

КОЛЕНЧЕНКО ОЛЬГА ВЯЧЕСЛАВОВНА

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА
ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ, СЕБЕСТОИМОСТИ И
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ НА ОСНОВЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ
ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рыбинск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет».

Научный руководитель:

Смыслов Анатолий Михайлович, доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты:

Макаров Владимир Федорович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пермский Национальный исследовательский политехнический университет», заместитель заведующего кафедрой «Инновационные технологии машиностроения»;

Семенов Александр Николаевич, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева», профессор кафедры «Технология авиационных двигателей и общего машиностроения».

Ведущая организация:

Открытое Акционерное Общество «Институт технологии и организации производства», г. Уфа.

Защита состоится 26 июня 2013 г. в 12 часов на заседании Диссертационного совета Д 212.210.01 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева» по адресу: 152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53 ауд. Г-237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева».

Автореферат разослан 23 мая 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Конюхов Борис Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современные авиационные двигатели должны соответствовать высоким требованиям по надежности, минимальной массе, экономичности и ресурсу. Эти задачи успешно решаются на основе результатов научных исследований, путем совершенствования конструкции, улучшения характеристик двигателя, а также благодаря использованию новых материалов и технологий изготовления деталей и узлов.

В технологии производства ГТД в последнее время происходят изменения, связанные с применением новых технологий, способных существенно изменить показатели выпускаемых изделий, структуру и условия производства. Их принято называть приоритетными, инновационными, критическими технологиями. Отличительной особенностью современной технологии механической обработки является широкое применение многофункционального автоматизированного оборудования. Выбор технологических режимов работы современного автоматизированного оборудования на основе существующих нормативных данных не позволяет полностью использовать возможности этих станков и не обеспечивает процесс формирования стабильных характеристик качества обработанной поверхности.

Таким образом, данная работа, направленная на технологическое обеспечение качества поверхностного слоя, себестоимости и производительности на основе параметрической оптимизации процессов механической обработки при изготовлении деталей ГТД на многоцелевом автоматизированном оборудовании, является актуальной.

Цель работы - технологическое обеспечение параметров качества поверхностного слоя, себестоимости, производительности и стабилизация погрешности обработки при изготовлении сложнофасонных деталей ГТД из жаропрочных материалов на автоматизированном оборудовании на основе параметрической оптимизации процесса механической обработки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Выполнить анализ влияния технологических режимов на основные параметры качества, производительность и себестоимость изготовления деталей газотурбинных двигателей из жаропрочных материалов.

2. Разработать корреляционные модели, алгоритм и прикладные программы для определения оптимальных условий выполнения операций механической обработки деталей ГТД с целью достижения заданного уровня выходных параметров при наличии технологических ограничений.

3. На основе параметрической оптимизации и разработанных математических моделей исследовать возможность стабилизации погрешности и параметров качества обработанной поверхности за счет динамического изменения условий выполнения операций механической обработки.

Научная новизна заключается в следующем:

Разработаны и обоснованы комплексные математические модели процесса механической обработки материалов, применяемых в конструкции сложнофасонных деталей ГТД. Показана целесообразность и возможность их применения на стадии технологической подготовки производства.

На основе экспериментальных исследований разработан алгоритм и методика управления параметрами механообработки с целью стабилизации погрешности и параметров качества поверхностного слоя деталей в условиях изменяющихся элементов технологических режимов.

Практическая значимость работы заключается в использовании ее результатов для:

- определения технологических параметров чистовых операций механической обработки сложнофасонных деталей ГТД с учетом различных критериев оптимальности и технологических ограничений;

- разработки технологических рекомендаций выполнения операций чистовой обработки сложнофасонных деталей на автоматизированном оборудовании, позволяющих стабилизировать показатели качества обработанной поверхности, точности и равномерный припуск под последующую обработку;

- решения вопросов технологии создания новых поколений ГТД в рамках приоритетного направления «Авиационно-космические транспортные системы» и внедрения результатов на ОАО «УМПО» при изготовлении сложнофасонных деталей двигателей (валы, диски, лопатки КНД) на автоматизированных многоцелевых станках и в учебном процессе кафедры ТМ УГАТУ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Комплексная математическая модель чистовой механической обработки, позволяющая оптимизировать операции точения и фрезерования сложнопрофильных деталей ГТД.

2. Установленная взаимосвязь между динамическим изменением режимов выполнения операций механической обработки, осуществляемым на основе разработанных математических моделей, точностью обработки и характеристиками качества поверхностного слоя.

Общая методика исследований. Теоретическое и экспериментальное моделирование механической обработки для выбранного диапазона изменения входных параметров выполнено с применением теорий: планирования эксперимента, технологического обеспечения и повышения качества изделий, физической оптимизации резания материалов. Математические расчеты и проверка теоретических положений проводились с использованием математического аппарата линейной и матричной алгебры и расчетов в среде Matlab. Экспериментальные исследования выполнялись по стандартным и оригинальным методикам в т.ч. на базе действующего производства ОАО УМПО.

