Министерство образования и науки Российской Федерации
Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ)

На правах рукописи



Курылев Дмитрий Валерьевич

Основы многокоординатного формообразования межлопаточных каналов осевых моноколес при предварительном прорезании кольцевым инструментом

Специальность 05.02.07 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» (технические науки)

Диссертационная работа на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор Лунев Александр Николаевич

г. Казань, 2016 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4
Глава 1. ИЗГОТОВЛЕНИЕ МОНОКОЛЕС (СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА). ЦЕЛЬ РАБОТЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ 9
1.1. Конструктивные и технологические особенности осевых моноколес турбин и компрессоров 9
1.2. Современные технологии производства осевых моноколес 18
1.3. Формообразование поверхностей межлопаточных каналов осевых моноколес кольцевым режущим инструментом 27
1.4. Выводы. Цель работы и задачи исследований 33
Глава 2 ВЗАИМОСВЯЗЬ КОНФИГУРАЦИИ И РАЗМЕРА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОМПЛЕКСА ТРАКТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕЖЛОПАТОЧНЫХ КАНАЛОВ ОСЕВОГО МОНОКОЛЕСА 36
2.1 Взаимосвязанные геометрические параметры моноколес и кольцевого режущего инструмента 36
2.2 Определение основных геометрических параметров кольцевого режущего инструмента 38
2.2.1 Определение допустимого диаметра кольцевого режущего инструмента 39
2.2.2 Определение ширины режущей части кольцевого режущего инструмента 43
2.2.3. Определение значения высоты внутренней полости кольцевого режущего инструмента 48
2.3. Численный эксперимент по определению значений основных геометрических параметров кольцевого режущего инструмента 50
2.4 Выводы по 2 главе 52
Глава 3 КИНЕМАТИКА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ МЕЖЛОПАТОЧНЫХ КАНАЛОВ МОНОКОЛЕС КОЛЬЦЕВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ 54
3.1. Особенности кинематики формообразования межлопаточных каналов моноколеса 54
3.2. Граничные условия по положению и ориентации кольцевого инструмента при формообразовании межлопаточного канала. 62
3.3. Математическое моделирование многокоординатного формообразования 65

3.3.1. Математическое описание комплекса трактовых поверхностей межлопаточного канала осевого моноколеса 65
3.3.2. Моделирование движения кольцевого режущего инструмента при однокоординатном формообразовании межлопаточного канала 67
3.3.3 Моделирование движения кольцевого режущего инструмента при формообразовании межлопаточного канала с управлением по двум координатам 78
3.3.4. Моделирование движения кольцевого режущего инструмента при формообразовании межлопаточного канала с управлением по трем координатам 84
3.3.5 Моделирование движения кольцевого режущего инструмента при четырех и пяти осевой обработки межлопаточного канала 86
3.4. Моделирование поверхностей межлопаточного канала осевого моноколеса после обработки кольцевым режущим инструментом в CAD/CAM-системе 89
3.5. Выводы по 3 главе 94
Глава 4 ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЙ. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И НАТУРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ 96
4.1. Производственная методика проектирования обработки межлопаточных каналов кольцевым инструментом 96
4.1.1. Методика и результаты численного моделирования процесса многокоординатной обработки межлопаточных каналов 98
4.2 Предварительная обработка межлопаточных каналов осевого моноколеса кольцевым режущим инструментом 104
4.3 Технико-экономические показатели при обработке межлопаточных каналов кольцевым инструментом 109
4.4. Результаты практической реализации на машиностроительных предприятиях 112
4.5. Выводы по 4 главе 113
Заключение 115
Список используемой литературы 118
Приложения 127

ВВЕДЕНИЕ

Современные осевые компрессоры и турбины должны отвечать требованиям надежности, минимального веса, высокой эффективности, экономичности и долговечности [36]. Для обеспечения непрерывности процессов сжатия и расширения рабочего тела они выполняются в виде лопаточных машин [88].

Масса компрессора и турбины современных газотурбинных двигателей составляет 60...70% массы всего авиационного двигателя [36,83], поэтому лопаточные машины должны быть с минимально возможными массой и габаритами. Использование в роторе любого типа моноколес позволяет добиться снижения массы конструкции до 25 % от исходного [36] и повысить частоту его вращения (до 50…80 тыс. об/мин) [19].

Из всего многообразия существующих технологий изготовления моноколес можно выделить три основных варианта [5, 87, 105]:

1. Изготовление моноколес из высокоточных профилированных заготовок, полученных точным литьем, штамповкой или методами аддитивных технологий.

2. Изготовление моноколес путем сборки ранее обработанных дисков и лопаток с помощью различных методов пайки и сварки.

3. Изготовление моноколес из монолитных заготовок, в которых отсутствует профилированный лопаточный венец путем удаления материала из межлопаточного пространства.

Каждый из этих вариантов используется в зависимости от геометрии моноколес, материала, специфики производства и т.д.

Фрезерование концевой фрезой из монолитной непрофильтрованной заготовки является одним из самых широко распространённых методов получения осевого моноколеса [62]. Однако трудоёмкость изготовления очень высока из-за необходимости удаления большого количества материала из межлопаточного канала на черновом этапе инструментом с малым размером режущей части [46].

В 2003 году появилась первая информация о теоретической возможности повышения производительности предварительного прорезания межлопаточных каналов осевых монколес по схеме кольцевого фрезерования [70]. Обработка межлопаточных каналов кольцевым инструментом напоминает схему нарезания конических колес с круговыми зубьями резцовой головкой. Увеличение

производительности обработки достигается за счет использования при предварительном прорезании межлопаточных каналов осевых моноколес режущего инструмента с большим размером режущей части.

Разработкой данного метода занимаются как в России (Лунев А.Н., Моисеева Л.Т.), так и за рубежом (Turcotte B.D., Erickson R.E.). В результатах исследований [55, 57, 59] были предложены и запатентованы различные варианты конструкции кольцевого инструмента, а также принципиальные схемы траектории движения кольцевого инструмента [58,71].

В настоящее время созданы предпосылки для решения проблемы создания высокопроизводительного технологического процесса предварительного прорезания межлопаточных каналов моноколес осевых компрессоров и турбин:

– создана теория высокопроизводительного прорезания межлопаточных каналов моноколес кольцевым инструментом;

– созданы и освоены методы обработки режущим инструментом в виде тела вращения, который имеет внутренние, наружные и торцевые режущие кромки для обработки конических зубчатых колес с круговым зубом;

– в механосборочном производстве созданы и освоены методы и средства для многокоординатной обработки комплекса поверхностей межлопаточного канала, включая поверхности спинки и корыта, входные и выходные кромки, поверхность втулки (дно межлопаточного канала), радиуса сопряжения спинки и корыта со втулкой режущим инструментом в виде тела вращения, который имеет наружные и торцевые режущие кромки.

Вместе с тем следует отметить проблемы реализации этих предпосылок:

– отсутствие теоретических зависимостей и методик расчета основных размеров кольцевого инструмента с учетом комплекса геометрических параметров трактовых поверхностей межлопаточного канала;

– отсутствие теоретических зависимостей и методик расчета траектории перемещения кольцевого инструмента при многокоординатной обработке комплекса поверхностей межлопаточного канала.

В соответствии с вышеизложенным **целью данной работы** является повышение производительности изготовления осевых моноколес из непрофилированных заготовок.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– определить зависимости конфигурации и размеров кольцевого режущего инструмента от комплекса параметров трактовых поверхностей моноколес осевых компрессоров и турбин;

– определить область применения кольцевого режущего инструмента для формообразования межлопаточных каналов моноколес с применяемыми в авиадвигателестроении лопаточными решетками;

– разработать кинематические схемы и математические модели многокоординатного формообразования межлопаточных каналов кольцевым инструментом;

– определить влияние количества управляемых координат на погрешность формообразования межлопаточных каналов кольцевым инструментом с использованием численного эксперимента;

– экспериментально опробовать различные по количеству управляемых координат схемы многокоординатного формообразования и сравнить их по погрешности и производительности с учетом результатов численного и натурного экспериментов;

– разработать практические рекомендации по применению кольцевого инструмента для формообразования межлопаточных каналов моноколес и определения предпочтительной кинематической схемы по технико-экономическим показателям.

Методология и методы исследования. Теоретические исследования проводились на основе положений технологии машиностроения, теории математического моделирования.

Базовые исследования проводились с использованием CAD/CAM системы Siemens NX, станков с ЧПУ на кафедре «Технологии машиностроительных производств» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н.Туполева .

Научная новизна работы заключается:

– в математических зависимостях конфигурации и размеров кольцевого режущего инструмента от комплекса параметров трактовых поверхностей моноколес осевых компрессоров и турбин;

– в разработанных кинематических схемах и математических моделях многокоординатного формообразования межлопаточных каналов кольцевым инструментом;

– в определении влияния количества управляемых координат на погрешность формообразования межлопаточных каналов кольцевым инструментом с использованием численного эксперимента;

– в разработанных практических рекомендациях по применению кольцевого инструмента для формообразования межлопаточных каналов моноколес и определении предпочтительной схемы по технико-экономическим показателям.

Практическая ценность работы заключается:

- в методиках подбора кольцевого инструмента для обработки межлопаточных каналов определенного моноколеса осевых компрессоров и турбин;

- в методиках расчета траектории движения кольцевого инструмента во время обработки межлопаточных каналов;

- в методиках определения предпочтительной по технико-экономическим показателям схемы формообразования межлопаточных каналов кольцевым инструментом.

Личный вклад автора. Все экспериментальные и теоретические результаты получены автором лично. Участие соавторов Лунева А.Н. и Моисеевой Л.Т. в двух научных статьях носило консультативный характер.

Положения, выносимые на защиту:

- аналитические зависимости конфигурации и размеров режущего инструмента от геометрических параметров межлопаточных каналов моноколеса осевых компрессоров и турбин;

- кинематические схемы и математические модели многокоординатного формообразования межлопаточных каналов кольцевым инструментом.

- методика предварительной разработки технологии прорезания межлопаточных каналов в зависимости от выбранной кинематической схемы. С помощью данной методики можно определить технико-экономические показатели выбранной технологии для возможности выбора оптимального варианта изготовления осевого моноколеса.

Степень достоверности результатов и апробации работы.

Достоверность результатов теоретических исследований обеспечивается автором путем применения апробированных методов, аналитической и дифференциальной геометрии, теории поверхностей, имитационного моделирования и других разделов высшей математики. Достоверность

предложенных моделей и кинематических схем подтверждается имитационным моделированием и натурным экспериментом.

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международных научных конференциях: международная молодежная научная конференция « XX Туполевские чтения » (г. Казань, 2013 г.), международная молодежная конференция « XXXIX Гагаринские чтения » (г. Москва, 2013 г.), международная научно-практическая конференция «Поиск эффективных решений в процессе создания и реализации научных разработок в российской авиационной и ракетно-космической промышленности» (г. Казань, 2014 г.), II международная конференция «Аддитивные технологии: настоящее и будущее». ФГУП «ВИАМ» (г. Москва, 2016 г.), IV всероссийская научно-практическая конференция «Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли» (г. Казань, 2016 г.)

В полном объеме диссертация докладывалась на расширенном заседании кафедры «Технологии машиностроительных производств» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, библиографии (115 литературных источника) и приложений. Объем диссертации – 134 страницы. В тексте 82 рисунков и 15 таблиц. Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ» на кафедре «Технологии машиностроительных производств».

ГЛАВА 1.
ИЗГОТОВЛЕНИЕ МОНОКОЛЕС (СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА). ЦЕЛЬ РАБОТЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Конструктивные и технологические особенности осевых моноколес турбин и компрессоров

Современные осевые компрессоры и турбины должны отвечать требованиям надежности, минимального веса, высокой эффективности, экономичности и долговечности [36]. Для обеспечения непрерывности процессов сжатия и расширения рабочего тела они выполняются в виде лопаточных машин [88].

По характеру взаимодействия с потоком газа и жидкости лопаточные машины подразделяют на машины-исполнители и машины-двигатели (рис. 1.1). Первые (компрессоры, вентиляторы) подводят механическую энергию к потоку, вторые (турбины) отводят ее от потока [8].

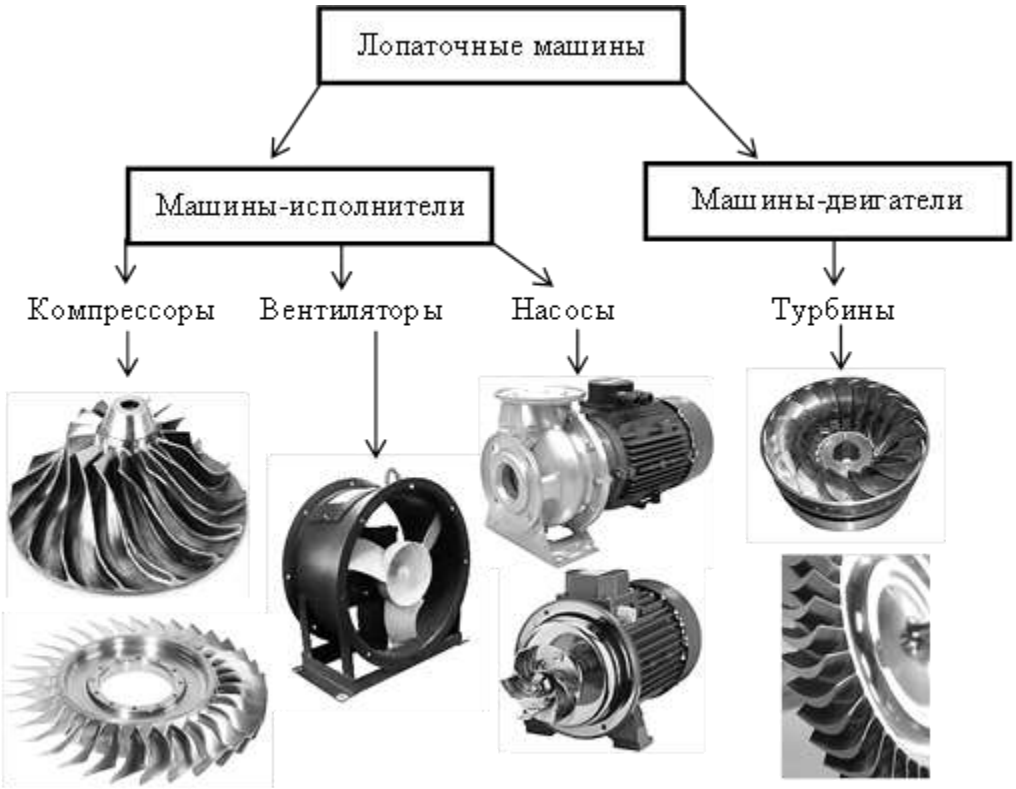


Рис. 1.1. Машины-исполнители и машины-двигатели [8]

Основным элементом лопаточной машины, взаимодействующим с потоком газа или жидкости, является лопатка (рис. 1.2,а). Лопатка имеет профильную

часть (перо) ***1*** (специально спрофилированная аэродинамическая поверхность), с помощью которой в лопаточной машине осуществляет энергообмен, и хвостовик ***2***, предназначенный для крепления и фиксации лопатки в диске колеса, а также передачи усилий от лопатки к ротору [25].

Совокупность лопаток (рис.1.2,б), установленных в ободе или диске ***4***, называют лопаточным венцом ***3***. Вращающиеся лопаточные венцы, соединенные с дисками, образуют рабочие колеса. Неподвижные лопаточные венцы в компрессоре называют направляющими аппаратами, а в турбине – сопловыми аппаратами.

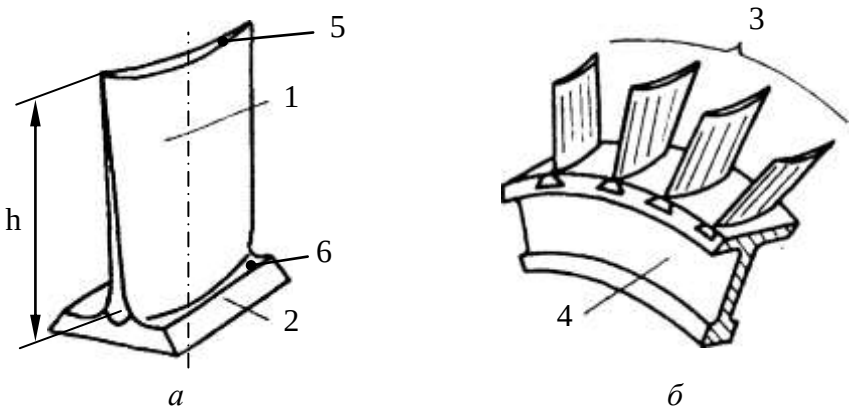


Рис. 1.2. Основные элементы рабочих колес лопаточных машин [42]:
а – лопатка; б – лопаточный венец;
1 – перо; 2 – хвостовик; 3 – венец; 4 – диск; 5 – концевая часть лопатки; 6 – корневая часть лопатки; h – высота лопатки, мм

Лопаточные машины широко применяются во всех отраслях промышленности: авиакосмической, энергетической, транспортной и т.д. Конструкции рабочих колес разнообразны [3, 14]. Их конструктивно-технологические параметры могут изменяться в широком диапазоне в зависимости от конкретного двигателя и его назначения [8, 13, 39, 53].

По конструктивно-технологическому признаку [12, 88] рабочие колеса можно классифицировать на два класса (Таблица 1.1.):

1) рабочие колеса, в которых лопатки и диски изготавливаются отдельно, а потом собирают;

2) рабочие колеса, в которых лопатки и диск изготавливают как единое целое (моноколеса).

Таблица 1.1.

Характерные размеры рабочих лопаток и моноколес компрессоров и турбин [12]

Конструктивное исполнение	Наружный диаметр $D_к$, мм	Высота пера h, мм	Эскиз рабочей лопатки
Лопатки отдельные	–	10-100 101-250 251-600 601-1000	
Моноколесо	150-300 301-700	10-100 20-200	

Основными геометрическими параметрами проточной части осевого рабочего колеса в меридиональной плоскости по ГОСТ 23851-79 [22]являются (рис. 1.3):

– наружный диаметр рабочего колеса осевой ступени компрессора или турбины в его входном сечении $D_к$;

– диаметр втулки рабочего колеса осевой ступени компрессора или турбины в его входном сечении $D_{вт}$;

– ширина рабочего колеса осевой ступени компрессора или турбины $S_к$.

