



мов фрезерования. Полученные автором зависимости позволяют обоснованно выбирать траектории (стратегии) движения инструмента и режимы обработки в зависимости от эксплуатационного назначения поверхности.

2. Разработана математическая модель формирования геометрии сложно-профильных деталей сфероцилиндрическими фрезами, учитывающая данные о технологических параметрах процесса обработки: диаметре и подаче инструмента, угле наклона обрабатываемой поверхности, обеспечивающей равные значения параметров шероховатости в направлениях подачи и бокового шага.

3. Разработана оптимизационная модель чистового фрезерования пространственно-сложных поверхностей сфероцилиндрическим инструментом на обрабатывающих центрах с ЧПУ, включающая критерий производительности и систему ограничений, позволяющая определить оптимальные значения режимов резания с учетом требований по обеспечению параметров шероховатости ( $R_z$ ,  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_p$ ,  $R_c$ ,  $R_t$ ,  $R_v$ ) и производительности механической обработки.

4. Разработана методика, обеспечивающая получение заданных параметров шероховатости поверхности согласно стандарту ГОСТ Р ИСО 4287-2014 после чистовой обработки пространственно-сложных поверхностей на пятикоординатных обрабатывающих центрах. Предложено и обосновано применение наклона обрабатываемой поверхности на угол до  $40...50^\circ$ , что позволяет снизить параметры шероховатости  $R_z$ ,  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_p$ ,  $R_c$ ,  $R_t$  и  $R_v$  в среднем в 1,4 раза.

## **СТЕПЕНЬ ОБОСНОВАННОСТИ И ДОСТОВЕРНОСТИ НАУЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ ВЫВОДОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЙ**

Достоверность научных положений и выводов диссертационной работы М. Р. Гимадеева не вызывает сомнений, поскольку они обоснованы корректным использованием основных положений теории резания материалов, теории формообразования, технологии машиностроения, системного анализа, методов статистического анализа, процессов механической и физико-технической обработки, методов математического моделирования.

## **ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ЗНАЧИМОСТЬ ДЛЯ НАУКИ И ПРАКТИКИ**

Значимость для науки представляют следующие результаты, полученные в работе:

– экспериментальные и численные исследования взаимосвязи параметров шероховатости согласно стандарта ГОСТ Р ИСО 4287-2014 при фрезеровании сложно-профильных деталей, на основании которых определены корреляционных зависимости, для различных способов фрезерования;

– экспериментальные исследования, направленные на подтверждение адекватности установленных корреляционных зависимостей параметров шероховатости и технологических параметров обработки;

– математическая модель фрезерования сфероцилиндрическим инструментом, учитывающая данные о технологических параметрах процесса обработки: диаметре и подаче инструмента, угле наклона обрабатываемой поверхности, обеспечивающей равные значения параметров шероховатости в направлениях подачи и бокового шага;

– оптимизационная модель для способа чистового сфероцилиндрического фрезерования пространственно-сложных поверхностей на обрабатывающих центрах с ЧПУ, включающая критерий производительности и систему ограничений, позволяющая определить оптимальные значения режимов резания с учетом требований по обеспечению параметров шероховатости ( $R_z$ ,  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_p$ ,  $R_c$ ,  $R_t$ ,  $R_v$ ) и производительности механической обработки.

Значимость для практики заключается в следующих результатах:

– Разработаны справочные материалы в виде таблиц с рекомендуемыми подачами в зависимости от угла наклона поверхности, обеспечивающими требуемые показатели качества поверхности при чистовом фрезеровании, данные материалы используются при подготовке управляющих программ для обрабатывающих центров с ЧПУ.

– Разработаны рекомендации и алгоритм, позволяющие определить оптимальные режимы резания, обеспечивающие требуемое качество обработанной поверхности.

### **ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ДИССЕРТАЦИИ**

Содержание диссертации М. Р. Гимадеева соответствует названию, состоит из введения, 4 глав основного текста, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 146 страницах машинописного текста, содержит 61 рисунок, 24 таблицы, список литературы из 97 наименований, 4 приложений на 7 страницах и 1 акта внедрения на 1 странице.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цель, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации автором рассмотрены теоретические основы процесса механообработки фрезерованием и требования, предъявляемые к качеству сложно-профильных деталей. На основании результатов анализа сформулированы задачи исследования.