Достоверность и обоснованность научных результатов. Результаты работы получены с использованием базовых положений технологии механической обработки, математического моделирования, параметрической оптимизации, что обеспечило корректность постановки и решения задач, а также адекватность полученных выводов.

Выбор объекта исследования (технологические операции обработки сложнопрофильных деталей) обоснован актуальностью проблем современного авиационного двигателестроения. Сформулированные научные положения, результаты и выводы обоснованы теоретическими положениями и экспериментальными данными, не противоречат ранее разработанным положениям фундаментальных и технических наук.

Апробация работы. Работа выполнялась по договору НЧ-ТМ-01-06ХГ (26/10 – 16282) с ОАО «УМПО» «Исследование обрабатываемости сталей и сплавов при фрезеровании лопаток КНД и КВД ГТД». Результаты докладывались и обсуждались на Республиканских, Всероссийских и Международных научно-технических конференциях в г.г. Уфе, Рыбинске, Санкт-Петербурге, Москве в 2007-2012 г.

Публикации. Основные результаты исследований по теме диссертации представлены в 14 публикациях, в том числе в трех статьях в изданиях, рекомендованных ВАК; получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011615416.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка использованных источников и приложений. Изложена на 175 страницах машинописного текста, содержит 26 таблиц, 28 рисунков, 63 формулы, библиографический список содержит 143 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, раскрываются научная новизна и практическая значимость, приводится краткий порядок ее выполнения, изложена структура работы.

В первой главе показан объем и область применения механической обработки при изготовлении ответственных деталей ГТД. Выполнен анализ конструктивно-технологических особенностей обработки сложнофасонных деталей ГТД, обладающих малой и переменной жесткостью. Показано, что конструктивная сложность этих деталей, а также многообразие технологических процессов их изготовления определяют наиболее эффективную обработку на автоматизированных многоцелевых станках с ЧПУ.

Основными материалами, из которых изготавливаются детали газового тракта ГТД, являются жаропрочные и титановые сплавы, жаропрочные стали. Показано, что реальный технологический процесс протекает как нестационарный: изменяются параметры режимов обработки, геометрия инструмента, жесткость элементов технологической системы, изнашивается режущий инструмент и т.д. Поэтому для решения поставленных задач используется феноменологический

подход к исследованию взаимосвязи технологических факторов, характеризующих процесс механической обработки.

После обобщения и анализа результатов работ Безъязычного В.Ф., Евстигнеева А.М., Кожиной Т. Д., Макарова А.Д., Макарова В.Ф., Мухина В.С., Подзея А.В., Силина С.С., Соломенцева Ю.М., Старкова В.К., Сулимы А.М., Суслова А.Г., Шустера Л.Ш. и др. сделаны следующие выводы:

- определение технологических условий, обеспечивающих заданный уровень показателей качества, себестоимости, производительности изготовления деталей ГТД является важной технико-экономической задачей, значимость которой особенно возрастает в связи с широкой автоматизацией машиностроительного производства;

- недостаточно работ, посвященных созданию математических моделей процесса нестационарной механической обработки;

- существующие методики параметрической оптимизации операций механической обработки требуют дальнейшего усовершенствования с учетом технологических ограничений и обеспечения заданных технико-экономических параметров;

- отсутствует математическое обеспечение, с помощью которого при разработке управляющих программ для лезвийной обработки сложнофасонных деталей ГТД возможно обеспечить минимальную деформацию заготовки и равномерный припуск под последующую механизированную окончательную обработку;

- управление процессом должно быть направлено на поиск компромиссного решения, удовлетворяющего требованиям параметрической многокритериальной оптимизации.

Во второй главе приведены использованные в работе методики: параметрической оптимизации, разработки математических моделей обрабатываемости при наличии ограничений на исследуемую область, также оборудование и установки для проведения экспериментальных исследований. Для измерения износа инструмента по задней поверхности в работе применялся цифровой USB микроскоп, микротвердость обработанной поверхности оценивалась с помощью микротвердомера DuruScan 70, для расчета остаточных технологических макронапряжений использовалась методика академика Давыденкова Н.Н., а деформация образцов фиксировалась с помощью модернизированного прибора ПИОН.

В третьей главе представлено обоснование разработанной автором математической модели выходных параметров лезвийной обработки, применение которой необходимо при решении вопросов обеспечения заданного уровня показателей качества обработанной поверхности, себестоимости выполнения операций при изготовлении сложнофасонных деталей газотурбинных двигателей.

Современное состояние теории технологического обеспечения и повышения качества изделий, применение автоматизированного многоцелевого оборудования, требования к различным показателям изготавливаемых деталей и другие условия предполагают, что основная информация, необходимая для эффективного управ-

ления технологическими режимами, должна содержаться в математических моделях, полученных статистическим обобщением опытных или расчетных данных.

Задача определения оптимальных условий выполнения операций механической обработки может решаться при подготовке управляющих программ, а также в процессе реализации операций с целью изменения технологических режимов.