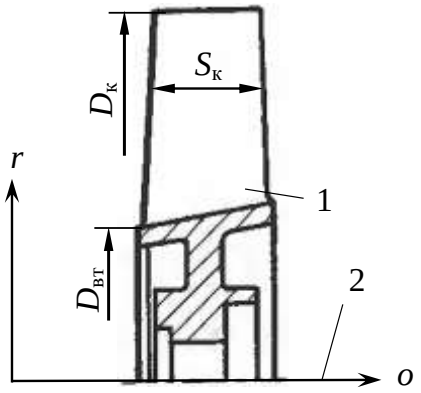


Рис. 1.3 Основные геометрические параметры рабочего колеса в меридиональном сечения : *1* – рабочее колесо; *2* – ось вращения

Отношение диаметра втулки к диаметру колеса $\bar{d} = \frac{D_{вт}}{D_к}$, называемое «относительный диаметр втулки», изменяется от 0,3…0,6 в первых до $\bar{d} = 0{,}8...0{,}92$ в последних ступенях многоступенчатых осевых компрессоров [30].

Применение более коротких лопаток – $\bar{d} > 0{,}92$ – нежелательно из-за чрезмерного роста потерь и, как следствие, снижения коэффициента полезного действия ступени.

Форма и размеры пера лопаток рабочего колеса определяются путем аэродинамического расчета. Окончательная ее конструкция уточняется с учетом требований обеспечения статической и динамической прочности [84].

Например, для предотвращения резонансных колебаний на профильной части лопаток большого удлинения выполняют антивибрационные полки ***3*** [83] (рис. 1.4).

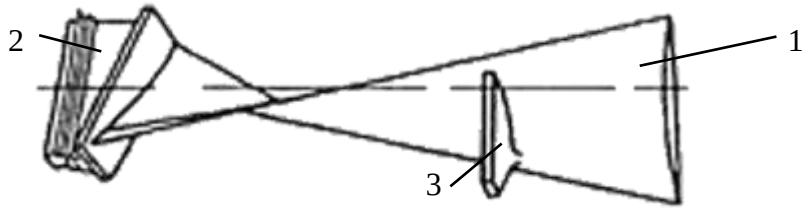


Рис. 1.4. Лопатка с антивибрационной полкой [87]:
1 – перо; 2 – хвостовик; 3 – антивибрационная полка

Между лопатками рабочих колес компрессора и турбин имеются следующие конструктивные отличительные признаки [88]:

– профиль пера лопаток компрессора, как правило, более тонкий, чем у пера лопаток турбины;

– количество лопаток многоступенчатого осевого компрессора значительно больше количества лопаток турбины того же двигателя;

– перо лопаток турбины заметно более изогнуто, чем у лопаток компрессора.

Лопатки компрессоров, работающие в дозвуковом потоке, имеют профили ламинарного обтекания, а лопатки сверхзвуковых ступеней – клиновидный профиль [14] (используется эффект сопла Лаваля).

Лопаточная машина – это тело вращения. Если взять кольцевое сечение с произвольным радиусом r_i, ось которого совпадает с осью турбомашины, пересечь им лопаточный венец, и полученную в сечении картину развернуть в плоскость (рис. 1.5), то изображение, полученное таким образом, называется элементарной решеткой профилей [27]. Все применяемые в турбостроении решетки можно разделить на несколько групп, классифицируя их по различным

признакам. По назначению решетки лопаток подразделяются на реактивные сопловые (неподвижные) и рабочие (вращающиеся), а также на активные рабочие и поворотные.

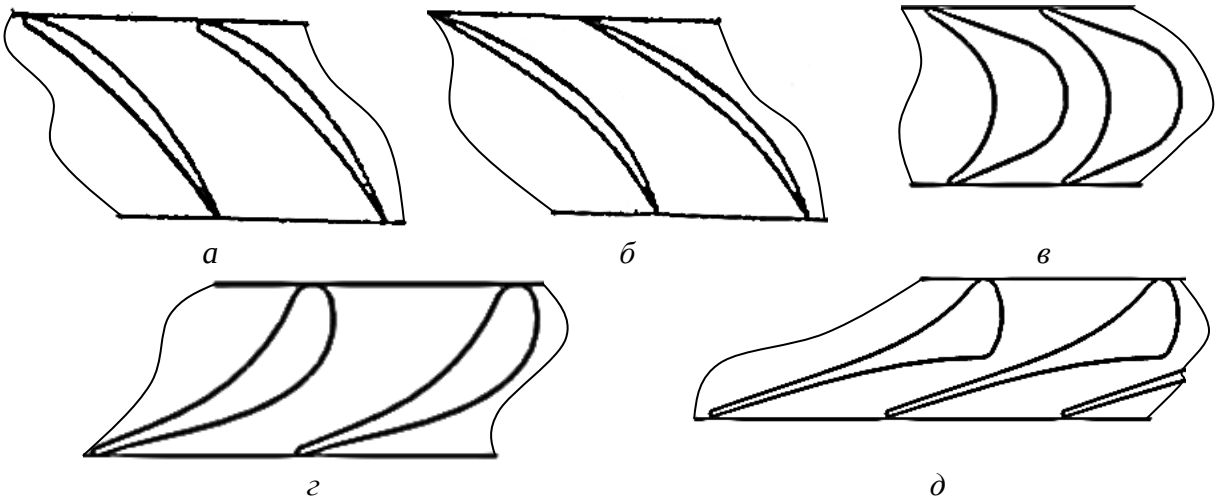


Рис. 1.5. Формы профилей и каналов реактивных и активных решеток [27]:
а – активная решетка для дозвуковых скоростей; б, в – активные решетки для сверхзвуковых скоростей; г – реактивная решетка для дозвуковых скоростей;
д – реактивная решетка для сверхзвуковых скоростей

Решетки определяются формой профиля и межлопаточного канала. Профиль лопатки (рис. 1.6) состоит из корыта ***1***, спинки ***2*** и соединяющих их входной ***3*** и выходной кромке ***4***. Кривые, описывающие профили спинки и корыта, строят с помощью массива точек. Входную и выходную кромку описывают в виде дуг окружностей радиусом r_1 и r_2. Координаты массива точек спинки $[x_i; y_с]$ и корыта $[x_i; y_к]$, а также центр скругления входной $[x_1; y_1]$ и выходной кромки $[x_2; y_2]$ даны в конструкторской документации относительно системы координат теоретического профиля *XOY*, которая повернута на угол β относительно оси вращения ***5***. Отрезок ***7***, соединяющий точки пересечения средней линии профиля пера ***6*** с профилями входной и выходной кромок, называют хордой.

Угол между хордой профиля пера и касательной к средней линии профиля пера в точке пересечения ее с профилем входной кромки пера называют углом наклона входной кромки пера χ_1, а в точке пересечения средней линии профиля с профилем выходной кромки пера – углом наклона выходной кромки пера χ_2. Решетки современных стационарных дозвуковых осевых компрессоров обычно имеют угол поворота профиля $\Delta\chi = \chi_1 - \chi_2 < 45°$ [4]

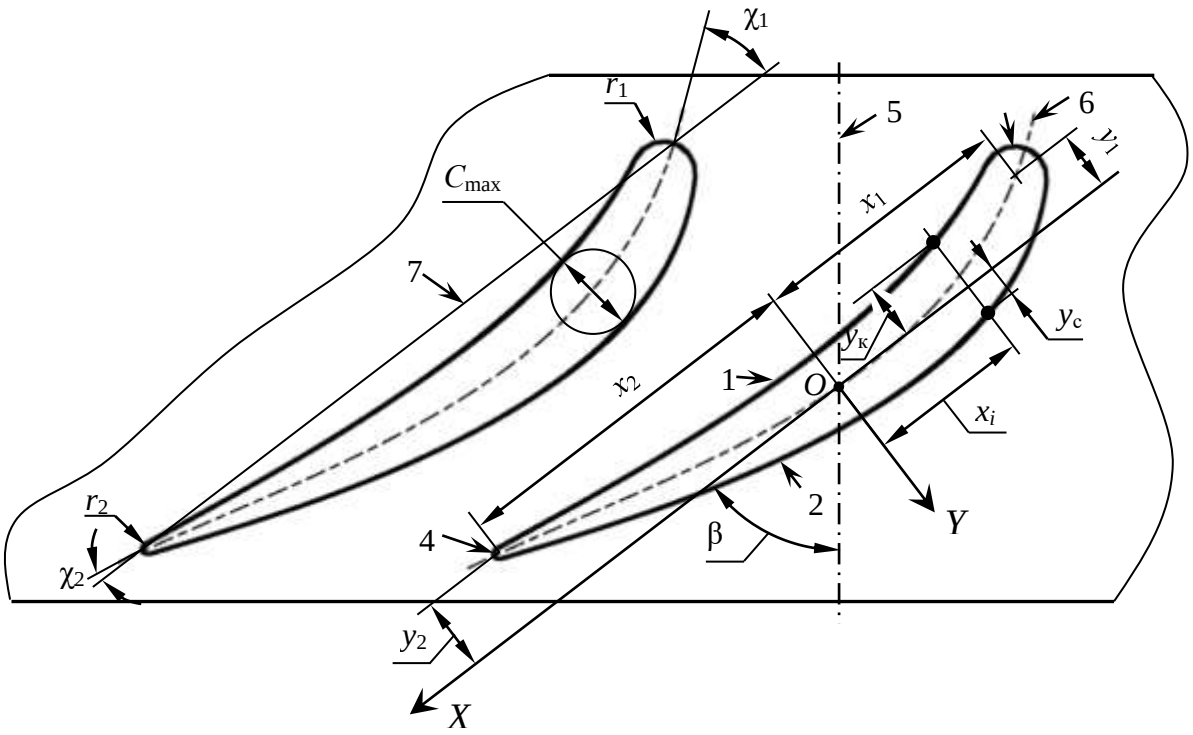


Рис. 1.6. Основные геометрические параметры решеток лопаток

Каждый геометрический параметр моноколеса (рис. 1.3) и решетки профилей (рис. 1.6) влияет как на газодинамические характеристики, так и на прочность конструкции [3, 84]. В связи с этим существуют зависимости между основными геометрическими параметрами колеса и решетки [25, 14]. Поэтому при описании решетки используют понятие “относительный геометрический параметр”, который равен отношению геометрического параметра к длине хорды b. Применяемые относительные толщины профиля $\bar{c}=\frac{c}{b}$ лопаток стационарных авиационных осевых компрессоров представлены в Таблице 1.2.

Таблица 1.2

Относительные толщины профиля рабочих лопаток осевых компрессоров [90]

Участок / Тип лопаток	Корневая часть	Средняя часть	Концевая часть
	$\bar{c}_к$	$\bar{c}_{ср}$	$\bar{c}_н$
Рабочие:			
авиационные	< 0,12	0,08	0,04
стационарные	< 0,14	0,10…0,12	0,06

Классификация решеток может быть произведена также по геометрическим параметрам – относительной высоте и веерности, влияние которых должно рассматриваться совместно. В проточной части паровых и газовых турбин

применяются решетки малой относительной высоты $\left(\bar{h}=\frac{h}{b}<1{,}0\right)$ и малой веерности $\left(\theta=\frac{D_к}{h}>20\right)$, решетки средней высоты ($\bar{h}$ = 1,0 – 3,0) и средней веерности (θ = 10 – 20) и решетки большой высоты ($\bar{l}$ > 3,0) и большой веерности (θ < 10) [26]. Для первых ступеней удлинения лопаток находятся обычно в диапазоне $\bar{h}$ = 1,5...2,5, для последних $\bar{h}$ < 1 [27].

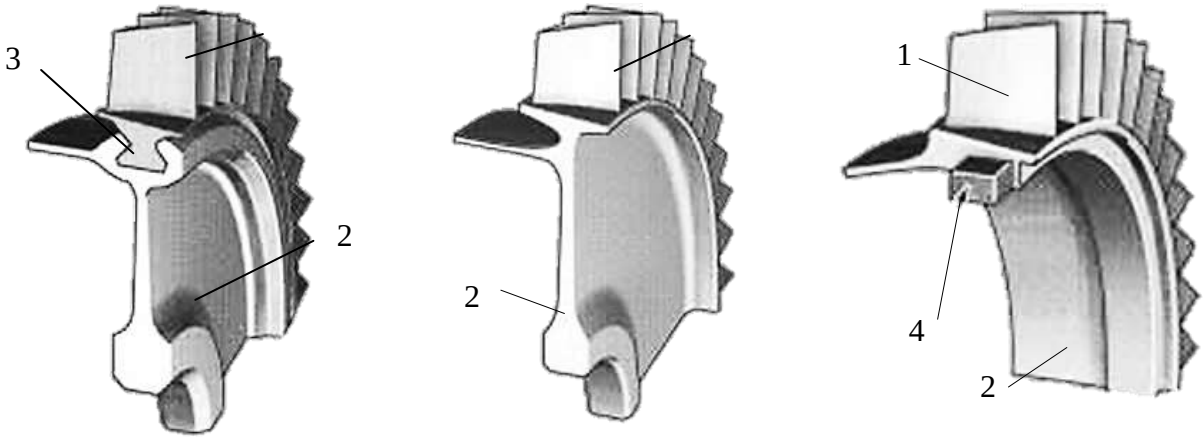
Лопатки — одни из самых ответственных и массовых деталей двигателя, работающих в сложных условиях [87]. В процессе работы на них действуют инерционные и аэродинамические силы, вызывающие напряжения растяжения, изгиба и кручения при высокой температуре (для компрессора — 300...800 °С) [28, 30]. Кроме того, лопатки испытывают переменные напряжения от вибрационных нагрузок, амплитуда и частота которых изменяется в широких пределах [39, 64]. Эти процессы также влияют на срок службы детали вследствие уменьшения поперечного сечения, несущего нагрузки, и введения источников концентрации напряжений.

Масса компрессора и турбины современных газотурбинных двигателей составляет 60...70% массы всего авиационного двигателя [36, 83], поэтому лопаточные машины должны быть с минимально возможными массой и габаритами. Использование в роторе любого типа моноколес позволяет добиться снижения массы конструкции до 25 % от исходного [36] и повысить частоту его вращения (до 50…80 тыс. об/мин) [19]. Первым шагом в совершенствовании конструкции моноколес стало появление блисков. Блиск – это осевое рабочее колесо, в котором лопатки ***1*** выполнены с диском ***2*** за одно целое (рис. 1.7,б).

Дальнейшим развитием идеи снижения массы моноколес, является применение роторов, изготовленных с применением технологии «блинг». Блинг – это осевое рабочее моноколесо, армированное по внутренней поверхности металлокомпозитной матрицей ***4***, которая повышает несущую способность конструкции (рис. 1.7,в).

Главное преимущество «блисковой» конструкции – отсутствие замковых соединений лопаток с диском ***3***, а также отсутствие части проблем, связанных с обеспечением прочности и долговечности машины: концентрации напряжений в

замковых пазах дисков, фреттинг-коррозии на контактных поверхностях и снижение вибропрочности лопаток и дисков [25].



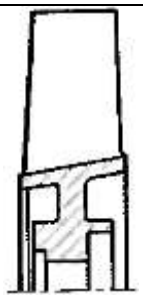
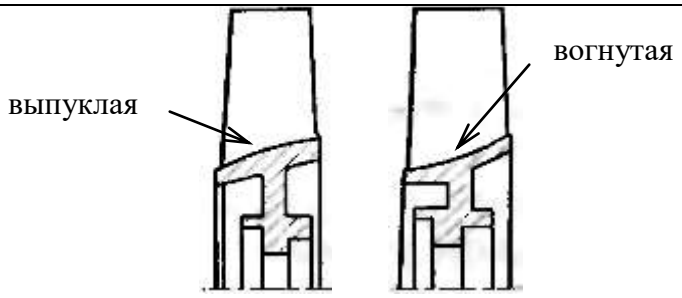
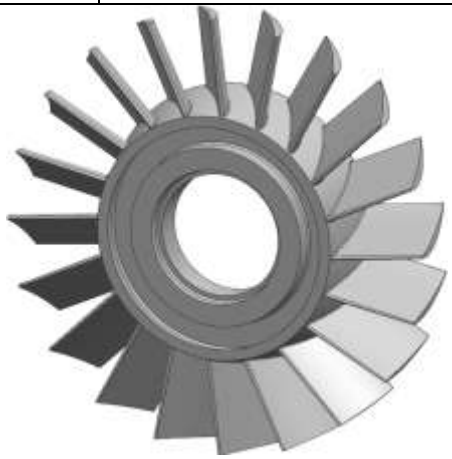
а *б* *в*

Рис. 1.2 Снижение массы рабочих колес оптимизацией их конструкции [36]:
а – традиционная конструкция осевого колеса; б – осевое колесо блисковой конструкции;
в – осевое колесо блинговой конструкции;
1 – лопатка; 2 – диск; 3 – хвостовик; 4 – металлокомпозитная матрица

Наибольшее распространение из монолитных конструкций в компрессоре получили рабочие осевые и центробежные моноколеса (Таблица 1.3) .

Таблица 1.3

Типовые компрессорные осевые моноколеса [36, 88]

Поверхность втулки	
Прямолинейная	Профильная
	
	

Технология интегрированных диска и лопатки (блиск) все шире используется при проектировании авиационных газотурбинных двигателей [12]. В настоящее время моноколеса эксплуатируются в достаточно жестких условиях, характеризующихся сочетанием различных режимов работы двигателя (запуск, взлет, полет в стационарном режиме, форсаж и т.д.). Реализация этих режимов связана с высокой скоростью изменения термодинамических параметров двигателя, и, как следствие, возникновением в лопатках моноколес высоких градиентов температур и термических напряжений, что приводит к их разрушению.

Обоснованный выбор показателей качества и разработка технологических требований к изготовлению блисков должны осуществляться с учетом условий эксплуатации газотурбинных двигателей.

Наиболее специфичной особенностью осевых моноколес, определяющая построение технологического процесса и обуславливающая значительную трудоемкость их обработки, является необходимость соблюдения требований по точности изготовления пера лопатки и базовых поверхностей диска моноколеса. Поверхности, служащие для соединения осевого моноколеса с элементом вала газотурбинного двигателя, должны быть изготовлены с точностью их выполнения и точностью их расположения относительно друг друга в пределах IT5...IT6. В отраслевом стандарте ОСТ 1.02571-86 [65], регламентированы предельные отклонения пера лопаток. Точность изготовления определяется путем совмещения фактического профиля с номинальным таким образом, чтобы совпадали входные кромки и средние линии (рис. 1.8) . При этом стандартом определены допуски на следующие величины:

- отклонение размера радиуса входной кромки r_1;
- смещение центра координат $X_ф O_ф Y_ф$ фактического профиля;
- отклонение профиля пера в корневом сечении от номинального по оси Y;
- отклонение длины хорды профиля b;
- изменение угла установки β;
- предельные смещения входной кромки относительно конструкторских баз лопатки ***3*** и ***4***.

