотников, А. А.** Микровыглаживание [Текст] / А А. Плотников, В М Торбило // Машиностроению – прогрессивную технологию и высокое качество деталей (26-30 мая 1983 г.) тез докл областной научно-практической конференции. – Тольятти: Тольят политехн ин-т, 1983. – С. 44.
- 8 **Плотников, А. А.** Исследование процессов микровыглаживания деталей приборов [Текст] / А. А. Плотников, В М. Торбило // Прогрессивная технология обработки

- маложестких деталей тез. докл. областной научно-практической конференции (12–13 мая 1987 г.) – Тольятти: Тольятт. политехн. ин-т, 1987 – С. 96–97
9. **Плотников, А. А.** Исследование процесса алмазного микровыглаживания [Текст] / А. А. Плотников, В. М. Торбило // Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей обработки в машиностроении: межвузовский сборник научных трудов – Пермь: Перм. политехн. ин-т, 1988. – С. 101–107
 10. **Плотников, А. А.** Алмазное микровыглаживание галтельных переходов [Текст] / А. А. Плотников // Механика и технология материалов и конструкций. Вестник ПГТУ №3 – Пермь: ПГТУ, 2000. – С. 94–97 ISBN 5-88151-432-7
 11. **А. с. 1454667 СССР МКИ⁴ В 24 В 39/00.** Способ комбинированной обработки деталей [Текст] / А. Г. Вилесова, А. А. Плотников, В. Г. Евсина (СССР). – № 4278178/25–27, заявл. 06.07.87; опубл. 30.01.89, Бюл. № 4 – 3с : ил.
 12. **А. с. 1670527 А1 СССР МКИ⁵ G 01 N 3/58.** Способ определения пятна контакта выглаживающего инструмента с деталью [Текст] / А. А. Плотников, Г. В. Плотникова (СССР). – № 4432734/28, заявл. 21.03.88; опубл. 15.08.91, Бюл. № 30. – 3с.
 13. **Плотников, А. А.** Развитие исследований процессов алмазного микровыглаживания [Текст] / А. А. Плотников, А. П. Назарычев // Высокие технологии в машиностроении и высшем образовании: тез. докл. юбилейной научно-технической конференции (23–24 ноября 2000 г.) – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2000. – С. 43–45.
 14. **Плотников, А. А.** Алмазное микровыглаживание маложестких и миниатюрных деталей [Текст]: рекламный реферативный сборник завершенных научных разработок / А. А. Плотников, Е. А. Евсин. – Пермь.: Перм. гос. техн. ун-т, 1993. – С. 126
 15. **Плотников, А. А.** Процесс микровыглаживания на станках с ЧПУ [Текст] / А. А. Плотников, В. М. Торбило, А. Г. Вилесова // Повышение эффективности использования в производстве станков с ЧПУ. тез. докл. научн.-практ. конф. 10–11 дек. 1987 г. – Барнаул: Алт. политехн. ин-т им. И. И. Ползунова, 1987. – С. 6.
 16. **Плотников, А. А.** Основные схемы установки алмазных микровыглаживателей [Текст] / А. А. Плотников, Г. В. Плотникова // Механика и технология материалов и конструкций Вестник ПГТУ №3. – Пермь: ПГТУ, 2000. – С. 90–93 – ISBN 5-88151-432-7.
 17. **Плотников, А. А.** Расчет напряжений неравномерного нагружения при алмазном микровыглаживании [Текст] / А. А. Плотников // Механика и технология материалов и конструкций Вестник ПГТУ № 8. – Пермь: ПГТУ, 2004. – С. 51–55. ISBN 5-88151-432-7

Зав. РИО М.А. Салкова
Подписано в печать 12.05.2005 г.
Формат 60×84 1/16. Уч.-изд.л. 1,1 Тираж 100 Заказ 89.

Рыбинская государственная авиационная технологическая академия им П.А. Соловьева
(РГАТА)
Адрес редакции. 152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53
Отпечатано в множительной лаборатории РГАТА
152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53

№ 1085 7

РНБ Русский фонд

2006-4

7605