Во второй главе на основе анализа результатов исследований, проведенных ранее различными авторами, обоснован выбор технологического оборудования для проведения экспериментальных работ, материала заготовки, инструмента. Предложена классификация сложно-профильных деталей, позволяющая назначать технологию механической обработки фрезерованием для различных групп изделий, осуществлять выбор траектории движения инструмента, положение поверхностей в системе координат станка. Рассчитаны технологические параметры резания для обеспечения заданного  $R_{\max}$ . Для каждой установленной группы изделий определены геометрическая форма, предъявляемые требования по точности и шероховатости поверхностей деталей и условия обработки.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям с целью установления влияния технологических параметров, на микрорельеф поверхности, получаемой при концевом фрезеровании сфероцилиндрическим инструментом. Приведены корреляционные зависимости параметров шероховатости при различных условиях фрезерования, в том числе, влияние диаметра инструмента, подачи, скорости резания на величину параметров шероховатости обработанной поверхности. Представлены результаты анализа шероховатости, полученной при фрезеровании с различными углами наклона поверхности.

В четвертой главе рассмотрены вопросы, связанные с определением эффективных режимов резания на основе математической модели формирования шероховатости и оптимизации параметров технологических решений, направленных на обеспечение требуемых характеристик микропрофиля поверхности при сочетании режимов резания, удовлетворяющих системе ограничений.

## **СООТВЕТСТВИЕ СОДЕРЖАНИЯ АВТОРЕФЕРАТА ОСНОВНЫМ ПОЛОЖЕНИЯМ ДИССЕРТАЦИИ**

Автореферат содержит обоснование актуальности поставленной проблемы, цель и задачи работы; представлена научная новизна и практическая значимость; сформулированы положения, выносимые на защиту; приведены

данные об апробации работы, публикациях в научных изданиях; сведения о реализации результатов работы и структуре работы. Содержание автореферата, основные выводы и результаты, список публикаций по диссертации полностью соответствуют основным положениям работы.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

Опубликованные автором 15 работ (в том числе 4 статьи в журналах рекомендованных ВАК РФ) в достаточной степени знакомят с основными исследованиями, проведенными диссертантом и их результатами. Выводы, приводимые в опубликованных работах, соответствуют выводам и результатам диссертации.

Основные выводы диссертации заключаются в следующем:

Впервые получены корреляционные зависимости между параметрами шероховатости согласно стандарта ГОСТ Р ИСО 4287-2014 для каждого из рассмотренных способов механической обработки фрезерованием. Для полученных зависимостей погрешность расчета не превышает 10%. Применение полученных зависимостей позволяет рассчитать количественные значения параметров шероховатости обрабатываемой поверхности, связанных с её функциональными свойствами.

Предложено и обосновано применение наклона обрабатываемой поверхности по отношению к горизонтальной плоскости, при фрезеровании сфероцилиндрическим инструментом, на угол до  $40...50^\circ$ , что позволяет снизить значения параметров шероховатости поверхности  $R_z$ ,  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_p$ ,  $R_c$ ,  $R_t$  и  $R_v$  в среднем в 1,4 раза. Экспериментально подтверждено снижение амплитуды вибрации в 1,3...1,5 раза при фрезеровании таким инструментом и наклоне обрабатываемой поверхности на угол до  $40...50^\circ$ .

Обосновано применение стратегии обработки «в радиальном направлении снизу вверх» при фрезеровании сфероцилиндрическим инструментом. Использование указанной стратегии характеризуется наименьшими параметрами шероховатости (для двузубой фрезы  $D = 6$  мм,  $S_z = 0,2$  мм/зуб,  $n = 6000$  об/мин,  $I_Z = 0,1$  мм)  $R_a = 0,678$  мкм и  $R_z = 3,868$  мкм), но при этой стратегии продолжительность обработки на 80% больше по сравнению со стратегией обработки по спирали:  $R_a = 0,847$  мкм,  $R_z = 5,417$  мкм. Автором экспериментально установлено, что стратегия обработки «в радиальном направлении, сверху вниз» не рекомендуется при сфероцилиндрическом фрезеровании в качестве окончательной, так как имеет повышенные значения параметров шероховатости  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_v$ ,  $R_p$  ( $R_a$  в семь раз выше по сравнению со стратегией «в радиальном направлении, снизу вверх»).