Качество и надежность управления процессом обработки зависит от числа, значимости и количества управляемых параметров, а также степени их влияния на выходные показатели. На основании анализа закономерностей физической и параметрической оптимизации, потребностей реального производства и возможностей современного промышленного оборудования в настоящей работе используются модели в виде полиномов первого и второго порядка, полученные методами регрессионного анализа.

В общем виде математическую модель процесса механической обработки детали на металлорежущих станках можно представить совокупностью многофакторных линейных и системных функций вида

$$Y_j = \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n b_i x_i^{p_i}, \quad (1)$$

где Y_j – обобщенный критерий стойкости режущего инструмента, шероховатости, глубины и степени наклепа обработанной поверхности, характеристик точности обработки, максимальных остаточных технологических напряжений, глубины их залегания, технологической себестоимости, производительности; x_i – технологические параметры (режимы обработки, геометрические параметры режущего инструмента и др.); a_i и b_i – коэффициенты уравнений, характеризующие зависимость обобщенного критерия от конкретного технологического фактора; p_i – показатель степени, равный 1 или 2.

Совместное решение указанных зависимостей с учетом системы технологических ограничений позволяет определить оптимальные режимы резания для выполнения конкретной операции или перехода.

В настоящей работе для получения математических зависимостей выходных параметров от переменных технологических условий использованы методы планирования экспериментов с последующей обработкой результатов.

На этом этапе разработки моделей обрабатываемости не учитывались: неоднородность свойств обрабатываемого и инструментального материалов, равномерность операционного припуска, износ режущего инструмента и некоторые другие. Для определения конкретных значений выходных параметров использовались известные методики, разработанные Макаровым А.Д., Мухиным В.С., Полетаевым В.А., Силиным С.С.

В качестве обрабатываемых материалов, для которых разрабатывались математические модели, выбраны типовые представители групп материалов, из которых изготавливаются сложнофасонные детали газового тракта ГТД: жаропроч-

ные сплавы на никелевой основе ХН77ТЮР-ВД, ХН73МБТЮ-ВД титановые сплавы ВТ6, ВТ9, а также жаропрочная сталь 13Х12Н2В2МФ-Ш. Диапазон варьирования входных переменных факторов и перечень выходных параметров для параметрической оптимизации, управления и совершенствования технологических режимов при токарной обработке и фрезеровании, указанных материалов выбран в соответствии с условиями эксплуатации автоматизированного оборудования при изготовлении сложнофасонных деталей ГТД в реальном производстве.

Для получения регрессионных зависимостей был реализован план для четырех переменных V_4 .

Анализ экспериментальных данных и расчеты позволили получить систему уравнений для решения задач оптимизации. Общий вид математической модели процесса механической обработки, используемой в дальнейшей работе для параметрической оптимизации с целью достижения заданной точности, производительности, себестоимости и характеристик качества, представлен в виде уравнения второго порядка

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{44}x_4^2 \quad (2)$$

Полученная комплексная модель обрабатываемости применительно к токарной обработке в виде совокупности полиномов второй степени может быть использована для анализа влияния скорости резания (x_1), подачи (x_2) и геометрии инструмента (x_3 и x_4) на изменение основных выходных параметров процесса (стойкость инструмента T , себестоимость C , производительность Π , глубина h_c и степень наклепа $N\%$, максимальные остаточные технологические напряжения σ_τ и глубина их залегания h_0 , шероховатость Ra), а также для оптимизации операций механической обработки. По значению коэффициентов регрессии и их знаку в полиномиальной зависимости можно судить о степени и характере влияния того или иного входного параметра на изменение выходной функции.

В четвертой главе приведена комплексная методика параметрической оптимизации и результаты ее применения с целью обеспечения параметров качества, себестоимости и производительности механической обработки сложнофасонных деталей ГТД (валы, диски, лопатки КНД).

В этой главе представлены результаты, полученные автором в условиях реального производства на ОАО УМПО. При проведении этих работ необходимо было, во-первых, установить диапазоны изменения переменных технологических факторов на операциях точения и фрезерования, во-вторых, разработать математические модели обрабатываемости точением и фрезерования типовых представителей групп материалов, из которых изготавливаются сложнофасонные детали ГТД, и, в-третьих, показать возможность и эффективность применения этих моделей.

В настоящее время известно достаточно большое количество методик параметрической оптимизации процесса механической обработки, основанных на использовании в качестве критерия оптимизации приведенных затрат (Великанов

К.М., Новожилов В.И. и др.), технологической себестоимости (Балакшин Б.С., Игумнов Б.Л., Соломенцев Ю.М. и др.), температуры в зоне резания (Безъязычный В.Ф., Макаров А.Д., Макаров В.Ф., Силин С.С. и др.), удельной энергии стружкообразования (Старков В.К., Юрьев В.Л. и др.) и другие критерии.