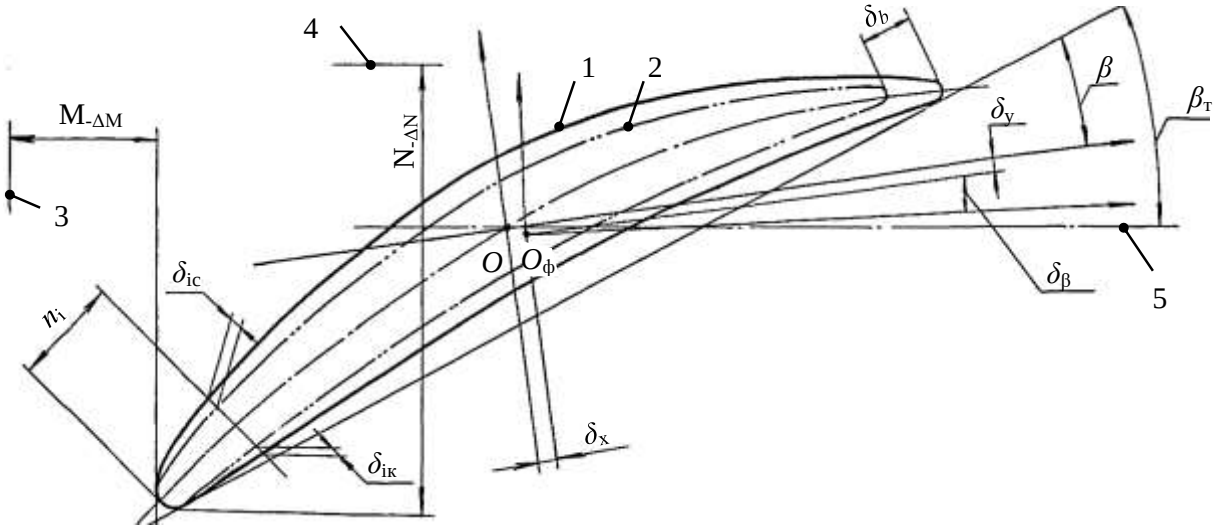


Рис. 1.8. Нормируемые предельные отклонения пера лопаток [65]:
1 – теоретический профиль; 2 – фактический профиль; 3 и 4 – конструкторские базы;
5 – ось вращения моноколеса

В связи с многообразием возможной конструкции размеров осевых моноколес и требований к ним процедура проектирования технологического процесса изготовления осевого моноколеса требует индивидуального подхода.

1.2. Современные технологии производства осевых моноколес

Из всего многообразия существующих технологий изготовления моноколес можно выделить три основных варианта [5, 87, 105]:

1. Изготовление моноколес из высокоточных профилированных заготовок полученных точным литьем, штамповкой или методами аддитивных технологий.

2. Изготовление моноколес путем сборки ранее обработанных дисков и лопаток с помощью различных методов пайки и сварки.

3. Изготовление моноколес из монолитных заготовок, в которых отсутствует профилированный лопаточный венец путем удаления материала из межлопаточного пространства.

Изготовление моноколес по первому варианту, т.е. методами точного литья и штамповки, позволяет снизить трудозатраты по обработке лопаточного венца. Однако, для изготовления профилированной заготовки необходимо специальное технологическое оборудование и оснастка [48]. В связи с этим дополнительные затраты на подготовку заготовительного производства окупают себя при достаточно больших объемах выпуска изделий.

При изготовлении профилированных заготовок с использованием аддитивных технологий нет необходимости в специальной технологической оснастке, что уменьшает технологический цикл получения заготовки [41]. Однако до настоящего времени аддитивные технологии не нашли применение в лопаточном производстве.

При использовании второго варианта неразъемное соединение диска с лопатками можно получить различными методами сварки (трением, лазерной и т.п.), а также методом гидростатического прессования [61]. Технология основана на спекании лопаток с порошковым сплавом, образующим диск. При этом процессе, заранее изготовленные литые лопатки с помощью керамических закладных элементов упаковываются в капсулу, в которую затем засыпают гранулы порошкового сплава. Процесс спекания осуществляется в условиях вакуума при температуре около 1200 $^{\circ}$C и давлении порядка полутора атмосфер. После окончания процесса капсула удаляется травлением. Метод диффузионного сращивания дает возможность соединять элементы из разнородных материалов [9, 111].

Достоинства технологий изготовления профилированных заготовок путем соединения ранее изготовленных лопаток и диска в том, что для изготовления изделий используется минимум материала [91], обеспечивается возможность создания колес из разноименных сплавов [110]. Данная технология позволяет восстанавливать поврежденные в эксплуатации лопатки, вследствие малого съема материала уменьшается время изготовления [16]. Но из-за сварного соединения осевое моноколесо имеет меньшую прочность по сравнению с блиском, полученным из монолитной заготовки [9] к тому же данные технологии не применяются для изготовления крупногабаритных колес. Можно также отметить высокую стоимость оборудования и высокие требования к квалификации персонала, сложность изготовления и подготовки поверхностей под сварку [81]. Так же затруднен контроль зоны сварного шва на наличие дефектов [61].

Главная особенность третьего варианта технологии изготовления осевого моноколеса из монолитной непрофилированной заготовки, состоит в том, что на черновой и получистовой операциях необходимо удалить практически весь объем

метала из межлопаточного пространства. Процесс изготовления осевого моноколеса условно можно разделить на четыре этапа (рис. 1.9):

1. Заготовительный этап. В качестве заготовки могут служить непрофилированные отливки, штамповки, заготовки-поковки, а также сортовой прокат.

2. Черновой этап. При черновой обработке прорезают межлопаточные каналы в заготовке, при необходимости выравнивают припуски на поверхностях спинки и корыта пера лопатки и поверхности втулки. После этого получается заготовка с равномерным слоем припуска

3. Чистовой этап. На чистовых операциях обеспечивают точность размеров, формы и расположения поверхностей в соответствии с требованиями рабочего чертежа.

4. Окончательный этап. На отделочных операциях обеспечивают параметры качества поверхностного слоя: шероховатость, наклеп, остаточные напряжения.

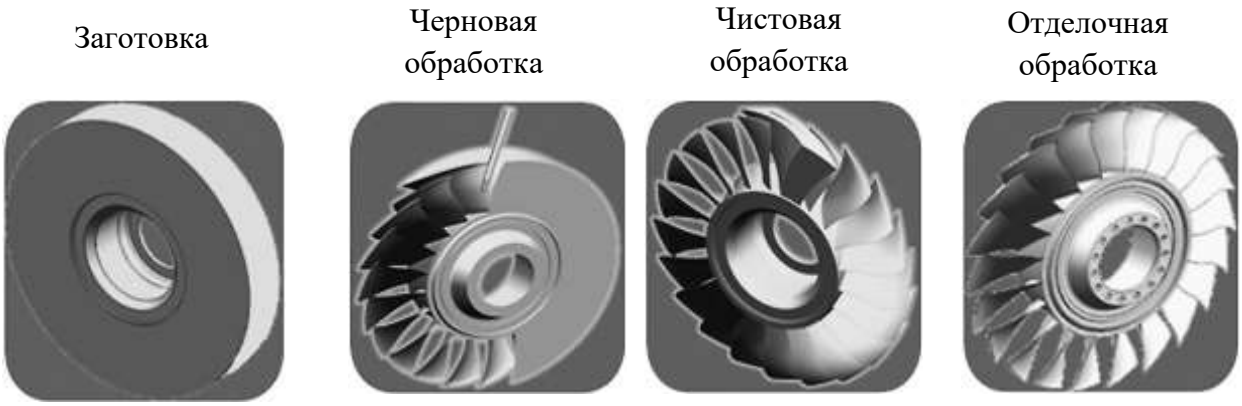


Рис. 1.9. Этапы изготовления осевого моноколеса из непрофилированной заготовки [5]

Существует множество способов удаления материала из межлопаточного канала на черновом этапе. Все более широкое применение для черновой обработки межлопаточных каналов получает электроэрозионная обработка [20, 103]. Этот метод обработка основана на вырывании частиц материала с поверхности импульсом электрического разряда. Под воздействием высоких температур в зоне разряда происходят нагрев, расплавление, и частичное испарение металла. Процесс электроэрозионной обработки происходит в рабочей жидкости, которая заполняет пространство между электродами; при этом один из электродов – заготовка, а другой – электрод-инструмент.

К основным достоинствам этого способа обработки можно отнести:

– возможность обработки любых токопроводящих материалов независимо от их физико-химических свойств, твердости, вязкости и хрупкости;

– обеспечивается обработка заготовки одновременно по всей сложной поверхности с минимальной шириной реза за счет простого поступательного перемещения электрода-инструмента, имеющего на торце необходимый профиль обрабатываемой поверхности;

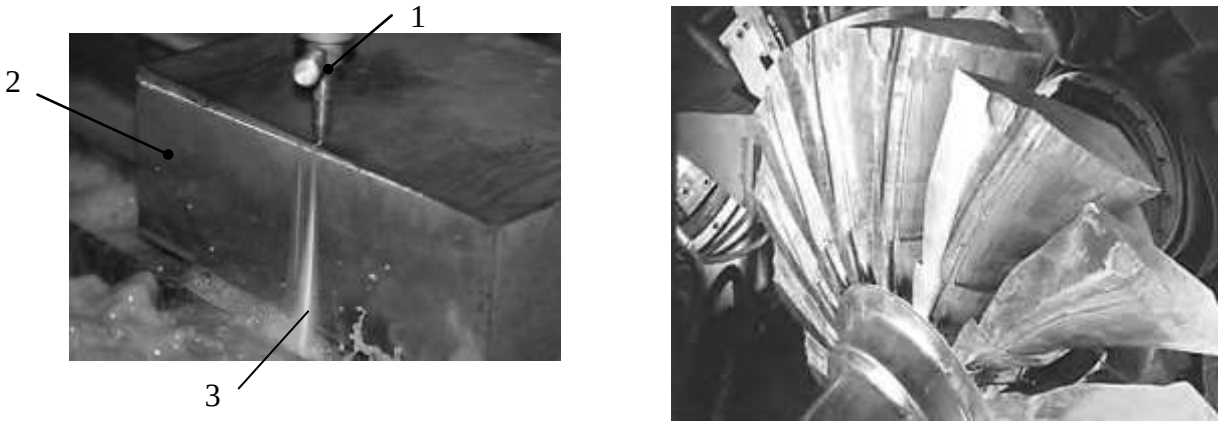
– технологические операции практически выполняются без силового воздействия инструмента на заготовку, что позволяет обрабатывать поверхности нежестких и тонкостенных деталей;

– обеспечивается возможность одновременного обслуживания одним оператором нескольких станков, так как электроэрозионные станки, как правило, являются станками-полуавтоматами и автоматами; появляется возможность автоматизации.

Но так для получения высоких температур в зоне разряда необходима большая концентрация энергии и поэтому данные методы энергозатратные и малопроизводительные [105], что повышает себестоимость осевых моноколес.

Еще одним из возможных способов черновой обработки лопаток осевых моноколес, является: гидроабразивная обработка [10, 20]. Это метод один из наиболее эффективных, экологически чистых и энергосберегающих технологий обработки, применяемых для раскроя листового материала, при прорезке пазов и окон, прошивке отверстий, зачистке и полировке наружных и внутренних поверхностей сложного профиля, в том числе и в труднодоступных местах изделий, маркировке и гравировании.

При гидроабразивной обработке (рис. 1.10,а) в водоструйных установках насосом высокого давления создается высокое давление воды (около 400 МПа), которое преобразуется в кинетическую энергию струи ***3***, вытекающей через смесительные трубки сопла ***1***. В процесс обработке сопло ***1*** перемещают относительно непрофилированной заготовки ***2***.



а *б*

Рис. 1.3 Гидроабразивная обработка межлопаточных каналов осевых моноколес:
а – пример обработки; б – осевое моноколесо после гидроабразивной обработки;
1 – смесительная трубка сопла; 2 – обрабатываемая заготовка; 3 – гидроабразивная струя

Основными недостатками гидроабразивной обработки являются: сравнительно малый срок службы смесительных трубок (до 50 ч работы) [77]; сложность управления обработкой, обусловленного спецификой взаимодействия струи и обрабатываемого материала низкая точность [103] и плохое качество полученных поверхностей межлопаточного канала (рис. 1.10,б).

Предпринятые попытки использовать метод гидроабразивной обработки для повышения производительности предварительного прорезания межлопаточных каналов не увенчалась успехом [20].

В связи с этим основным методом черновой и чистовой обработки межлопаточных каналов моноклес осевых ступеней является в настоящее время фрезерование концевым инструментом [51, 60], в качестве которого на черновом этапе используются концевые], а на чистовом – сферические и сфероконические фрезы.

В любом случае это самый быстрый путь для того, чтобы делать экспериментальные опытные образцы. В серийном производстве этот метод экономически целесообразен при изготовлении титановых блисков сравнительно небольших размеров. Моноколеса из высокопрочных сталей и никелевых сплавов получать фрезерованием неэффективно вследствие низкой обрабатываемости этих материалов. Фрезерованием невозможно получить очень тонкие лопатки [18, 38, 96].

Предварительную прорезку межлопаточных каналов можно производить фрезами различной конфигурации. Существуют способ прорезки межлопаточной каналов дисковой фрезой (рис. 1.11).

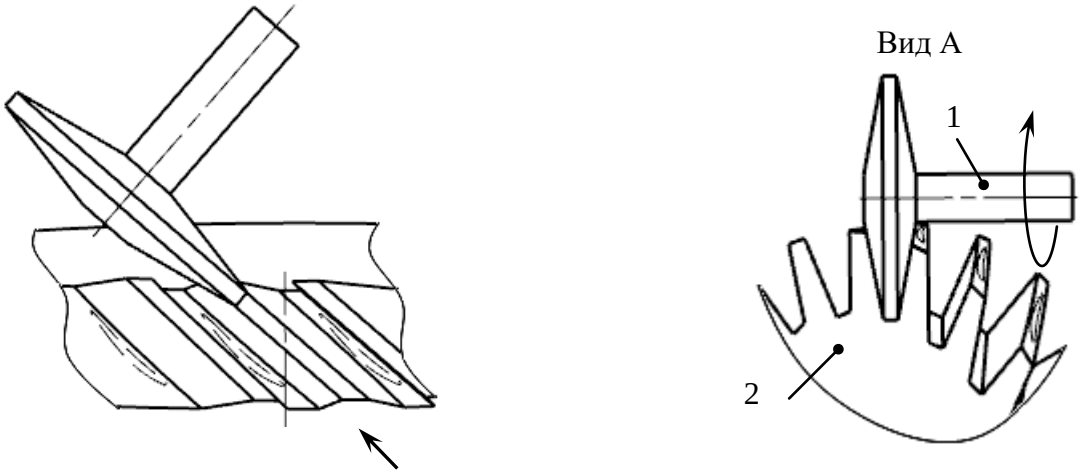


Рис. 1.11. Прорезка межлопаточных каналов осевых моноколес дисковой фрезой [73]:
1 – дисковая модульная фреза; 2 – непрофилированная заготовка; *П* – движение фрезы

Дисковую фрезу *1* устанавливают относительно заготовки *2* на некоторый угол. Затем вращающуюся фрезу перемещают вдоль межлопаточного канала *П*, в результате чего происходит обработка одного канала. Образованный межлопаточный канал имеет прямолинейную форму. Поэтому после обработки дисковой фрезой необходимо ввести дополнительную операцию по выравниванию припуска концевой фрезой

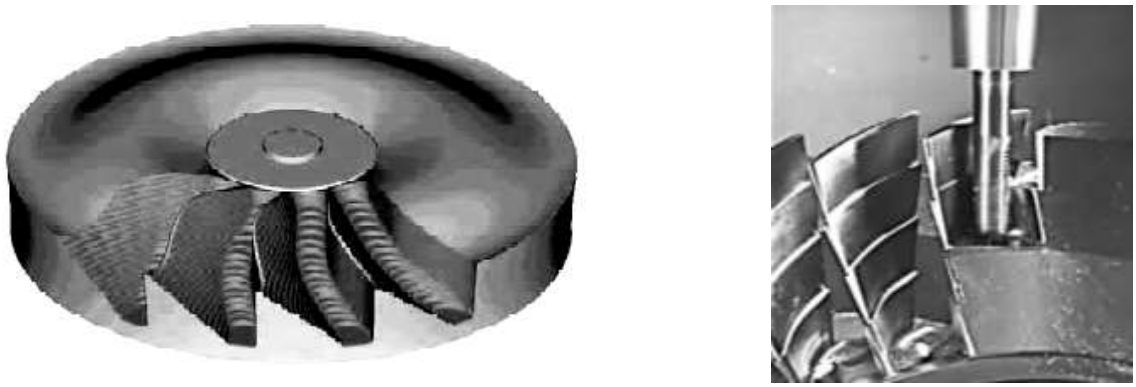
Данный метод позволяет получить межлопаточные каналы с высокой производительностью, однако, из-за особенности конструкции фрезы обработка моноколес с большой закруткой пера лопатки и с сильноизогнутым профилем невозможна.

Более широкое распространение получила фрезерная обработка концевой фрезой. С использованием CAM-систем черновое фрезерование межлопаточных каналов осевых моноколес можно выполнить различными фрезерными стратегиями:

- плоская обработка по строкам;
- вертикальное (плунжерное фрезерование).

Строчечную обработку межлопаточных каналов по строкам сфероконической фрезой осуществляется на многокоординатном фрезерном станке (рис. 1.12) [15].

В первом случае заготовка устанавливается на стол станка, после концевым инструментом производится обработка межлопаточных каналов осевого моноколеса с одной стороны (рис. 1.12,а). Затем заготовка переворачивается и происходит удаления материала с другой стороны.



а *б*

Рис. 1.12. Черновое строчечное фрезерование межлопаточного канала:
а – на 3-х координатном станке с двух сторон [7];б – на многоосевом фрезерном станке [34]

При строчечном фрезеровании на многокоординатном станке заготовка устанавливается на поворотном столе станка и после завершения цикла обработки одного межлопаточного пространства производился поворот стола с заготовкой на шаг и цикл обработки повторялся снова.

При плунжерном фрезеровании обработка осуществляется не периферийной, а торцевой частью концевой фрезы (рис. 1.13). Для этого концевой фрезе сообщают вращение и движение подачи в направлении, совпадающем с осью ее вращения, и выполняют рабочие ходы фрезы в пределах назначенных границ области обработки с образованием в заготовке межлопаточных каналов. При данном методе трудоемкость процесса меньше, но выше значение межстрочных гребешков [99].