Разработана методика назначения технологических параметров, включающая выбор стратегии обработки, траектории движения, расчет подачи при чистовом фрезеровании с учетом угла наклона обрабатываемой поверхности. Применение данной методики позволяет повысить производительность операции чистового фрезерования пространственно-сложных поверхностей в целом до 30% при обеспечении заданных параметров точности и шероховатости, а время на отладку управляющих программ сократить на 10-15%.

Разработана оптимизационная модель для способа чистового сфероцилиндрического фрезерования пространственно-сложных поверхностей на обрабатывающих центрах с ЧПУ, включающая критерий производительности и систему ограничений, позволяющих определить оптимальные значения режимов резания с учетом требований по обеспечению параметров шероховатости  $R_z$ ,  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_p$ ,  $R_c$ ,  $R_t$ ,  $R_v$ .

Разработанные методика и алгоритм, позволяющие определить оптимальные режимы резания, обеспечивающие требуемые параметры микро рельефа при чистовом фрезеровании пространственно-сложных поверхностей принята к внедрению АО «НПЦ газотурбиностроения «Салют»» (г. Москва), что подтверждается актом внедрения.

### **ЗАМЕЧАНИЯ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ**

1. В работе отсутствуют рекомендации по обеспечению параметров шероховатости  $R_{sk}$  и  $R_{ku}$  согласно ГОСТ Р ИСО 4287-2014, при фрезеровании сфероцилиндрическим инструментом.

2. Теоретические и экспериментальные исследования автор свел к анализу влияния режимов обработки и траектории движения инструмента на параметры микропрофиля поверхности, образуемого при обработке заготовок, выполненных из двух материалов, значительно отличающихся по механическим свойствам. При этом в работе отсутствуют обоснования и выводы о возможности применения полученных зависимостей, алгоритмов и рекомендаций для других марок сталей, особенно тех, из которых изготавливают формообразующую оснастку, как правило, имеющую пространственно-сложные поверхности, а также цветных сплавов и других материалов.

3. В работе содержится подробное описание влияния режимов резания на форму и величину шероховатости, но при этом не оценивается влияние геометрии инструмента, которая может оказывать значительное влияние на качественные характеристики обработанной поверхности.

4. Результаты работы внедрены на АО «НПЦ газотурбиностроения «Салют»» (г. Москва), что подтверждено актом внедрения, в диссертации не

приведено описание примеров, на которых проведена эксплуатационная проверка результатов внедрения.

5. В диссертации не приведены технико-экономические расчеты, подтверждающие значимость результатов работы.

Сделанные замечания не влияют на положительную оценку выполненной работы и не ставят под сомнение основные выводы диссертации.

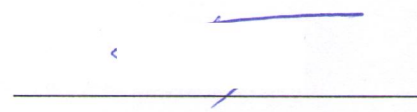
## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что диссертация М. Р. Гимадеева является завершенной научно-исследовательской работой, выполненной на актуальную тему. Новые научные результаты, полученные диссертантом, имеют существенное значение для науки и практики. Выводы и рекомендации достаточно обоснованы.

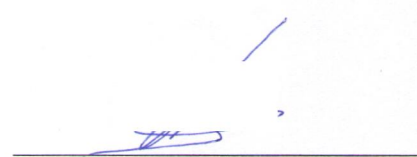
Диссертационная работа Гимадеева Михаила Радиковича отвечает требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки.

Отзыв на диссертацию и автореферат обсужден на заседании кафедры «Технология и оборудование машиностроительных производств» 19.09.2018г., протокол № 1.

Пашков Андрей Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология и оборудование машиностроительных производств»



Пономарев Борис Борисович, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и оборудование машиностроительных производств»



«Иркутский национальный исследовательский технический университет», 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

E-mail: [pashkov@istu.edu](mailto:pashkov@istu.edu), [pusw@istu.edu](mailto:pusw@istu.edu)

Тел.: (3952) 40-57-20, 40-50-20.

М.П.