В настоящей работе представлены результаты параметрической оптимизации процесса механической обработки при изготовлении ответственных деталей ГТД в соответствии с выбранным критерием и технологическими ограничениями по параметрам качества обработанной поверхности, себестоимости и производительности.

$$C_T = \frac{\pi \times D \times L}{10^3 \times V \times S} \times (\alpha_{cn} + \alpha_p) + \frac{h_{ол} \times \pi \times D \times L}{h_{зк} \times 10^3 \times s} \times$$

$$\times [t_{см.у.} \times (\alpha' + \alpha_p) + B] + t_г \times (\alpha'_{cn} + \alpha_p) + \frac{T_{п.з.}}{Q_{II}} \times (\alpha'_{cn} + \alpha_p). \quad (3)$$

В этой формуле при расчете технологической себестоимости при токарной обработке учитываются размеры обрабатываемой заготовки (D , L), режимы резания (V , S), интенсивность износа и критерий затупления инструмента ($h_{ол}$, $h_{зк}$), количество обработанных заготовок за период стойкости инструмента (Q_{II}), а также расходы, связанные с заработной платой, эксплуатацией оборудования, приспособлений и их простоем (a_p , a_{cn} , a'_{cn}), стоимость инструмента (B) и подготовительно-заключительное время ($T_{п.з.}$). Производительность также может быть использована в качестве критерия оптимальности или технологических ограничений.

$$П = \frac{1}{T_{ш.к.}} = \frac{1}{\frac{\pi \times D \times L}{10^3 \times s \times V} + \frac{h_{ол} \times \pi \times D \times L}{h_{зк} \times 10^3} \times t_{см.у.} + t_г + \frac{T_{п.з.}}{Q_{II}}}. \quad (4)$$

Подобные зависимости получены также и для фрезерной обработки.

Таблица 1 – Оптимизация обработки жаропрочных и титановых сплавов с учетом различных критериев и технологических ограничений

Параметр оптимизации	Технологические ограничения	Характеристики выполнения операции
Точение ХН73МБТЮ-ВД-ВК10-ОМ		
T_{max} , мин	$Ra=(0,6\div 0,8)$, мкм $C_T \leq 125$, руб	$V=20$ м/мин; $S=0,125$ мм/об; $t=0,5$ мм; $\gamma=0^0$; $R=0,5$ мм; $C_T=100,27$ руб.; $П=0,117$ мин ⁻¹ ; $Ra=0,63$; $T=47,2$ мин.
$П_{max}$, мин ⁻¹	$Ra=(0,6\div 0,8)$, мкм $C_T \leq 125$, руб	$V=25$ м/мин; $S=0,125$ мм/об; $t=0,5$ мм; $\gamma=-10^0$; $R=0,5$ мм; $C_T=95,05$ руб.; $П=0,13$ мин ⁻¹ ; $Ra=0,57$; $T=22,07$ мин.
C_{min} , руб	$N=(32\div 38)\%$	$V=30$ м/мин; $S=0,3$ мм/об; $Ra=2,0$; $\gamma=0^0$; $C_T=75,4$ руб.; $П=0,17$ мин ⁻¹ ; $T=10$ мин; $N=35\%$.
Фрезерование ВТ6-1025М-РМ		
T_{max} , мин	$Ra=(0,22\div 0,27)$, мкм	$V=69$ м/мин; $Sz=0,08$ мм/об; $t=0,5$ мм; $B=1,0$ мм; $C_T=193,8$ руб.; $П=0,08$ мин ⁻¹ ; $Ra=0,27$; $T=121,3$ мин.
$П_{max}$, мин ⁻¹	$Ra=(0,30\div 0,35)$, мкм	$V=100$ м/мин; $Sz=0,15$ мм/об; $t=0,5$ мм; $B=1,0$ мм; $C_T=500,3$ руб.; $П=0,19$ мин ⁻¹ ; $Ra=0,35$; $T=5,6$ мин.
C_{min} , руб	$N=(30\div 35)\%$	$V=38$ м/мин; $S=0,1$ мм/об; $Ra=1,0$; $\gamma=0^0$; $C_T=80,2$ руб.; $П=0,13$ мин ⁻¹ ; $T=6,5$ мин; $N=32\%$.

В качестве примера в таблице 1 приведены варианты расчета целевых функций (характеристик выполнения операций) при различных критериях оптимизации и ограничениях для условий механической обработки. Целевая функция является основным критерием выбора наиболее выгодного варианта обработки из множества описываемых моделью и должна отражать количественное и качественное влияние каждого из параметров на критерий оптимальности.

Анализ приведенных в качестве примера решений различных технологических задач (табл.1) показывает, что режимы резания, обеспечивающие оптимальное значение целевой функции (C_{Tmin} , T_{max} или P_{max}), существенно зависят от технологических ограничений, в качестве которых при решении данной задачи были приняты шероховатость обработанной поверхности, характеристики наклепа или другие технико-экономические показатели.

В пятой главе представлены решения задачи выбора режимов механической обработки материалов деталей ГТД на основе полученных математических моделей. При решении задачи параметрической оптимизации выбора режимов в работе использованы методы нелинейного программирования. Входными параметрами, определяющими технологические условия выполнения операций, являются: обрабатываемый и инструментальный материалы, геометрия режущей части инструмента, режимы резания.