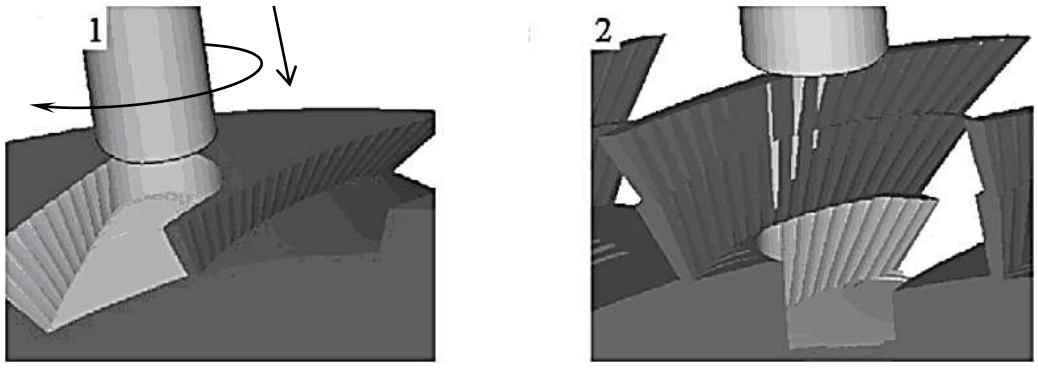


Рис. 1.13 Плунжерное фрезерование межлопаточного канала [99];
1 – межлопаточный канал в начале обработки; 2 – межлопаточный канал в конце обработки

Для придания лопатке необходимой дополнительной жесткости при фрезеровании межлопаточный канал заполняется специальной демпфирующей массой, которая выполняет еще и функции твёрдой СОЖ [1, 47].

Для обеспечения стабильности шероховатости используются различные методы управления перемещением фрезы и способы обработки [1, 32, 109]. Для гибкой корректировки управляющих программ для увеличения точности разработан метод расчета переменной 3D-коррекциии [113].

Для увеличения точности и обеспечения оптимальных режимов резания были исследованы методы определения силы резания при черновой [114] и чистовой [94] обработке межлопаточных каналов моноколеса (рис. 1.14).

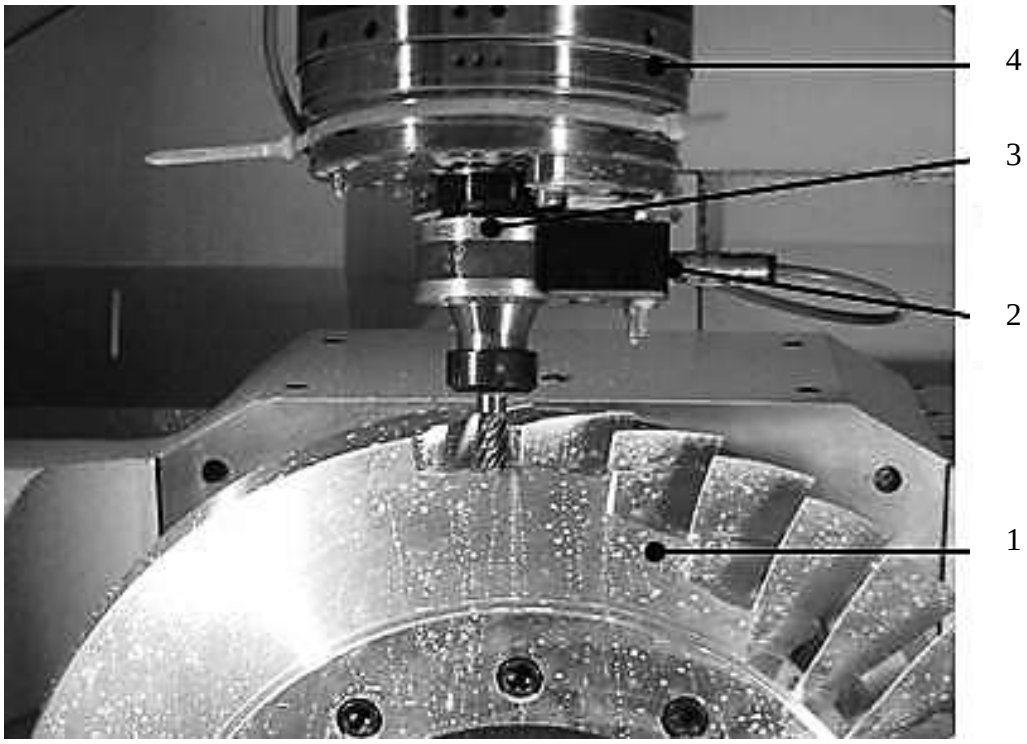


Рис. 1.14 Обработка моноколеса с контролем силы резания [114]:
1 – осевое моноколесо; 2 – датчик; 3 – динамометр 4– шпиндель

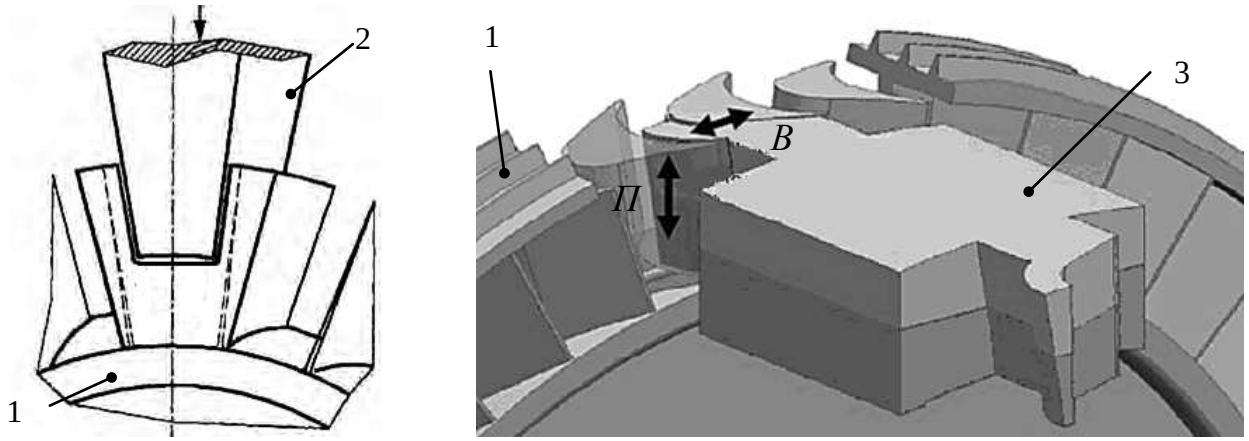
Чистовую обработку лопаток осевого моноколёса производят битангенциальным фрезерованием на пятикоординатном станке сферической или сфероконической фрезой (рис. 1.15). Обработку ведут на сверхвысоких оборотах (до 60.000 об/с) и сверхнизких подачах.



Рис. 1.15 Чистовая обработка межлопаточных каналов сфероконической фрезой:

Кроме того, при чистовой обработке поверхностей межлопаточного канала широко используется электрохимическая обработка [17, 28, 97]. В процессе обработки заготовка ***1*** присоединяется к аноду, а инструмент ***2*** к катоду источника постоянного, либо импульсного тока (рис. 1.16,а). Инструмент ***2*** перемещается от переферии ко дну межлопаточного канала *П*. Перенос заряда в зазоре между катодом и анодом происходит за счет потока электролита, чаще всего, хлорида или нитрата натрия [79]. При этом происходит отделение ионов металла с поверхности заготовки. Материал, удаленный с заготовки, впоследствии отфильтровывается из раствора электролита в виде гидроксида соответствующего металла. Форма инструмента ***1*** задается в зависимости от технологических задач обработки.

Одним из недостатков электрохимического метода обработки является то, что электород-инструмент должен иметь определенную форму межлопаточного канала, поэтому ЭХО не применяют при опытном и единичном производстве [3]. Были рассмотрены [9, 13] возможности использования универсального инструмента ***3*** с управлением траектории его движения при обработке моноколес (рис. 1.16,б).



а б

Рис. 1.16 Электрохимическая обработка:
а – специализированным инструментом [5]; б – универсальным инструментом [108];

Электрохимическое снятие припуска гарантирует получение поверхностей высокого качества [5]. Ввиду отсутствия силового воздействия на деталь при ЭХО в ее поверхностном слое не создаются какие-либо дополнительные напряжения, что позволяет использовать ее на финишном этапе изготовления [101].

Для изготовления моноколес электрохимическим методом обработки необходимо дорогостоящее оборудование [102], а также необходимы эффективные методики расчета формы электрода [100] и траектории его движения [108]. Кроме того, при электрохимической обработке небольшая скорость снятия материала (0,01…0,05 мм/мин [79], поэтому ее не рационально использовать на черновом этапе для удаления большого объема материала из межлопаточного канала осевого моноколеса [115].

Таким образом, анализ современных технологий производства осевых моноколес показал, что более широкое применение получило изготовление моноколес из непрофилированной заготовки [12, 44,78]. При этом отмечается, что главный недостаток данной технологии, является низкая производительность чернового прорезания межлопаточных каналов [45, 76].

1.3. Формообразование поверхностей межлопаточных каналов осевых моноколес кольцевым режущим инструментом

В 2004 году появилась первая информация о теоретической возможности повышения производительности предварительного прорезания межлопаточных каналов осевых монколес по схеме кольцевого фрезерования [67]. Обработка

межлопаточных каналов осевых моноколес кольцевым режущим инструментом напоминает схему нарезания конических колес с круговыми зубьями методом обкатки (рис. 1.17). В процессе обработки режущие зубья резцовой головки воспроизводят поверхность зуба производящего колеса [33]. В процессе обкатки вращающийся инструмент (резцовая головка) перемещается по направлению ко дну впадины зуба и прорезает их поочередно. При этом перемещение происходит вдоль оси инструмента. Резцовая головка имеет два типа резцов: наружные и внутренние, устанавливаемые поочередно. Инструмент выбирается в зависимости от модуля обрабатываемого конического колеса и высоты зуба [37].

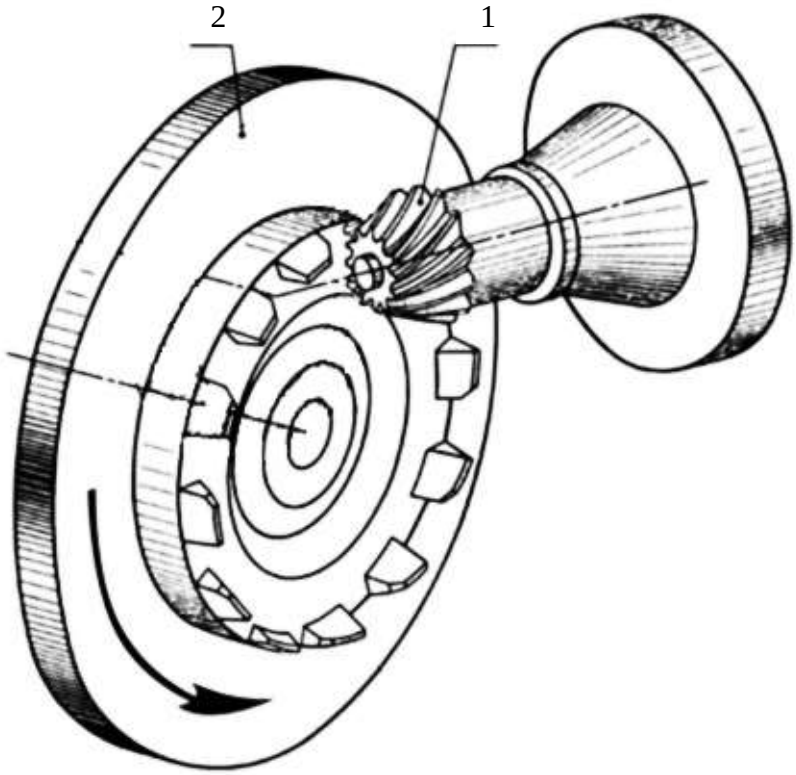


Рис. 1.17 Нарезание конического колеса с круговыми зубьями резцовой головки [33]:
1 – нарезаемое коническое колесо; 2 – резцовая головка

Межлопаточный канал осевых моноколес в грубом приближении похож на круговую впадину конического колеса с круговым зубом. Поэтому обработка кольцевым режущим инструментом производится по схожей схеме [59]: инструмент устанавливается в определенном положении относительно заготовки моноколеса. Обработка производится по всей ширине межлопаточного канала. Для углубления инструмента в межлопаточный канал его перемещают вдоль оси лопатки (по координате *Z*), перемещая при этом по координатам *X* и *Y* с учётом закрутки. Отдельно обрабатывается спинка, отдельно корыто. После обработки

одного межлопаточного канала, осуществляют поворот моноколеса на $360^{o}/n$, где n – число лопаток моноколеса, и производят обработку следующего межлопаточного канала (рис. 1.18).

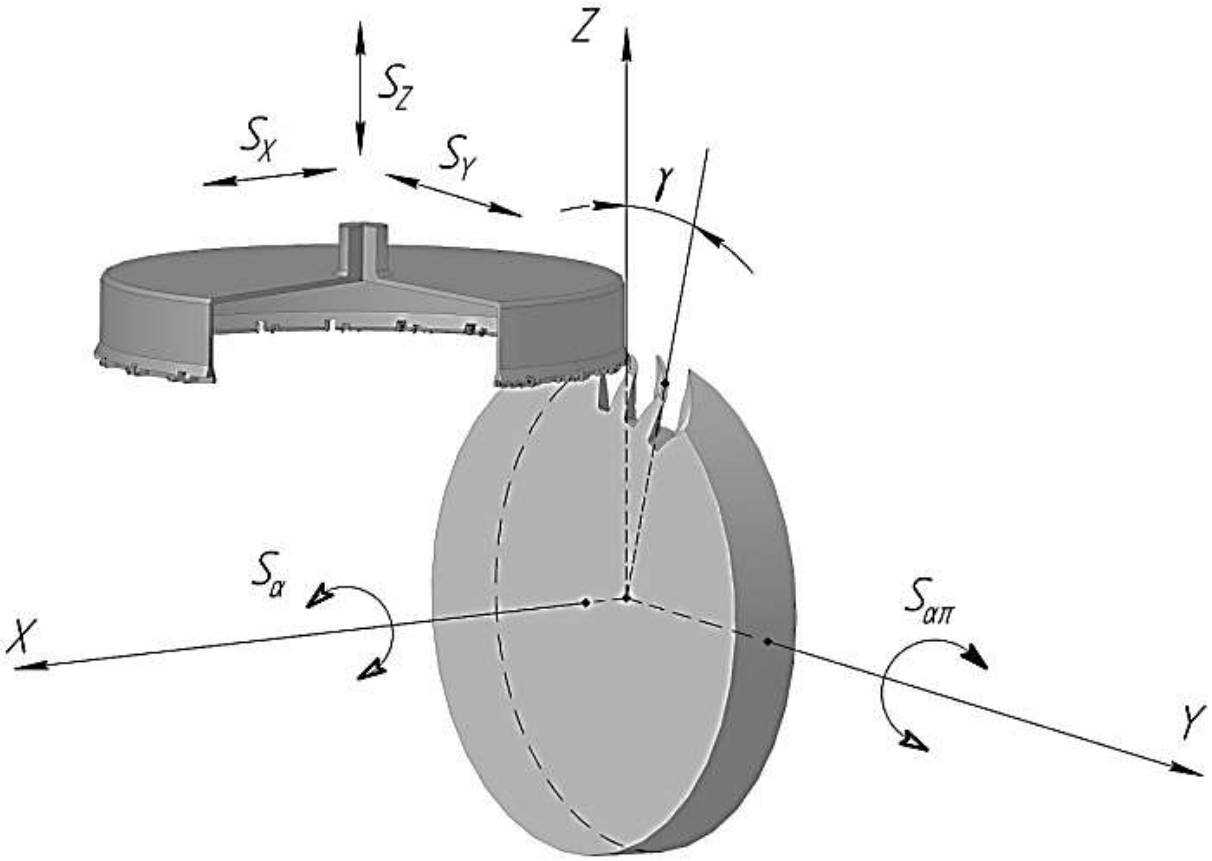


Рис. 1.18 Схема обработки межлопаточных каналов осевых моноколес кольцевым режущим инструментом [59].

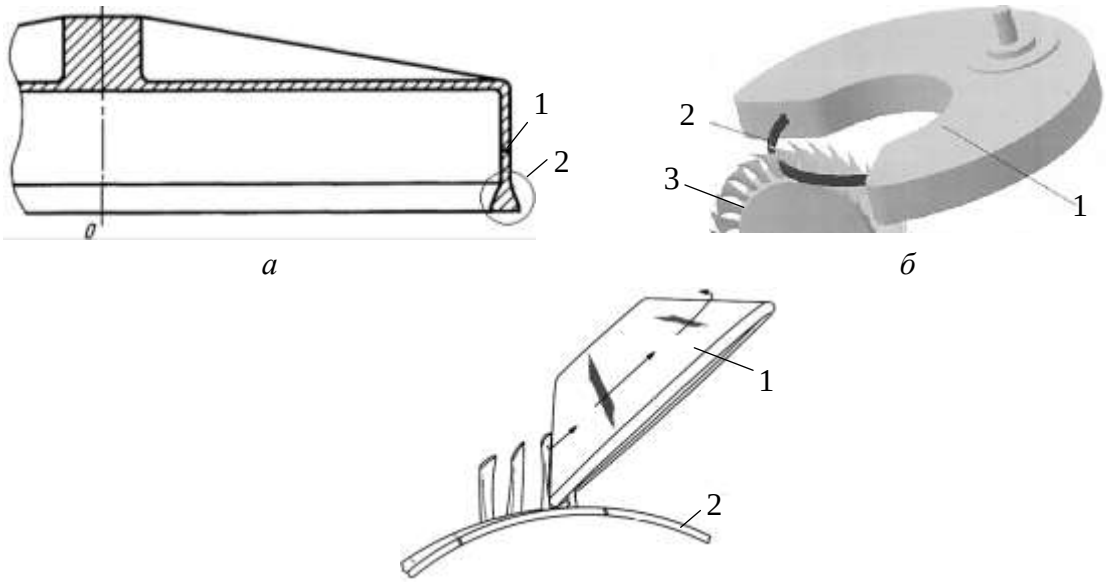
Под кольцевым режущим инструментом понимается инструмент выполненный в виде тела вращения с наличием внутренней полости. На наружной, внутренней и торцевой части этого инструмента располагаются режущие кромки.