Характеристики износа инструмента, погрешность обработки, достигаемые показатели качества материала поверхностного слоя, а также производительность и себестоимость рассчитываются по полученной математической модели процесса резания для выбранного диапазона изменения входных параметров. Модель может быть представлена в виде графиков, формул, таблиц, макетов и др. Для автоматизированного механообрабатывающего производства целесообразно использование модели в виде математических зависимостей.

Модель обрабатываемости при точении сплава ВТ9 резцом ТК20 геометрии SNMP фирмы SANDVIK при изменении входных параметров в диапазоне $V=100\div 130$ м/мин; $S=0,05\div 0,25$ мм/об; $t=0,3\div 1,0$ мм; $\delta=86\div 91^\circ$ представлена в таблице 2.

Таблица 2 - Модель обрабатываемости

$\ln Y = b_0 + b_1 \ln V + b_2 \cdot \ln S + b_3 \cdot \ln t + b_4 \cdot \ln \delta$					
Выходные параметры (Y)	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4
T , мин	6,42	-3,87	-2,01	-0,99	2,14
C_T , руб.	3,16	0,73	0,07	0,31	-0,39
P_T , мин ⁻¹	-2,37	0,22	0,23	0,001	0,004
Ra , мкм	2,30	-0,21	0,78	0,15	0,31
ΔH , мкм	1,6	0,25	-0,031	0,036	0,12
N , %	4,84	-0,136	0,61	0,48	-0,022
h_c , мкм	18,84	-2,23	0,68	0,75	-0,91

Следует отметить, что для реального производства деталей ГТД необходимо учитывать область практического изменения параметров процесса механической обработки. В этой области экстремальные зависимости основных показателей процесса механической обработки с достаточной точностью аппроксимируются уравнениями первого порядка. Учитывая это, в дальнейших исследованиях в работе использованы линейные модели первого порядка. В качестве дополнительных ограничений может быть использовано условие обеспечения кратности периода стойкости инструмента машинному времени обработки.

Следовательно, условие оптимизации должно выполняться при обеспечении следующих ограничений:

$$t_0 - T \leq 0; C_T - |C_T| \leq 0; П_T - |П_T| \geq 0; R_a - |R_a| \leq 0; P - |P| \leq 0; \Delta - |IT| \leq 0,$$

где t_0 – машинное время обработки; T – стойкость режущего инструмента; $C_T, П_T, R_a, P, \Delta$ – расчетные (достигаемые) величины технологической себестоимости, производительности, шероховатости, силы резания и погрешности обработки; $|C_T|, |П_T|, |R_a|, |P|, |IT|$ – предельные значения соответствующих величин (технологические ограничения).

Данная задача оптимизации реализована при токарной обработке деталей ГТД типа «вал средний» из титанового сплава ВТ9 и «диск напорный» из жаропрочного сплава ХН73МБТЮ-ВД.

Обработка наружной поверхности вала среднего $\varnothing 138$ мм выполнялась по двум вариантам. Первый: скорость резания $V=130$ м/мин и постоянная по переходу подача $S=0,15$ мм/об. Для второго варианта выполнялись оптимизационные расчеты по модели (табл.2). Расчетные режимы различны для «технологических зон» обработки. Подача изменяется в пределах от 0,05 мм/об до 0,15 мм/об при скорости резания $V=130$ м/мин.

В зоне наименьшей жесткости обрабатываемой заготовки минимальная подача обеспечивалась управляющей программой работы станка ХН-151.

Полученные результаты показывают (рис.1), что при обработке детали переменной жесткости по первому варианту шероховатость изменяется по длине вала от $R_a=1,5$ мкм до $R_a=3,1$ мкм (в 2 раза), степень упрочнения поверхностного слоя от 16% до 25% (в 1,5 раза).

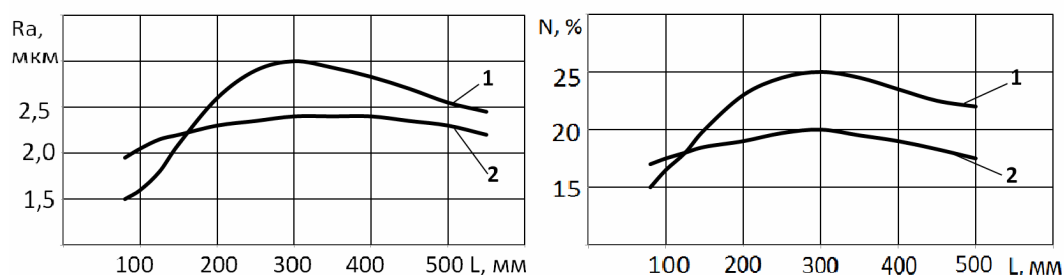


Рисунок 1 – Влияние режимов обработки на параметры качества поверхности при точении детали «вала среднего». 1 - S const (0,15мм/зуб); 2 – S var (0,05÷0,15 мм/зуб)

Обработка на переменной подаче позволяет обеспечить более стабильную шероховатость (Ra изменяется от 2,0 до 2,4 мкм (16%)) и степень упрочнения материала поверхностного слоя (от 18 до 20% (10%)).