Метод обработки межлопаточных каналов осевых моноколес кольцевым режущим инструментом запатентован как в России [68] так и за рубежом [70]. Кольцевой инструмент предназначен для обработки межлопаточных каналов сложного профиля с большой закруткой пера, больших размеров и большой кривизной поперечных сечений лопаток моноколеса. При этом, используя кольцевой инструмент можно провести обработку межлопаточного канала осевого с большей производительностью.

Возможность обработки поверхностей спинки и корыта, кривизна которых изменяется и по высоте пера и от входной кромки к выходной обеспечивается

ориентацией оси кольцевого инструмента вокруг хорды обрабатываемого профиля при обработке периферийных профилей и вокруг нормали к хорде при обработке корневых профилей [59].

В результатах исследований [55, 57, 59] были предложены и запатентованы различные варианты конструкции кольцевого инструмента (рис. 1.19).



а *б* *в*

Рис. 1.19 Варианты конструкций кольцевого инструмента
а) кольцевая фреза [68]: 1– корпус фрезы; 2 – режущий элемент
в) кольцевая пила[69]: 1– корпус фрезы; 2 – режущий элемент; 3 – моноколесо
б) чашечный алмазный круг[73]: 1 – алмазный круг; 2 – моноколесо

В ряде работ [55,58] были сделаны попытки расчета геометрических параметров кольцевого режущего инструмента (рис. 1.20).

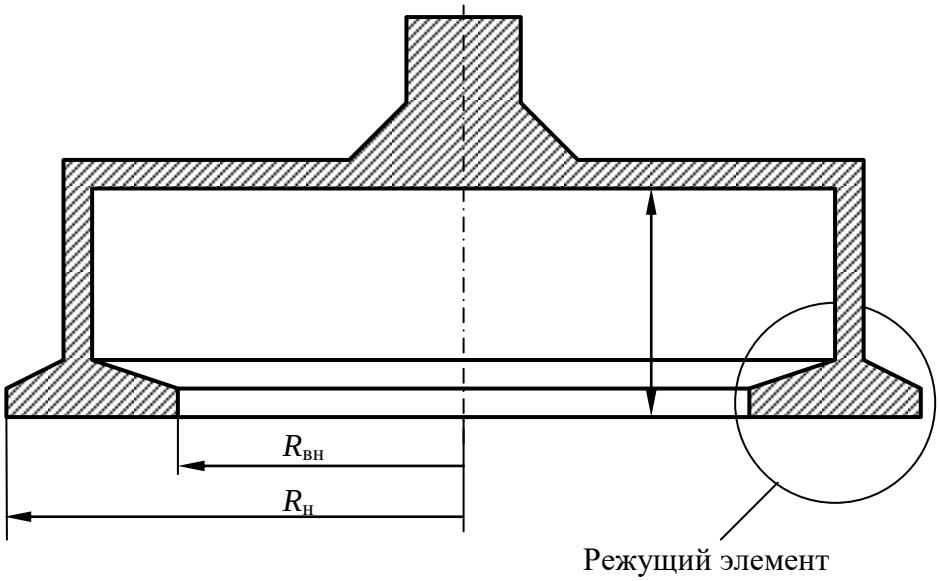


Рис. 1.20. Основные геометрические параметры кольцевого инструмента

Радиус наружной части режущего элемента кольцевого инструмента $R_н$ было предложено определять по максимальному радиусу окружностей (r_j), проведенных через *u*-ю, *k*-ю и *l*-ю точки каждого *j*-го профильного сечения лопатки [58].

$$R_н = \max(r_j); \quad j = 1,..., n, \tag{1.1}$$

где r_j – радиус окружности, проведенной через первую действительную точку корыта *u*, точку корыта с максимальной кривизной *k* и точку перегиба *l*, *j*-го профильного сечения лопатки.

Значение радиуса внутренней части режущего элемента кольцевого инструмента $R_{вн}$ предложено выбирать таким образом, чтобы ширина режущей части не превосходила наименьшей ширины межлопаточного канала.

Высоту внутренней полости *B* было предложено выбирать таким образом, чтобы она не была меньше высоты лопатки *h*. Однако при этом в зависимостях не рассматривалась возможность зареза необрабатываемых поверхностей заготовки внутренней части режущей кромки кольцевого инструмента.

Для обработки межлопаточных каналов осевых моноколес предлагалось два варианта траектории движения кольцевого инструмента [56]. Первый вариант [71] основан на схеме плунжерного фрезерования (рис. 1.21). При плунжерной обработке кольцевой режущий инструмент перемещается от корневой части *1* до концевой части *2* межлопаточного канала. Траектория перемещения режущего элемента *3* проходит вдоль межлопаточного канала.

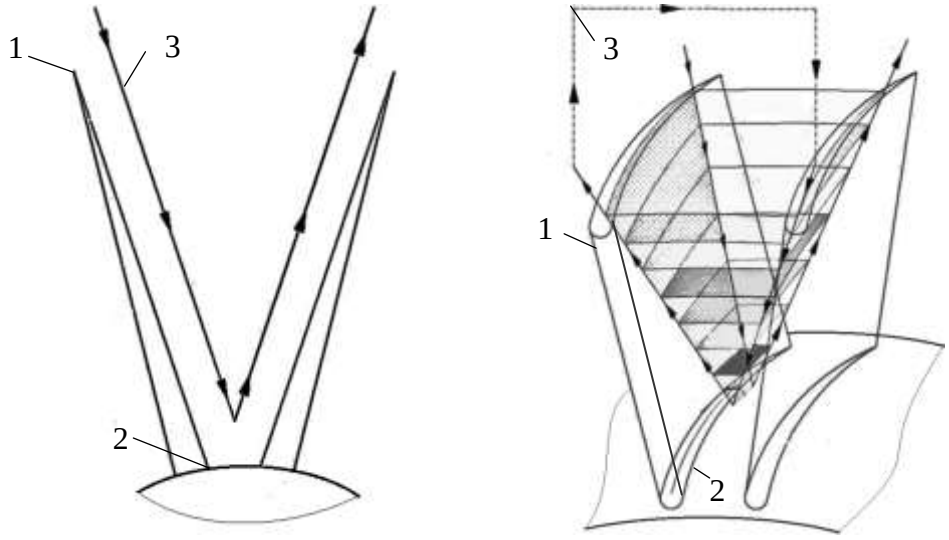


Рис. 1.21 Вариант движения инструмента при плунжерной обработке [71]:
1 – концевая часть межлопаточного канала; 2 – корневая часть межлопаточного канала;
3 – траектория перемещения режущего элемента

Второй вариант [67] обработки основан на схеме фрезерования по строкам (рис. 1.22). Кольцевой режущий инструмент при обработке поверхности межлопаточного канала перемещается построчно от входной кромки межлопаточного канала *1* к выходной *2* и наоборот. Траектория перемещения режущего элемента *3* проходит параллельно оси вращения осевого моноколеса.

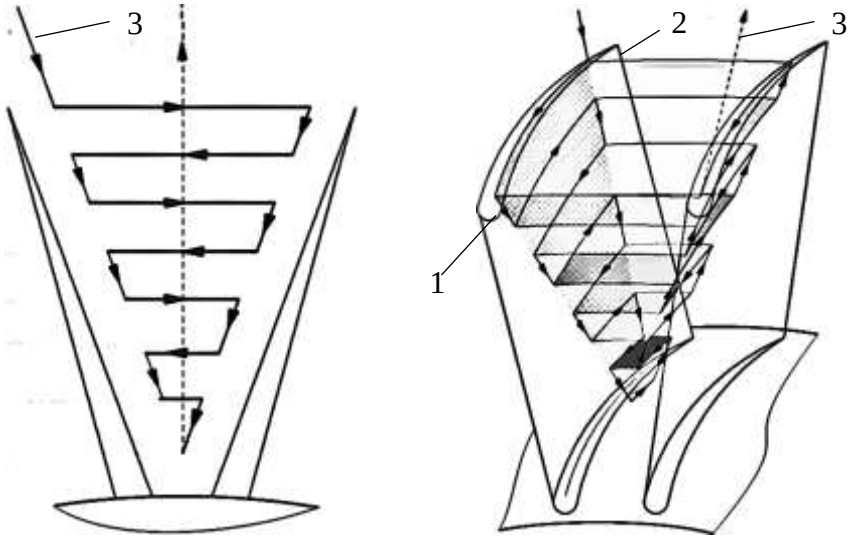


Рис. 1.22 Вариант движения инструмента при плунжерной обработке [58]:
1 – входная кромка; 2 – выходная кромка; 3 – траектория перемещения режущего элемента

В ряде работ [58,80] были сделаны попытки расчета траектории движения кольцевого режущего инструмента при обработке межлопаточного канала.

По результатам имитационных исследований [57] была отмечена значительная погрешность формообразования δ, возникающая в межлопаточных каналах из-за несоответствия формы профильных сечений спинки и корыта пера лопаток и внутренней и наружной образующих кольцевого режущего инструмента, являющихся дугами окружностей (рис. 1.24).

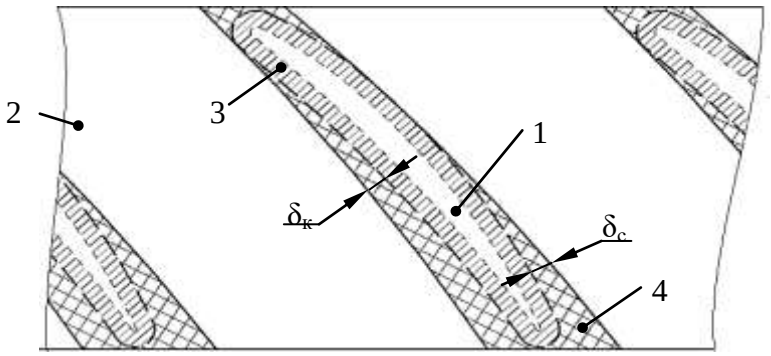


Рис. 1.23 Погрешность формообразования межлопаточных каналов кольцевым инструментом [57]:
1 – теоретический профиль пера лопатки; 2 – удаленный объем материала межлопаточного канала; 3 – слой припуска; 4 – слой металла, образованный из-за погрешности формообразования

Так как межлопаточный канал осевого моноколеса представляет собой сочетание большого количества выпуклых и вогнутых поверхностей двойной переменной кривизны значение погрешности формообразования δ изменяется как от входной кромки к выходной, так и от корневого сечения к концевому.

Еще отмечена невозможность обработки кольцевым инструментом профилей входной и выходной кромок.

1.4. Выводы. Цель работы и задачи исследований

Анализ технологии производства моноколес осевых компрессоров и турбин показывает, что для существующих технологических процессов предварительного прорезания межлопаточных каналов из монолитной непрофилированной заготовки характерны низкие технико-экономические показатели: высокая трудоемкость и себестоимость обработки.

В настоящее время созданы предпосылки для решения проблемы создания высокопроизводительного технологического процесса предварительного прорезания межлопаточных каналов моноколес осевых компрессоров и турбин:

– создана теория высокопроизводительного прорезания межлопаточных каналов моноколес режущим инструментом в виде тела вращения, который имеет внутренние, наружные и торцевые режущие кромки;

– созданы и освоены методы обработки режущим инструментом в виде тела вращения, который имеет внутренние, наружные и торцевые режущие кромки для обработки конических зубчатых колес с круговым зубом;

– в механосборочном производстве созданы и освоены методы и средства для многокоординатной обработки комплекса поверхностей межлопаточного канала, включая поверхности спинки и корыта, входные и выходные кромки, поверхность втулки (дно межлопаточного канала), радиуса сопряжения спинки и корыта со втулкой режущим инструментом в виде тела вращения, который имеет наружные и торцевые режущие кромки.

Вместе с тем следует отметить трудности реализации этих предпосылок. Можно выделить следующие трудности применения кольцевого режущего инструмента для обработки межлопаточного канала:

– комплекс трактовых поверхностей осевого моноколеса представляет собой сочетание большого количества выпуклых и вогнутых поверхностей двойной переменной кривизны, таких как спинка и корыто пера лопатки, входные и выходные кромки поверхность втулки, радиуса сопряжения спинки и корыта со втулкой;

– разнообразие конструктивных исполнений осевых моноколес (активные и реактивные схемы решетки, различные наружные и внутренние диаметры, относительная высота пера, количество лопаток веерность и др.);\

– имеются ограничения в технологических возможностях применения кольцевого инструмента для обработки межлопаточных каналов осевых моноколес (невозможность обработки кромок, антивибрационных и бандажных полок и др.);

– отсутствие теоретических зависимостей и методик расчета основных размеров кольцевого инструмент с учетом комплекса геометрических параметров трактовых поверхностей межлопаточного канала;

– отсутствие теоретических зависимостей и методик расчета траектории перемещения кольцевого инструмента при многокоординатной обработке комплекса поверхностей межлопаточного канала, включая поверхности спинки и корыта, входные и выходные кромки, поверхность втулки (дно межлопаточного канала), радиуса сопряжения спинки и корыта со втулкой режущим инструментом в виде тела вращения, который имеет наружные и торцевые режущие кромки.

В соответствии с вышеизложенным целью данной работы является **повышение производительности изготовления осевых моноколес из непрофилированных заготовок.**

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

1. Определить зависимости конфигурации и размеров кольцевого режущего инструмента от комплекса параметров трактовых поверхностей моноколес осевых компрессоров и турбин.

2. Определить применимость кольцевого режущего инструмента для формообразовании межлопаточных каналов моноколес с применяемыми в авиадвигателестроении лопаточными решетками

3. Разработать кинематические схемы и математические модели

многокоординатного формообразования межлопаточных каналов кольцевым инструментом.

4. С использованием численного эксперимента определить влияние количества управляемых координат на погрешность формообразования межлопаточных каналов кольцевым инструментом.

5. Экспериментально опробовать различные по количеству управляемых координат схем мнгокоординатного формообразования и сравнить их по погрешности и производительности с учетом результатов численного и натурного экспериментов.

6. Разработать практические рекомендации по применению кольцевого инструмента для формообразования межлопаточных каналов моноколес и определения предпочтительной по технико-экономическим показателям количество управляемых координат.

ГЛАВА 2
ВЗАИМОСВЯЗЬ КОНФИГУРАЦИИ И РАЗМЕРА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОМПЛЕКСА ТРАКТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕЖЛОПАТОЧНЫХ КАНАЛОВ ОСЕВОГО МОНОКОЛЕСА

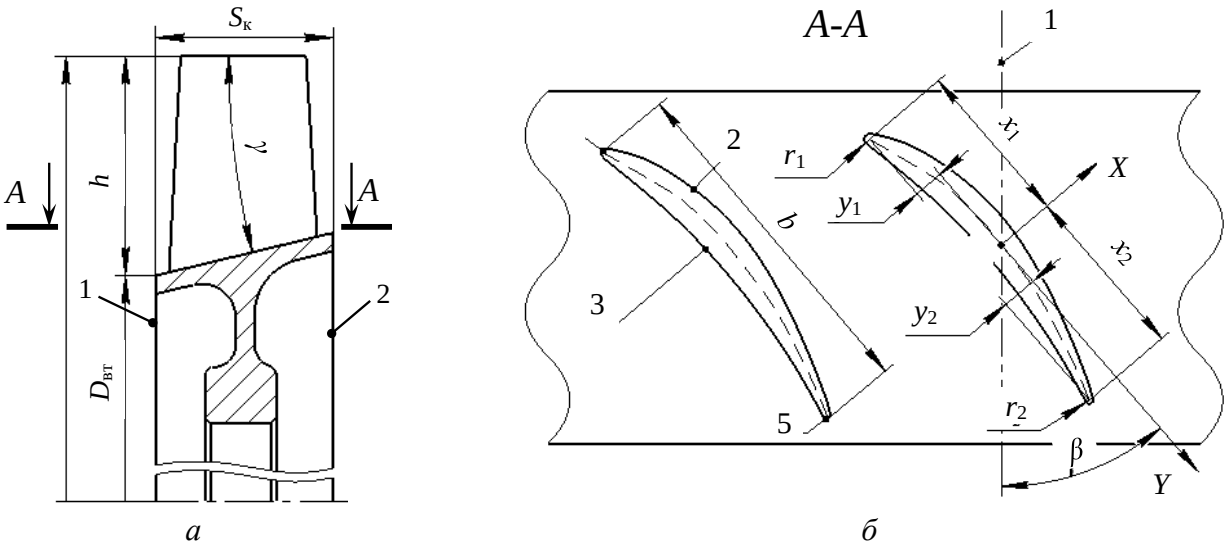
2.1 Взаимосвязанные геометрические параметры моноколес и кольцевого режущего инструмента

Применяемые в настоящее время в отечественных ГТД моноколеса, несмотря на относительно небольшую номенклатуру, значительно отличаются конструктивным исполнением [17]. Наружный диаметр монолитных колес лежит в диапазоне 170...700 мм, ширина составляет 25...175 мм. Число лопаток, даже на колесах примерно одного диаметра, может быть различным. Это сказывается на размерах межлопаточных каналов и влияет на размеры режущего инструмента. Высота лопаток, от которой также зависят параметры кольцевого режущего инструмента, лежит в диапазоне 10...200 мм. Форма пера является результатом сложного баланса между аэродинамическими и прочностными характеристиками, а также производственными требованиями [27]. Согласно ГОСТ 23851-79, ГОСТ 23537-79, ОСТ 1 02571-86 и атласу профилей решеток осевых турбин [33] можно выделить основные геометрические параметры моноколеса в меридиональном сечении (рис. 2.1а) и комплекс параметров профиля лопатки (рис. 2.1,б).

В меридиональном сечении выделяют такие параметры как: $D_к$ – наружный диаметр колеса моноколеса осевой ступени в его входном сечении ***1***, мм; $D_{вт}$ – диаметр втулки моноколеса в его входном сечении ***1***, мм; h – высота пера лопатки моноколеса в его входном сечении; γ – угол сужения (расширения) между внутренней и периферийной граничными линиями проточной части лопаточного венца; $S_к$ – ширина моноколеса.