При токарной обработке «Диска напорного» из сплава ХН73МБТЮ-ВД применение методики параметрической оптимизации позволило обеспечить существенный эффект по себестоимости (C_T), производительности (P_T), а также по глубине и степени наклепа (табл. 3).

Условия обработки: токарный станок ТС77-МС фирмы SPINNER; заготовка закреплена в патроне, ее размеры $L=20$ мм, $D=44$ мм; инструмент-резец фирмы SANDVIK TK25 геометрии SNMP. Режимы выполнения перехода: серийная технология $V=15,5$ м/мин, $S=0,08$ мм/об; предлагаемый вариант $V=27$ м/мин, $S=0,1$ мм/об.

Таблица 3 – Сравнение результатов обработки на режимах серийной технологии (вариант I) и режимах, рассчитанных по модели (вариант II)

Вариант выполнения перехода	T, мин	C_T , руб.	P_T , мин ⁻¹	Ra , мкм	Δ_u , мкм	N , %	h_c , мкм
I	52	17,8	0,08	1,5	21	15,7	160
II	41	11,5	0,1	1,6	21	8,5	145
$K_{эфф.}$	-	1,55	1,25	1,0	1,0	1,85	1,1

Кроме того, предлагаемые режимы выполнения перехода на операции точения «Диска напорного», позволили обработать в 2 раза больше деталей за период стойкости инструмента.

Решение задачи параметрической оптимизации режимов механической обработки при фрезеровании в работе показано на примере многоосевой обработки проточной части лопаток КНД.

Выполненные теоретические исследования и расчеты с применением метода конечных элементов, показывают, что величина деформации лопаток от действующих сил резания зависит от размера заготовки и расстояния рассматриваемого сечения от хвостовика.

Анализ полученных результатов (рис.2) показывает, что изменение погрешностей по спинке и корыту имеет одинаковый вид, однако в каждом сечении на разном расстоянии от оси лопатки величины деформаций разные. По мере удаления от оси обрабатываемого профиля величина погрешности увеличивается.

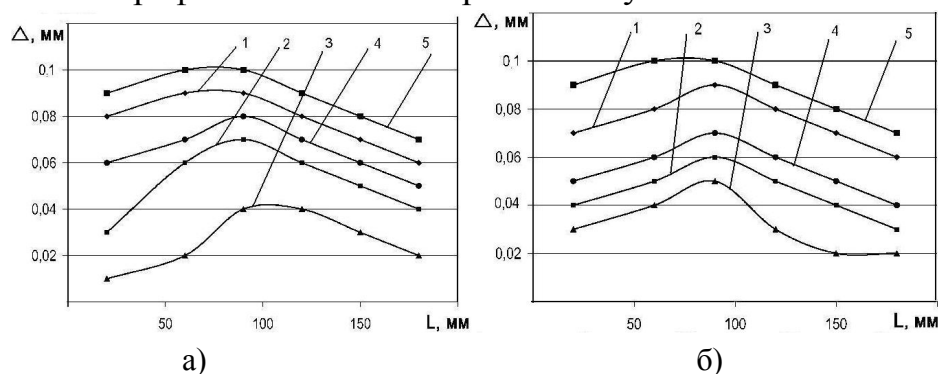


Рисунок 2 – Погрешности обработки лопатки 1-й ступени лопаток КНД; а) по спинке; б) по корыту; 1-5 места контроля

В результате объединения погрешностей по спинке и корыту были получены общие зависимости, характеризующие точность обработки профиля лопатки (рис.3).

По своему характеру зависимости расчетной и действительной погрешности совпадают, по величине же действительные погрешности в $1,5 \div 2,0$ раза существенно превышают расчетные. Это обусловлено тем, что при выполнении расчетов сделаны допущения и в качестве переменного фактора принято изменение только жесткости заготовки (рис.3).

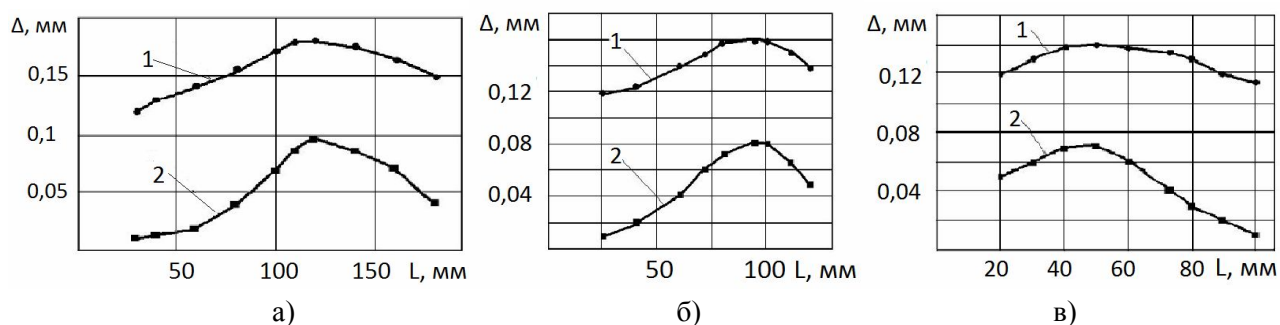


Рисунок 3 - Зависимость погрешности при обработке пера лопатки 1-й (а), 2-й (б) и 3-й (в) ступеней КНД; 1 и 2 – соответственно действительные и расчетные величины

В соответствии с разработанной методикой оптимизации и полученными результатами стабилизировать погрешность обработки при фрезеровании проточной части можно за счет изменения сил резания.