Как уже было сказано в первой главе поверхность пера лопатки осевого моноколеса описывают совокупностью заданных сечений профилей через координаты массива точек спинки [$x_с$; $y_с$] и корыта [$x_к$; $y_к$], а также центр скругления входной [x_1; y_1] и выходной кромки [x_2; y_2] относительно системы координат теоретического профиля XOY, которая повернута на угол β

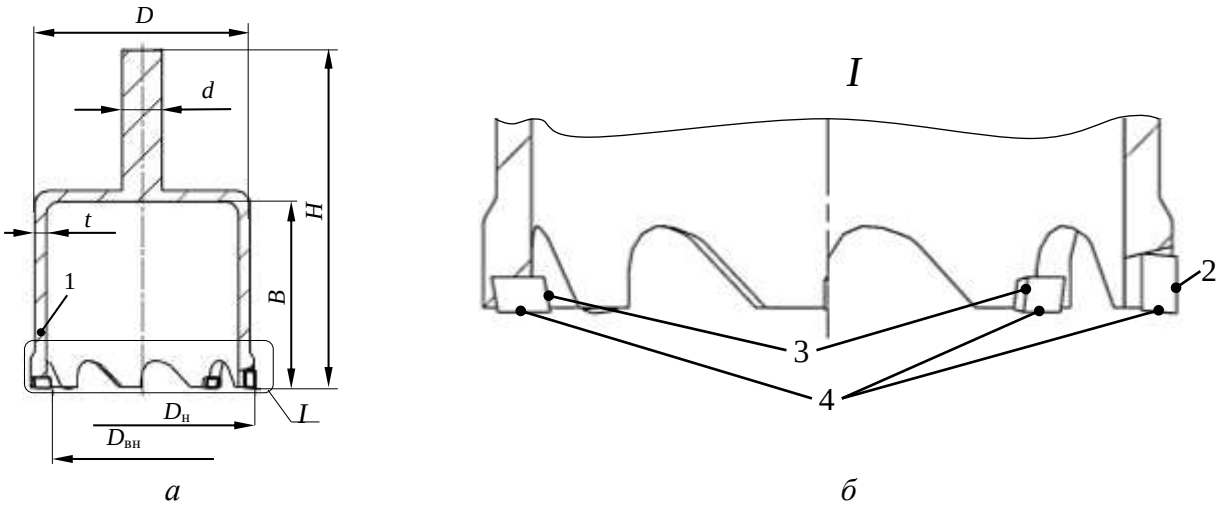
относительно оси вращения. Также необходимо учитывать длину хорды *b* при описании относительных параметров [3].



а *б*

Рис.2.1. Основные геометрические параметры моноколеса осевой ступени
а) в меридиональном сечении: 1 – входное сечение; 2 – выходное сечение
б) в сечении А-А: 1 – ось вращения моноколеса; 2 и 3 – профили спинки и корыта пера лопатки; 4 и 5 – входная и выходная кромка соответственно; *XOY* – система координат профиля

Известны несколько вариантов конструкций кольцевого режущего инструмента (см. рис. 1.20), но все они имеют много общего в конструктивных элементах. Кольцевой режущий инструмент в общем случае имеет корпус ***1*** в виде тела вращения с наличием внутренней полости (рис. 2.2). В торцевой части корпуса инструмента расположены режущие элементы, которые образуют режущие кромки на наружной части ***2***, внутренней части ***3*** и торцевой части ***4*** инструмента. К основным геометрическим параметрам кольцевого режущего инструмента относят: размеры режущей части инструмента ($D_{вн,}$ и $D_н$); размеры режущего элемента, число режущих элементов и прочие конструктивные параметры: (*t*, *B*, *H*, *d*, *D*).



а *б*

Рис. 2.2 Основные геометрические параметры кольцевого инструмента:

а) кольцевой режущий инструмент; б) режущие элементы
1 – корпус кольцевого инструмента; 2 – наружная часть режущей кромки;
3 – внутренняя часть режущей кромки; 4 – торцевая часть режущей кромки

Часть вышеприведенных параметров можно определить из справочных данных. Например, при конструировании фрез с остроконечными зубьями, при определении диаметра хвостовика *d* можно пользоваться следующими ориентировочными данными (Таблица 2.1).

Таблица 2.1

Справочные данные по выбору диаметра хвостовика инструмента

Диаметр хвостовика, мм	16	19	22	27	32	40	50	60	60 с выточками
Диаметр фрезы, мм	40	50	63	63	80-100	100-125	125-160	160-200	250-630

Форму и размеры режущих элементов выбирают исходя из условий резания [63]. Число режущих элементов зависит от их формы и размеров, диаметра инструмента, характера обработки. Число зубьев для фрез с остроконечными зубьями всегда выбирается четным для возможности облегчения измерения по диаметру. Число зубьев кольцевого инструмента можно определить, например, по следующему выражению:

$$z = m \cdot \sqrt{D} \qquad (2.1)$$

где m – коэффициент, зависящий от типа режущего инструмента. Для сборных цилиндрических фрез значение коэффициента m равно 0,9.

Толщину корпуса t кольцевой фрезы определяют из конструктивных соображений, по результатам расчетов на прочность и виброустойчивость.

Остальные основные параметры кольцевого режущего инструмента, такие как размеры режущей части ($D_{вн}$ и $D_{н}$) и глубина внутренней полости B корпуса инструмента необходимо найти с учетом комплекса геометрических параметров моноколеса осевой ступени.

2.2 Определение основных геометрических параметров кольцевого режущего инструмента

При выборе размеров кольцевого режущего инструмента необходимо учитывать особенности конструкции моноколеса осевой ступени и его размеры, которые ограничивают технологические возможности использования кольцевого режущего инструмента. Условно можно выделить три ограничения:

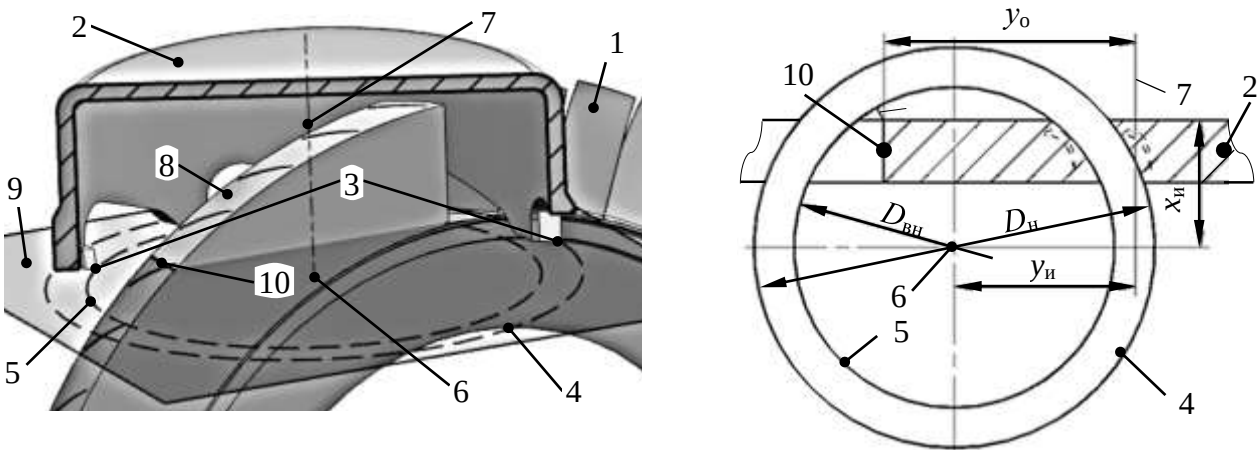
- ограничение по диаметральному размеру режущей части кольцевого инструмента;
- ограничение по ширине режущей части кольцевого инструмента;
- ограничение по высоте внутренней полости корпуса кольцевого инструмента.

Учитывая данные ограничения можно определить необходимые геометрические параметры кольцевого режущего инструмента.

2.2.1 Определение допустимого диаметра кольцевого режущего инструмента

При прорезке канала моноколеса съем материала должен происходить только в межлопаточном пространстве, и инструмент не должен соприкасаться с другими элементами заготовки и технологической оснастки (рис. 2.3). Для этого в процессе обработки должен саблюдаться гарантированный зазор δ между внутренней частью режущей кромки кольцевого режущего инструмента и наружной цилиндрической поверхностью моноколеса осевой ступени.

Рассмотрим взаимное положение моноколеса ***1*** и кольцевого режущего инструмента ***2*** при прорезании межлопаточного канала (рис. 2.3). Режущие кромки *3* в процессе обработки перемещаются по окружностям диаметром $D_{н}$ (***4***) и $D_{вн}$ (***5***). Центр данных окружностей ***6*** должен находится на расстоянии $y_{и}$ от оси вращения ***7*** обрабатываемого моноколеса осевой ступени и $x_{и}$ от фронтальной поверхности моноколеса. При пересечении наружной цилиндрической поверхности заготовки ***8*** и плоскости резания ***9***, проходящей через режущие кромки в торцевой части, образуется кривая ***10***. Минимальное расстояние от кривой ***8*** до внутренней части режущей кромки ***7*** кольцевого инструмента равно гарантированному зазору δ.



а *б*

Рис. 2.3 Положение кольцевого режущего инструмента при обработке осевого моноколеса: 1 – заготовка; 2 – кольцевой инструмент; 3 – режущие кромки инструмента; 4 – наружная часть режущей кромки; 5 – внутренняя часть режущей кромки; 6 – центр кольцевого инструмента; 7 – ось вращения инструмента; 8 – наружная цилиндрическая поверхность заготовки; 9 – плоскость резания; 10 – кривая пересечения

В итоге согласно взаимному положению моноколеса и кольцевого режущего инструмента (рис. 2.4), гарантированный зазор δ, который должен быть больше нуля, можно определить следующим выражением:

$$\delta = \frac{D_{вн}}{2} - \sqrt{x_и^2 + (y_o - y_и)^2} \geq 0, \qquad (2.1)$$

где $x_и$ – расстояние от оси вращения инструмента до фронтальной поверхности моноколеса в плоскости резания; $y_и$ – расстояние от центра инструмента до оси вращения моноколеса; y_o – расстояние от оси вращения моноколеса до наружной цилиндрической поверхности моноколеса в плоскости резания.

Пространственное положение кольцевого режущего инструмента относительно обрабатываемого моноколеса при обработке зависит от множества факторов (размеры режущей части, геометрические параметры профиля моноколеса и решетки, возможности обрабатываемого оборудования и др.). При определении расстояний $x_и$, $y_и$ и y_o невозможно учесть все эти факторы, поэтому сделаем следующие допущения (рис. 2.4):

1) считаем, что режущая часть проходит через точки пересечения средней линии профиля пера с профилями входной и выходной кромками, так как в большинстве случаев при обработке корыта наружная режущая часть кольцевого инструмента проходит через первую действительную точку корыта

(входная кромка) и последнюю действительную точку корыта (выходная кромка) [71].

2) Средняя точка хорды лежит на оси вращения моноколеса в плоскости резания, так как согласно ОСТ 1 02630-87 [66] при оформлении конструкторской документации профиль пера лопатки располагают симметрично относительно оси вращения колеса.

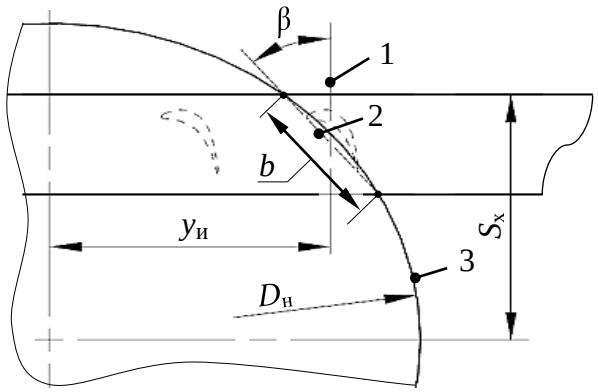


Рис. 2.4 Положение кольцевого режущего инструмента при принятых допущениях: 1 – ось вращения моноколеса; 2 – хорда профиля пера; 3 – окружность, по которой перемещается наружная режущая кромки

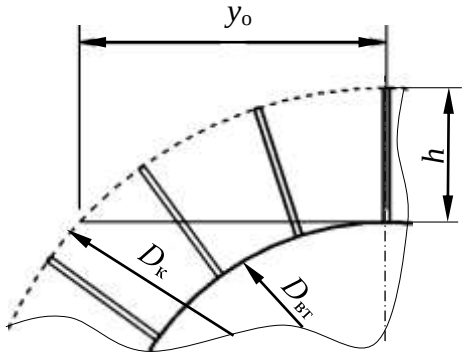


Рис. 2.5 Расстояние от оси вращения моноколеса до наружной цилиндрической поверхности моноколеса в плоскости резания $y_о$

Максимальное возможное значение расстояния $y_о$ в корневом сечении межлопаточного канала можно определить по следующей формуле:

$$y_о = \sqrt{\frac{D_к^2}{4} - \frac{\left(D_к - 2 \cdot h\right)^2}{4}} \qquad (2.3)$$

Выражения (2.2) и (2.3) подставляем в неравенство (2.1):

$$D_{вн} - \sqrt{\left(b\cos(\beta) + \sin(\beta)\sqrt{D_н^2 - b^2}\right)^2 + \left(2\sqrt{D_к h - h^2} - \cos(\beta)\sqrt{D_н^2 - b^2}\right)^2} \geq 0. \qquad (2.4)$$

Пренебрегаем значением ширины режущей части ($D_{вн}$ = $D_н$), так как диаметральный размер режущей части на порядок больше ширины режущей части. После упрощения неравенства (2.4) получаем:

$$D_{\text{н}} \geq \frac{\sqrt{4b^2\cos^2(\beta)\left(2\sqrt{D_{\text{к}}h-h^2}-b\sin(\beta)\right)^2+\left(4D_{\text{к}}h-4h^2-b^2\sin^2(\beta)\right)^2}}{2\cos(\beta)\left(2\sqrt{D_{\text{к}}h-h^2}-b\cdot\sin(\beta)\right)}. \qquad (2.5)$$

Использовав общепринятые параметры "относительная высота пера лопатки $\bar{h}=h/b$" и "веерность моноколеса $\theta=D_{\text{к}}/h$", ограничение по размеру режущей части выражение (2.5) можно записать как:

$$D_{\text{н}} \geq D_{\text{к}} \cdot \frac{\sqrt{\sin^2(\beta_{\text{т}})+\left(\bar{h}\sqrt{\theta+1}+0{,}5\cdot\text{tg}(\beta_{\text{т}})\sin(\beta_{\text{т}})\right)^2}}{\bar{h}\theta\cos(\beta_{\text{т}})} = D_{\text{к}}\overline{K}_D. \qquad (2.6)$$

В итоге ограничение по диаметру режущей части кольцевого инструмента сводится к тому, что допустимый диаметр должен быть в $\overline{K}_D$ раз больше диаметра моноколеса. Определим характер изменения коэффициента $\overline{K}_D$ в зависимости от угла установки теоретического профиля β (рис. 2.6).

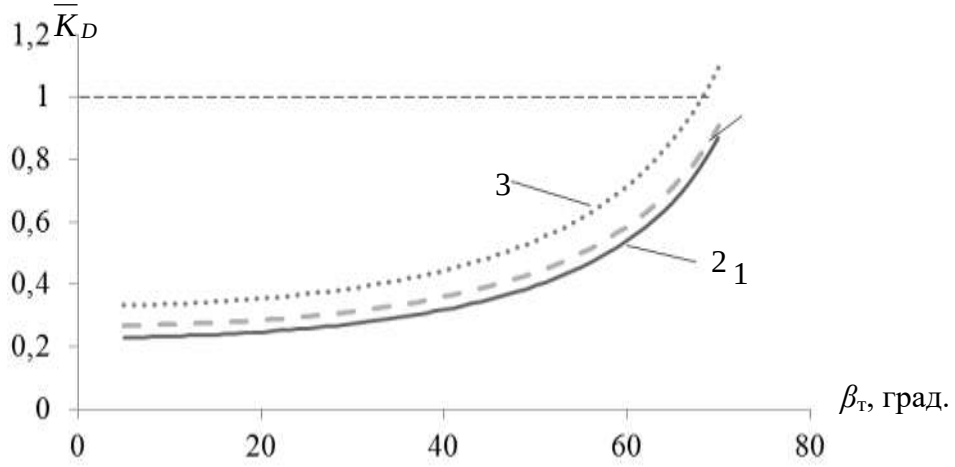


Рис. 2.6 График изменения коэффициента $\overline{K}_D$:
1 – $\theta=20{,}0$ и $\bar{h}=1{,}0$; 2 – $\theta=15{,}0$ и $\bar{h}=2{,}0$; 3 – $\theta=10{,}0$ и $\bar{h}=3{,}0$;

Как видно из графика (рис. 2.6), при больших углах установки теоретического профиля β диаметр кольцевого режущего инструмента равен диаметру колеса. И в итоге возможный размер варьируется от 30 до 800 мм.

Значение максимально возможного диаметра кольцевого режущего инструмента при обработке осевого моноколеса зависит от габаритов и возможностей станка, а также ширины режущей части.

2.2.2 Определение ширины режущей части кольцевого режущего инструмента

При выборе размеров кольцевого инструмента необходимо учитывать, параметр δR_{max} (максимально допустимая ширина режущей части), при превышении которого происходит зарез режущей частью инструмента спинки, корыта или кромок межлопаточного канала. Значение параметра зависит от типа решетки и ее размеров, а также от положения кольцевого инструмента и его можно определить как:

$$\delta R_{max} = \frac{D_н}{2} - \left|\overrightarrow{OC}\right|, \tag{2.7}$$

где $\left|\overrightarrow{OC}\right|$ – длина вектора $\overrightarrow{OC}$; в котором $\vec{O}$ – вектор-точка центра кольцевого режущего инструмента в плоскости резания, а $\vec{C}$ – вектор-точка касания внутренней кромки режущей части и спинки межлопаточного канала.

Максимально допустимую ширину δR_{max} целесообразно определить в корневой части межлопаточного канала, так как положение режущей части ограничено поверхностями спинки, корыта и дна канала (рис. 2.7). При этом ось вращения перпендикулярна сечению решетки в корневой части.

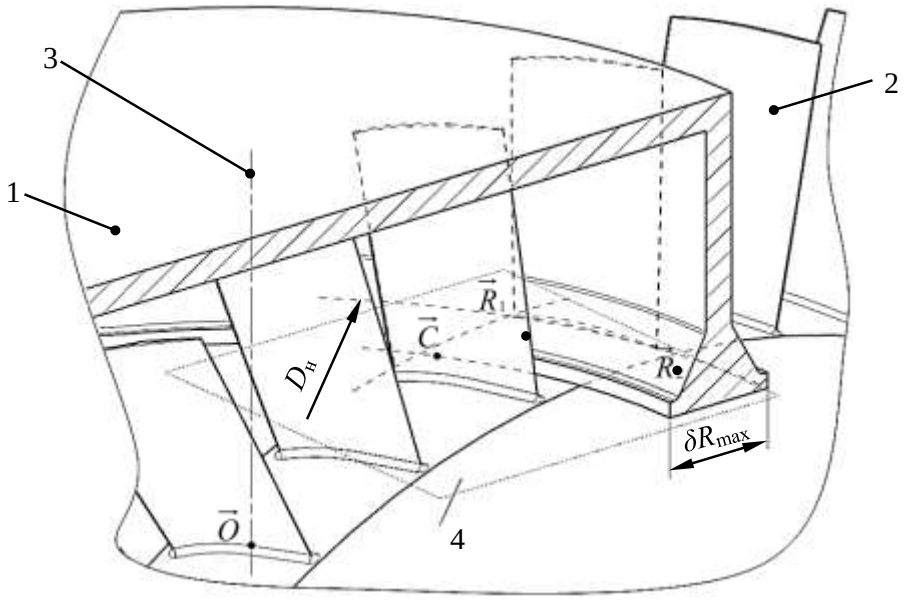


Рис. 2.7 Положение кольцевого инструмента при обработке канала в корневом сечении: 1 – кольцевой инструмент; 2 – моноколесо; 3 – ось вращения инструмента; 4 – плоскость резания

Координаты вектор-точки центра кольцевого режущего инструмента $\vec{O}$ определяются из условия, что наружная кромка режущей части инструмента касается входной и выходной кромок:

$$\begin{cases} \left|\overrightarrow{OR_1}\right| = \dfrac{D_{\text{н}}}{2}; \\ \left|\overrightarrow{OR_2}\right| = \dfrac{D_{\text{н}}}{2}; \end{cases} \tag{2.8}$$

где $\overrightarrow{R_1}$ и $\overrightarrow{R_2}$ – вектор-точки центра скругления входной и выходной кромок лопатки соответственно.

При решении системы уравнений (2.8) можно определить координаты центра инструмента $x_{\text{о}}$, $y_{\text{о}}$ в корневом сечении:

$$\begin{aligned} x_{\text{о}} &= \frac{\delta y^2 \sigma x - \delta y \sqrt{\left(\delta x^2 + \delta y^2 + r_1^{\,2} + r_2^{\,2}\right)^2 - 2\left(\delta x^4 + \delta y^4 + r_1^{\,4} + r_1^{\,4}\right)} - \delta x\left(r_1^{\,2} - r_2^{\,2} - \delta x \cdot \sigma x\right)}{2\left(\delta x^2 + \delta y^2\right)}; \\ y_{\text{о}} &= \frac{\delta x^2 \sigma y + \delta x \sqrt{\left(\delta x^2 + \delta y^2 + r_1^{\,2} + r_2^{\,2}\right)^2 - 2\left(\delta x^4 + \delta y^4 + r_1^{\,4} + r_1^{\,4}\right)} - \delta y\left(r_1^{\,2} - r_2^{\,2} - \delta y \cdot \sigma y\right)}{2\left(\delta x^2 + \delta y^2\right)}, \end{aligned} \tag{2.9}$$

где $\delta x = X_1 - X_2$; $\delta y = Y_1 - Y_2$; $\sigma x = x_1 + x_2$; $\sigma y = Y_1 + Y_2$; $r_1 = \dfrac{D_{\text{н}}}{2} + R_1$; $r_2 = \dfrac{D_{\text{н}}}{2} + R_2$.

Для определения точки касания внутренней режущей части инструмента и спинки межлопаточного канала необходимо параметрическое представление спинки.

Согласно ОСТ [66] в чертеже задаются координаты точек профиля лопатки $[x_i, y_i]$. Сделаем допущение, что в корневом сечении профиль второй лопатки идентичен первой и смещен на шаг t равный:

$$t = \frac{D_{\text{к}}}{2} \sin\left(\frac{360}{N}\right), \tag{2.10}$$

где N – количество лопаток моноколеса.

Тогда кривую спинки в корневом сечении можно представить в виде кривой Безье [45]:

$$P_c(p)=\begin{pmatrix} X_c(p) \\ Y_c(p) \\ p \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} \sum_{i=0}^{n}\frac{(x_i+t\cdot\sin(\beta))n!}{i!(n-i)!}p^i(1-p)^{n-i} \\ \sum_{i=0}^{n}\frac{(y_i-t\cdot\cos(\beta))n!}{i!(n-i)!}p^i(1-p)^{n-i} \\ 0\le p\le 1 \end{pmatrix}, \quad (2.11)$$

где n – количество заданных точек профиля в чертеже, p – параметр.

Точка касания C располагается на спинке в корневом сечении, при этом вектор $\overrightarrow{OC}$ направлен по нормали к поверхности спинки, тогда длина вектора $\overrightarrow{OC}$ в корневом сечении:

$$\left|\overrightarrow{OC}\right|=\sqrt{\left(X_c(p_c)-x_o\right)^2+\left(Y_c(p_c)-y_o\right)^2}, \quad (2.12)$$

где $X_c(p)$ и $Y_c(p)$ – параметрическое представление корыта в корневом сечении, а значение параметра p_c – можно определить из следующего равенства [54]:

$$\frac{Y_c(p_c)-y_o}{X_c(p_c)-x_o}=\frac{dX_c(p_c)}{dp}\cdot\frac{dp}{dY_c(p_c)}. \quad (2.13)$$

Решив систему уравнений (2.8) – (2.13), можно определить максимальное значение ширины режущей кромки δR_{max} для определенного моноколеса и режущего инструмента. Однако данная методика расчета δR_{max} дает лишь численный результат и не обеспечивает возможность оценки использования технологии формообразования межлопаточных каналов моноколеса ГТД кольцевым режущим инструментом.

Для упрощения математической модели сделаем следующие допущения:

1) значение радиусов входной и выходной кромок пера на порядок меньше остальных геометрических параметров профиля пера лопатки, поэтому ими можно пренебречь ($r_1 = r_2 = 0$). В итоге наружная часть режущей кромки проходит через центры скругления кромок пера лопатки O_1 и O_2. Расстояние между O_1 и O_2 равно длине хорды b (рис. 2.8).

2) Спинка представляет собой дугу окружности проходящей через три точки O_1, O_2 и среднюю точку S профиля спинки с координатами [x_j; y_j], где $j = n/2$ (см. рис. 2.8).

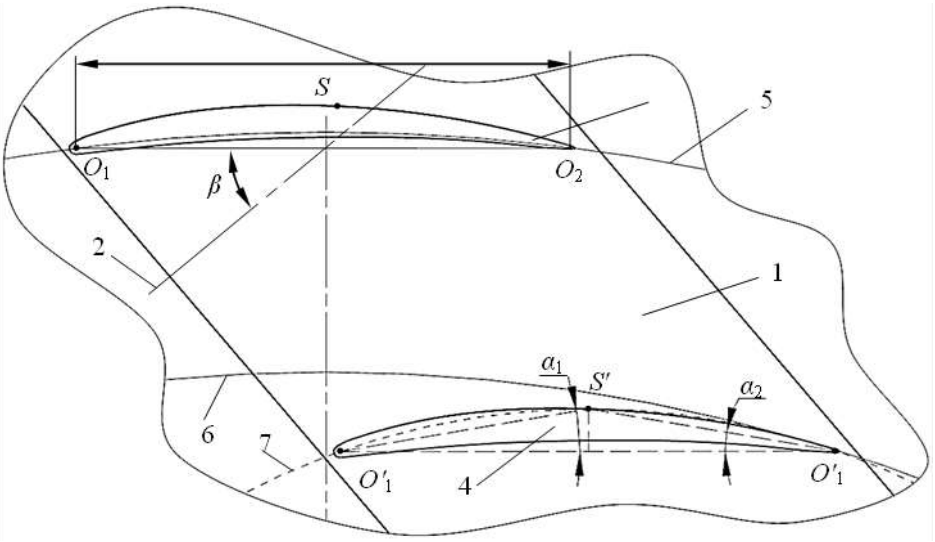


Рис. 2.8 Схема расчета с допущениями:
1 – моноколесо; 2 – ось вращения моноколеса; 3 – заданный профиль пера лопатки; 4 – смещенный профиль пера лопатки; 5 и 6 – наружная и внутренняя режущие кромки кольцевого инструмента; 6 –часть режущей кромки ; 7 – дуга окружности, имитирующая профиль спинки

С учетом данных допущений получим упрощенную формулу для определения максимально допустимой ширины режущей части кольцевого инструмента:

$$\delta R_{\max}^{упр} = \frac{D_н}{2} - \frac{b}{2\sin(\alpha_1+\alpha_2)} - \sqrt{t^2\sin^2(\beta_т) + \left(\frac{\sqrt{D_н^2 - b^2}}{2} - \frac{b}{2\operatorname{tg}(\alpha_1+\alpha_2)} - t\cos(\beta_т)\right)^2}, \quad (2.14)$$

где α_1 и α_2 – углы характеризующие профиль спинки:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \operatorname{arctg}\left(\frac{y_j - Y_1}{x_j - X_1}\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}\right); \\ \alpha_2 &= \operatorname{arctg}\left(\frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{y_j - Y_2}{x_j - X_2}\right). \end{aligned} \quad (2.15)$$

Ширина режущей части кольцевого инструмента ограничивается не только параметром $\delta R_{\max}$, а также прочностными характеристиками самого инструмента $\delta R_{\min}$, и в итоге допустимая ширина режущей части находится в промежутке:

$$\delta R_{\max} > \delta R > \delta R_{\min}. \quad (2.16)$$

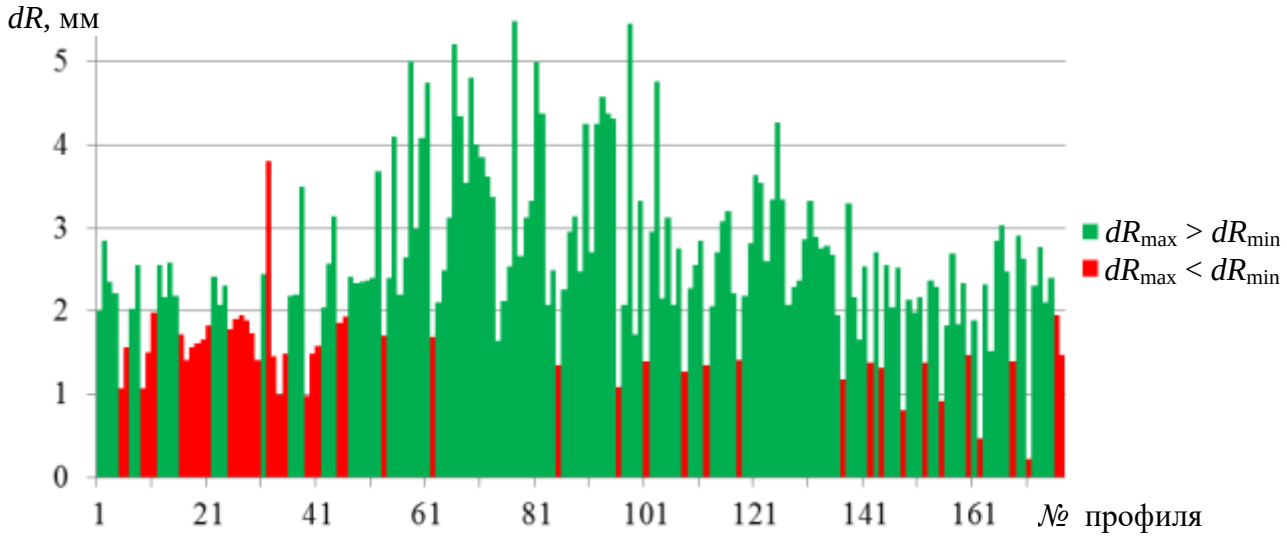
Значение параметра $\delta R_{\min}$ зависит от множества факторов: конструкция и размеры кольцевого режущего инструмента, прочностные характеристики инструментального материла и др. Для его определения можно воспользоваться

ГОСТом 26339-84 «Сверла алмазные кольцевые. Технические условия» [46], где приведены размеры режущей части для различных диаметров сверл.

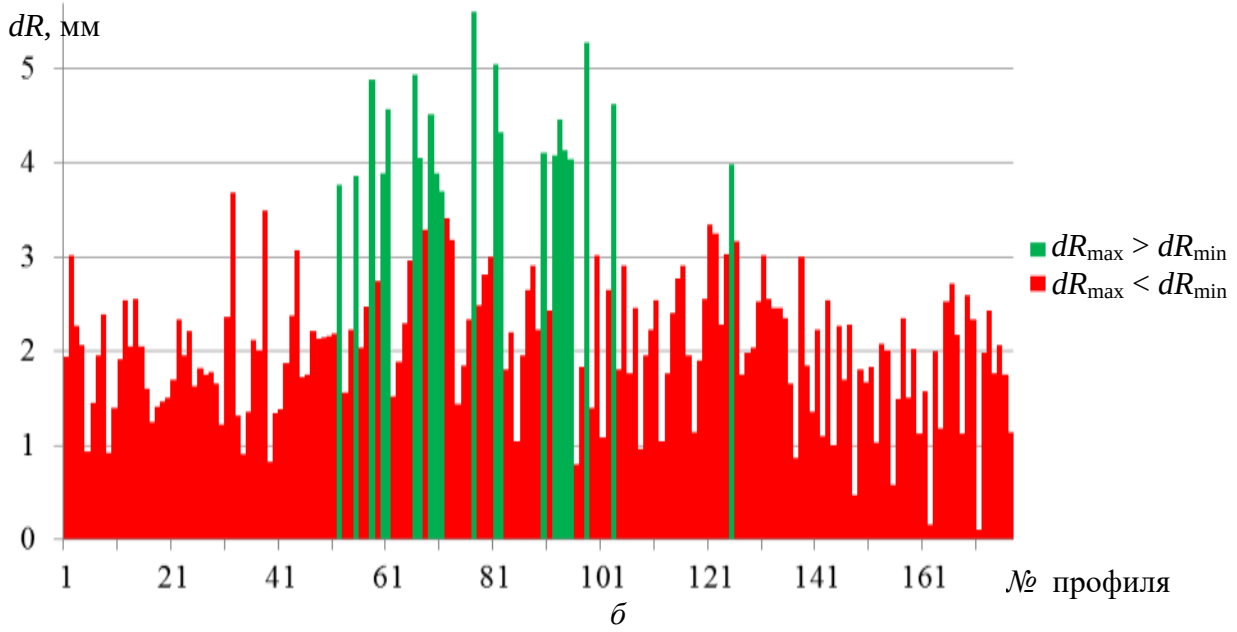
Если для некоторого осевого моноколеса максимальная ширина режущей части δR_{max}, рассчитанная по формуле (2.14), меньше минимально возможной ширины δR_{min}, то в этом случае использование технологии обработки межлопаточных каналов кольцевым инструментом невозможно.

Поэтому в некоторых случаях обработка межлопаточного канала кольцевым инструментом возможна не на всю глубину, в этом случае увеличивается параметр δR_{min} путем уменьшения диаметра кольцевого инструмента $D_н$, либо обработка совсем невозможна из-за наличия конструктивных особенностей у некоторых моноколес (отогнутый профиль, наличие антивибрационной полки, большой угол закрутки пера и др.), что сужает область применения кольцевого инструмента.

Для оценки области применения обработки кольцевым режущим инструментом различных моноколес осевых турбин по формуле (2.14) были определены значения δR_{max}, для плоских решеток из атласа [4] при этом наружный диаметр кольцевого инструмента был найден по формуле (2.6). Полученные значения сравнивались с минимально допустимой шириной режущей части кольцевого инструмента δR_{min}, по ГОСТ 26339-84 [23] (рис. 2.9).



а



б

Рис. 2.9 Значения параметра δR_{max} для различных профилей турбинной лопатки:
а) $\bar{h}$ = 1,9 и θ = 5,0; *б)* $\bar{h}$ = 7,0 и θ = 4,0

Полученные значения показывают, что теоретически область применения кольцевого инструмента для обработки межлопаточных каналов моноколес осевых турбин последних ступеней с относительной высотой лопатки $\bar{h}$ = 1,9 и веерностью θ = 5,0 составляет 76% из всех возможных профилей. При этом для оставшихся 24% обработка возможна лишь части канала, либо совершенно не возможна. Для моноколес осевых турбин первых ступеней с относительной высотой лопатки $\bar{h}$ = 7,0 и веерностью θ = 4,0 теоретически область применения уменьшается до 11% из-за необходимости применения кольцевого инструмента большего диаметра.

2.2.3. Определение значения высоты внутренней полости кольцевого режущего инструмента

Корпус кольцевого режущего инструмента в процессе обработки не должен соприкасаться с поверхностями моноколеса (рис. 2.10).

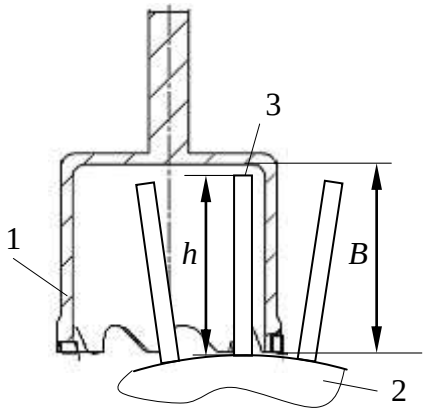


Рис. 2.10 Ограничение размера высоты внутренней полости кольцевого инструмента:
1 – кольцевой инструмент; 2 – моноколесо; 3 – перо лопатки

Данное ограничение сводится к тому, что глубина внутренней полости кольцевого режущего инструмента должна быть больше высоты лопатки осевого моноколеса:

$$B \geq h. \tag{2.17}$$

Из формулы (2.6) найдем значение диаметр моноколеса $D_к$:

$$D_к = D_н \frac{\bar{h}\theta\cos(\beta_т)}{\sqrt{\sin^2(\beta_т)+\left(\bar{h}\sqrt{\theta+1}+0{,}5\cdot\mathrm{tg}(\beta_т)\sin(\beta_т)\right)^2}}. \tag{2.18}$$

Определим высоту пера h через диаметр моноколеса $D_к$ и его веерность θ:

$$h = \frac{D_к}{\theta} = D_н \frac{\bar{h}\cos(\beta_т)}{\sqrt{\sin^2(\beta_т)+\left(\bar{h}\sqrt{\theta+1}+0{,}5\cdot\mathrm{tg}(\beta_т)\sin(\beta_т)\right)^2}}. \tag{2.19}$$

Тогда неравенство (2.19) можно записать:

$$B \geq D_н \frac{\bar{h}\cos(\beta_т)}{\sqrt{\sin^2(\beta_т)+\left(\bar{h}\sqrt{\theta+1}+0{,}5\cdot\mathrm{tg}(\beta_т)\sin(\beta_т)\right)^2}} = \overline{K}_в D_н. \tag{2.22}$$

Определим характер изменения коэффициента $\overline{K}_в$ в зависимости от угла установки теоретического профиля β (рис. 2.11).