Для реализации этой методики были предложен алгоритм и разработана программа расчета режимов резания для каждой «технологической зоны» обработки лопаток.

Разработанный алгоритм и программа управления режимами фрезерования реализованы при обработке лопаток КНД на станках 500VB ($V=80$ м/мин; $t=0,5$ мм; $B=1,0$ мм).

Были проведены серии опытов - первая при постоянной подаче $S_z = 0,06$ мм/зуб, во второй подача изменялась в пределах $S_z = 0,017 \div 0,06$ мм/зуб с целью минимизации деформации заготовки.

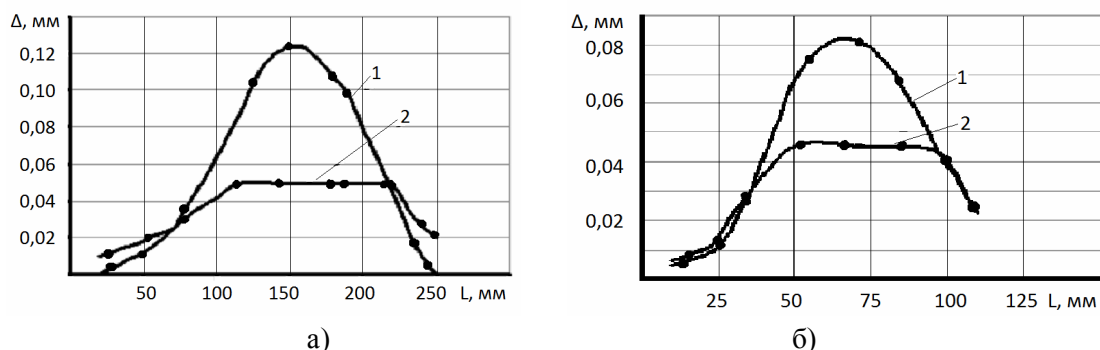


Рисунок 4 - Погрешность обработки проточной части лопаток а) - I и б) - II ступени КНД 1 - $S_z = 0,06$ мм/зуб (const) 2 - $S_z = 0,017 \div 0,06$

Результаты (рис.4) показывают, что реализация разработанной программы управления процессом фрезерования позволяет существенно стабилизировать по-

грешность обработки, величина которой уменьшается в 1,2÷2,0 раза. Пластические деформации в поверхностном слое обусловлены одновременным воздействием температуры и силы резания. Следовательно, изменяя силы резания с целью минимизации погрешности обработки, мы оказываем неизбежное влияние на глубину и степень пластической деформации (табл.4).

Приведенные в таблице 4 результаты показывают достаточно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных и свидетельствуют о том, что изменяя подачу с целью снижения погрешностей обработки, одновременно можно изменить глубину и степень наклепа поверхностного слоя.

Таблица 4 - Экспериментальные и расчетные значения глубины и степени наклепа при фрезеровании сплава ВТ6

V, м/мин	Sz, мм/зуб	N%		K _N , %	h _c , мкм		K _{hc} , %
		эксперимент. (автор)	расчет. (В.Ф. Безьязычный)		эксперимент. (автор)	расчет. (В.Ф. Безьязычный)	
70	0,05	25	29	15	46	42	-8
	0,10	30	33	10	44	45	2
	0,15	37	35	-6	52	60	16
	0,20	44	49	12	60	58	-3
85	0,05	22	26	20	40	48	22
	0,10	28	31	8	47	56	18
	0,15	30	35	16	57	56	-2
	0,20	35	39	11	68	72	21

Известно, что длительная прочность и выносливость зависят от исходного состояния материала поверхностного слоя.

Следовательно, полученные результаты при фрезеровании поверхности лопаток КНД ГТД свидетельствует о том, что применение разработанных моделей параметрической оптимизации и управления режимами обработки позволяет не только уменьшить погрешность и тем самым стабилизировать припуск под последующую обработку, но и за счет снижения глубины и степени наклепа повысить длительную прочность и предел выносливости.

Основные результаты и выводы:

1. Разработаны комплексные математические модели обрабатываемости, позволяющие обеспечить взаимосвязь режимов механической обработки, параметров качества, производительности и себестоимости на чистовых операциях изготовления деталей газотурбинных двигателей.

2. На основе полученных комплексных корреляционных математических моделей разработана и реализована методика параметрической оптимизации технологического обеспечения заданного уровня выходных параметров (производительности, технологической себестоимости) процесса при наличии соответствующих технологических ограничений (характеристик стойкости инструмента, показателей качества обработанной поверхности и др.).

3. Разработанная комплексная математическая модель выходных параметров механической обработки позволяет учитывать в управляющей программе для автоматизированных станков требования по обеспечению стабильных показателей качества поверхности. При выполнении операций чистовой обработки сложнофасонных деталей управление режимами на основе разработанных моделей позволяет сформировать более равномерные показатели качества в пределах обработанной поверхности (обработка по серийной технологии обеспечивает колебание шероховатости в пределах $35\div 50\%$, степени наклепа $20\div 35\%$, предлагаемый вариант соответственно $15\div 20\%$ и $10\div 15\%$).

4. На примере обработки сложнопрофильных деталей ГТД на автоматизированном оборудовании показано, что применение разработанных моделей позволяет в ряде случаев повысить производительность выполнения операций механической обработки в $2,0\div 2,5$ раза при одновременной стабилизации шероховатости и степени упрочнения обработанной поверхности.

5. Разработанная программа управления режимами механической обработки сложнофасонных деталей и установленные закономерности изменения основных показателей, характеризующих операции технологического процесса, позволяют минимизировать погрешность обработки и стабилизировать припуск на последующие операции. Полученные результаты внедрены на ОАО «УМПО» при разработке управляющих программ для механической обработки сложнофасонных деталей ГТД на автоматизированном оборудовании.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах:

Рецензируемые журналы из списка ВАК

1. **Коленченко, О.В.** Исследование влияние условий фрезерования на величину деформаций и характеристики качества обработанной поверхности (на примере лопаток компрессора ГТД) / О.В. Коленченко // СТИН.-2010.- № 5.-С.32-36.

2. **Коленченко, О.В.** Исследование влияния условий механической обработки на точность и характеристики качества материала обработки поверхности / О.В. Коленченко // Вестник УГАТУ: Научный журнал УГАТУ/УГАТУ.-Уфа: РИК УГАТУ, 2011 Т.15, №4 (44).- С.203-206.

3. **Коленченко, О.В.** Оптимизация режимов механической обработки дисков ГТД при заданных технологических ограничениях / О.В. Коленченко // Вестник УГАТУ Научный журнал: Научный журнал УГАТУ/УГАТУ.-Уфа: РИК УГАТУ, 2012 Т.16, №1 (46).- С.94-97.

В других изданиях

4. **Смыслова, М.К.** Оптимизация технологических параметров при нестационарных условиях механической обработки / Смыслова М.К., Коленченко В.М., Коленченко О.В. // Проблемы машиноведения и критических технологий в машиностроительном комплексе РБ. Уфа: Гилем, 2006. -С. 172-177.

5. **Коленченко, В.М.** Методика назначения режимов резания на финишных операциях формирования сложных поверхностей / Коленченко В.М., Никитин

Ю.В., Коленченко О.В. // Сварка. Контроль. Реновация-2006. Шестая научно-техническая конференция/Сборник докладов - Уфа: Гилем, 2007.-С.444-450.

6. **Смылова, М.К.** Создание математической модели механической обработки фрезерованием проточной части КНД ГТД / Смылова М.К., Коленченко В.М., Никитин Ю.В., Коленченко О.В. // Материалы 9 Международной практической конференции «Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки». СПб, Изд-во Политехн. ун-та.2007. -С.444-450.

7. **Коленченко, О.В.** Оптимизация технологических режимов обработки высокоскоростным фрезерованием лопаток компрессора ГТД / Коленченко О.В., Дубин А.И. // Вестник РГАТА им. П.А. Соловьева: Сб. научных трудов.- Рыбинск, 2007.- С.73-75.

8. **Коленченко, О.В.** Влияние жесткости технологической системы на точность при многоосевом фрезеровании (на примере лопаток компрессора ГТД) / Коленченко О.В. // Научно-практическая конференция. Научные технологии в машиностроении: Сборник докладов. Ишимбай, 2009.- С.25-27.

9. **Атрощенко, В.В.** Исследование величины деформаций и качества обработанной поверхности при многоосевом фрезеровании (на примере лопаток компрессора ГТД) / Атрощенко В.В., Коленченко О.В. // СПб, Изд-во Политехн. ун-та.2009.- С.134-138.

10. **Смыслов, А.М.** Исследование возможности компенсации геометрических погрешностей обработки мало жестких деталей (на примере лопаток компрессора ГТД) / Смыслов А.М., Коленченко О.В. // Повышение эффективности механообработки на основе моделирования физических явлений: Материалы Всероссийской научно-технической конференции.- Рыбинск: РГАТА Рыбинск, 2009.- С.27-32.

11. **Коленченко, О.В.** Оптимизация операций технологического процесса обработки детали на основе разработанных комплексных моделей / Коленченко О.В. // Проблемы машиноведения, процессов управления и инновационные технологии в промышленности в Республике Башкортостан: Сборник научных трудов. Уфа: Диалог, 2011.- С.128-137.