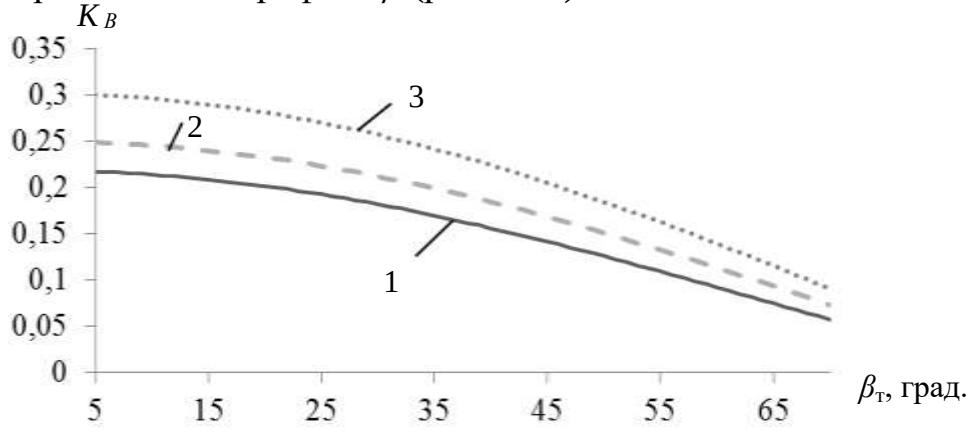


Рис. 2.11 График изменения коэффициента $\overline{K}_в$:
1 – θ=20,0 и $\bar{h}$=1,0; 2 – θ=15,0 и $\bar{h}$=2,0; 3 – θ=10,0 и $\bar{h}$=3,0;

Значение коэффициента $\overline{K}_B$ изменяется от 0,06 до 0,3 поэтому для выполнения ограничения по высоте для большего количества осевых моноколес глубину внутренней полости кольцевого режущего инструмента определяем следующим выражением:

$$B=0{,}3D_{\text{н}}. \qquad (2.23)$$

В итоге используя зависимости (2.6), (2.14) и (2.22) можно подобрать кольцевой режущий инструмент для обработки межлопаточного канала осевого моноколеса.

2.3. Численный эксперимент по определению значений основных геометрических параметров кольцевого режущего инструмента

Численный эксперимент проводился на геометрических параметрах семи ступеней рабочих колес компрессора высокого давления газотурбинного двигателя для газоперекачивающих станций. Значения используемых параметров представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3

Основные параметры рабочих колес компрессора

Ступень	Диаметр рабочего колеса $D_{\text{к}}$, мм	Ширина рабочего колеса B, мм	Высота лопатки h, мм	Угол входа	Угол выхода
1	664,8	33,7	66,2	125,8	27,5
2	692,2	32,3	52,6	121,9	48,1
3	708,8	31,6	41,9	116,2	53,4
4	717,8	33,5	37,5	110,5	55,9
5	726,4	34,5	32,3	111,4	52,7
6	726,6	34,5	28,2	109,9	45,8
7	726,6	46	26,7	99,5	24,7

Для вышеприведённой группы рабочих колес были определены значения размеров кольцевого режущего инструмента:

– диаметр наружной части режущей кромки инструмента $D_{\text{н}}^{\text{теор}}$ определили по формуле (2.6);

– максимально допустимую ширину режущей части $\delta R_{\max}^{\text{теор}}$ находили по формуле (2.14), используя ранее полученное значение диаметра $D_{\text{н}}^{\text{теор}}$.

Для сравнения те же размеры кольцевого инструмента были найдены в CAD-системе (рис. 2.12) с использованием математической модели рабочего колеса ***1*** по следующему алгоритму:

В корневой части межлопаточного канала строим плоскость резания 2. строим кривую R_1R_2, которая образована путем пересечения плоскости ***2*** и поверхности корыта ***3***. Через точки R_1 и R_2 в плоскости ***2*** создаем окружность ***4*** произвольного диаметра. Строим кривую W_1W_2, которая образована путем пересечения плоскости ***2*** и наружной цилиндрической поверхности моноколеса ***5***. Через центр окружности ***4*** до точки W_1 строим окружность ***6***. Добавляем ограничение, что окружность ***6*** касательна к поверхности спинки ***7***. Диаметр наружной части режущей кромки инструмента $D_{\text{н}}^{\text{CAD}}$ равен диаметру окружности ***4***. Максимально допустимая ширина режущей части равна половине разности диаметров окружностей ***4*** и ***5*** $\left(\delta R_{\max}^{\text{CAD}} = \dfrac{D_{\text{н}} - D_{\text{вн}}}{2}\right)$.

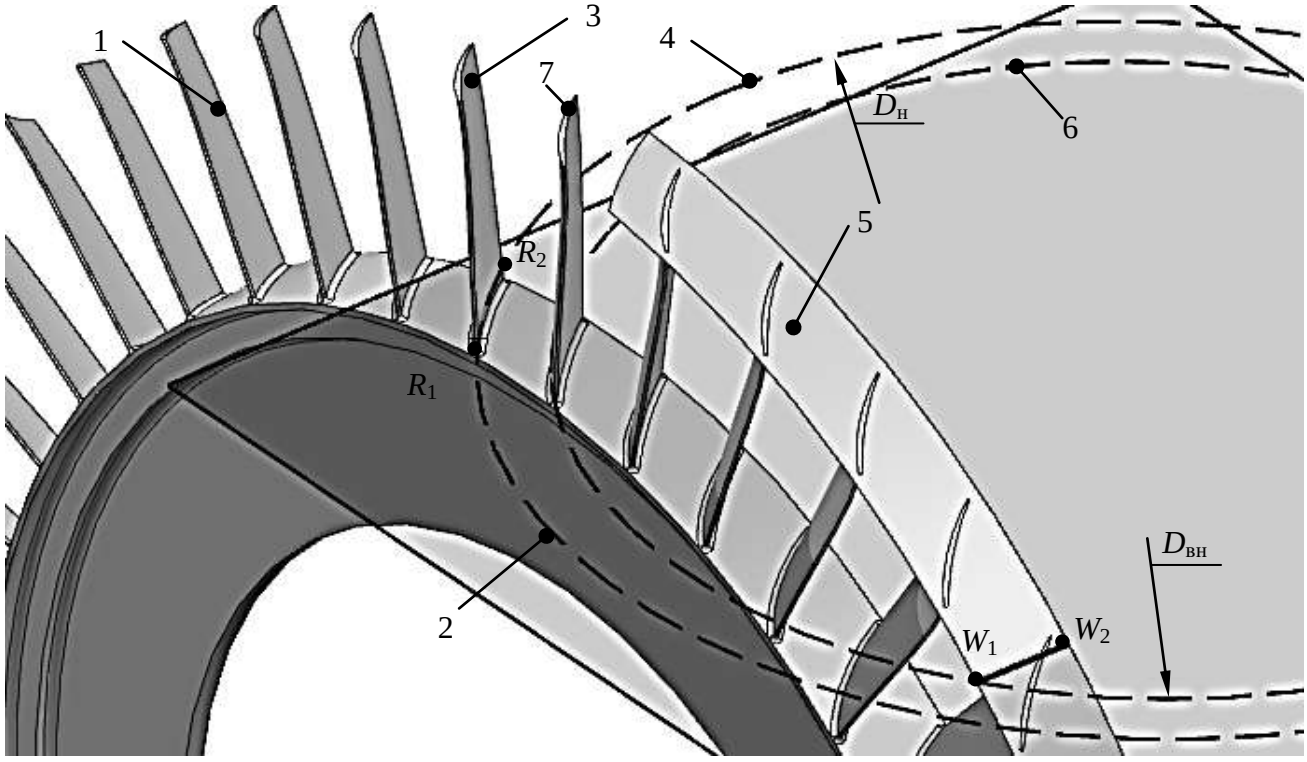


Рис. 2.12. Определение размеров кольцевого инструмента в CAD-системе

Таблица 2.4

Полученные размеры кольцевого режущего инструмента

Ступень	Полученные значения, мм				Относительна погрешность, %	
	Аналитический метод		Графо-аналитический			
	$D_{н}^{теор}$	$\delta R_{max}^{теор}$	$D_{н}^{CAD}$	δR_{max}^{CAD}	$D_{н}$	δR_{max}
1	299,12	11,07	307,84	12,24	2,8	10,5
2	340,12	10,14	335,57	10,87	1,3	6,6
3	362,37	7,33	330,67	8,17	9,5	10,3
4	361,37	6,14	332,74	7,57	8,6	18,9
5	288,83	6,23	284,78	8,16	1,4	23,6
6	296,33	7,14	269,27	8,25	10,1	13,4
7	199,76	8,65	208,79	9,81	4,3	11,7

Сравнив значения размеров кольцевого режущего инструмента, полученных аналитическим методом по формулам и графо-аналитическим методом в CAD-системе, можно утверждать, что математическая модель по определению допустимого диаметрального размера режущей части кольцевого инструмента имеет хорошее согласование с действительными данными (наибольшая относительная погрешность составила около 11 %). Формула по определению допустимой ширины режущей части имеет большую погрешность, но при этом можно отметить, что все полученные значения меньше действительных, а значит их можно использовать при подборе параметров кольцевого режущего инструмента.

2.4 Выводы по 2 главе

1. Получены аналитические зависимости конфигурации и размеров режущего инструмента от геометрических параметров межлопаточных каналов моноколеса осевых компрессоров и турбин. При этом установлено, что увеличение основных геометрических параметров (наружный диаметр осевого моноколеса $D_к$; угла установки профиля лопатки β; относительная высота лопатки $\bar{h}$) кроме веерности θ приводит к увеличению наружного диаметра режущей части

кольцевого инструмента $D_н$ и высоты внутренней полости корпуса инструмента B. При этом минимальный наружный диаметр режущей части находится в прямой

зависимости от диаметра моноколеса. Влияние остальных параметром носит сложный характер.

2. Установлена теоретическая область применения кольцевого режущего инструмента для прорезания межлопаточных каналов моноколес различной конфигурации. При этом ограничение по минимальной ширине режущей части сужает область применения из-за наличия конструктивных особенностей у некоторых моноколес (отогнутый профиль, наличие антивибрационной полки, большой угол закрутки пера и др.). Обработка межлопаточных каналов моноколес осевых турбин последних ступеней с относительной высотой лопатки $\bar{h}$ = 1,9 и веерностью θ = 5,0 кольцевым инструментом возможна для 76% профилей из атласа. При этом для оставшихся 24% профилей обработка возможна лишь части канала, либо совершенно не возможна. Для моноколес осевых турбин первых ступеней с относительной высотой лопатки $\bar{h}$ = 7,0 и веерностью θ = 4,0 область применения уменьшается до 11% из-за необходимости применения кольцевого инструмента большего диаметра.

3. Установлено, что при сравнении размеров кольцевого инструмента полученных с помощью установленных аналитических зависимостях и размеров найденных по 3D моделям семи ступеней рабочих колес компрессора высокого давления газотурбинного двигателя в CAD/CAM системе получили, что относительная погрешность определения наружного диаметра кольцевого инструмента $D_{н}$ составляет не более 11 %, а погрешность определения ширины режущей части – не более 24%. При этом можно отметить, что все полученные значения ширины меньше действительных, а значит, их можно использовать при подборе параметров кольцевого режущего инструмента.

ГЛАВА 3
КИНЕМАТИКА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ МЕЖЛОПАТОЧНЫХ КАНАЛОВ МОНОКОЛЕС КОЛЬЦЕВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

3.1. Особенности кинематики формообразования межлопаточных каналов моноколеса

Как уже был сказано в первой главе, обработка межлопаточных каналов моноколес кольцевым инструментом основана на схеме нарезания конических колес с круговыми зубьями: межлопаточные каналы образуются путем перемещения вращающегося инструмента к корневому сечению. Однако геометрия межлопаточного канала осевого моноколеса более сложна по сравнению со впадиной зуба. Межлопаточный канал представляет собой комплекс поверхностей аэродинамического профиля, образуемых спинкой и корытом пера лопаток, а также поверхностью втулки.

Рассмотрим, как изменяется кинематика формообразования межлопаточного канала кольцевым инструментом в зависимости от количества движений по осям. При однокоординатной обработке с управлением в процессе обработки положением инструмента по одной координате (рис. 3.1) кольцевой инструмент ***1*** устанавливают в исходное положение таким образом, чтобы торцевая часть инструмента ***3*** была параллельна дну межлопаточного канала ***4*** заготовки моноколеса ***2***. Центр кольцевого инструмента $\boldsymbol{O}_{\text{и}}$ расположен относительно центра детали $\boldsymbol{O}_{\text{д}}$ на расстояния $\boldsymbol{x}_{\text{у}}$ и $\boldsymbol{y}_{\text{у}}$. Инструменту сообщают поступательное движение вдоль оси ***Z*** по направлению к дну межлопаточного канала. При этом в заготовке копируется форма режущей части кольцевого инструмента. Формообразование производится до дна канала, после чего инструмент отводится из канала. Для обработки следующего межлопаточного канала заготовке с помощью делительного устройства ***5*** сообщается движение $\boldsymbol{\omega}_{\text{дел}}$ на угол $\alpha = \frac{360}{n}$, где n – количество лопаток.

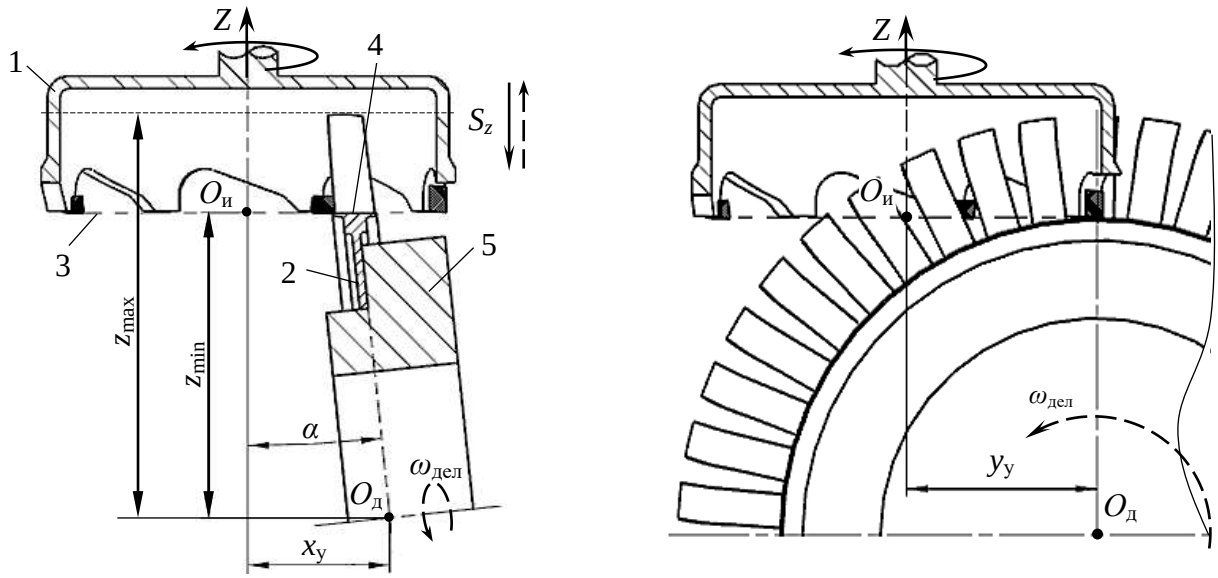


Рис. 3.1 Кинематическая схема однокоординатного формообразования межлопаточного канала с использованием делительного устройства:
1 – кольцевой режущий инструмент; 2 – заготовка моноколеса; 3 – торцевая часть инструмента; 4 – дно межлопаточного канала; 5 – делительное устройство;
$O_д$ – центр детали; $O_и$ – центр инструмента; $x_у$ и $y_у$ – смещение инструмента от центра детали;
z_{max} – расстояние по оси Z в начале обработки; z_{max} – расстояние по оси Z в конце обработки;
$\alpha_у$ – средний угол наклона поверхности втулки к оси вращения моноколеса (см. рис. 2.1);
S_z – линейное движение инструмента по оси Z; $\omega_{дел}$ – делительное движение заготовки

Преимуществом данной схемы формообразования является возможность её реализации на оборудовании с ручным управлением. При этом обработка поверхности со стороны спинки одной и корыта другой лопаток производится одновременно, поэтому траектория движения кольцевого инструмента будет предельно простой. Объем удаляемого материала в этом случае будет несколько больше, чем при прорезании межлопаточного канала дисковой фрезой. Это объясняется тем, что удаленный из межлопаточного канала материал представляет собой часть кольцевой поверхности прямоугольного профиля ***1*** или трапецеидального профиля ***2*** (рис. 3.2).

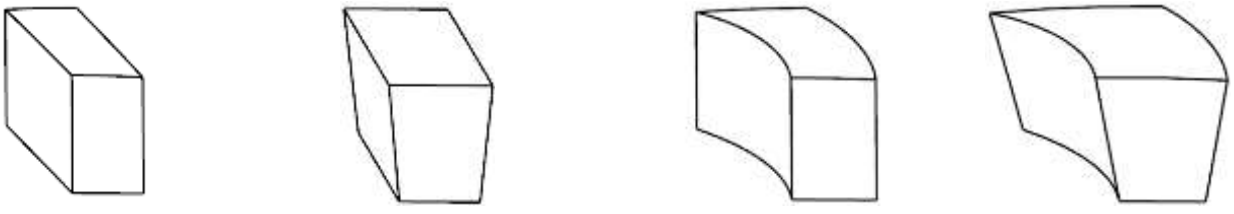


Рис. 3.2. Схема материала, удаленного из межлопаточного канала:
а) после обработки дисковой фрезой; б) после обработки кольцевой фрезой

Увеличить объем удаляемого из межлопаточного канала материала можно при двухкоординатной схеме, добавив в управление координат вращение заготовки моноколеса $\omega_в$ (рис. 3.2). Кольцевой инструмент устанавливается в исходное положение относительно заготовки моноколеса аналогично предыдущей схеме. Главное отличие состоит в том, что формообразование межлопаточного канала происходит за счет согласованного линейного перемещения вращающегося кольцевого инструмента $\boldsymbol{S_z}$ и кругового движения заготовки моноколеса $\boldsymbol{S_\omega}$. Формообразование межлопаточного канала происходит в два этапа. Сначала ведут обработку поверхности корыта до дна межлопаточного канала. При этом съем металла происходит с участием всех режущих кромок. После чего инструмент выводят из канала и затем производят обработку спинки соседней лопатки в этом же канале внутренними и торцевыми режущими кромками инструмента.

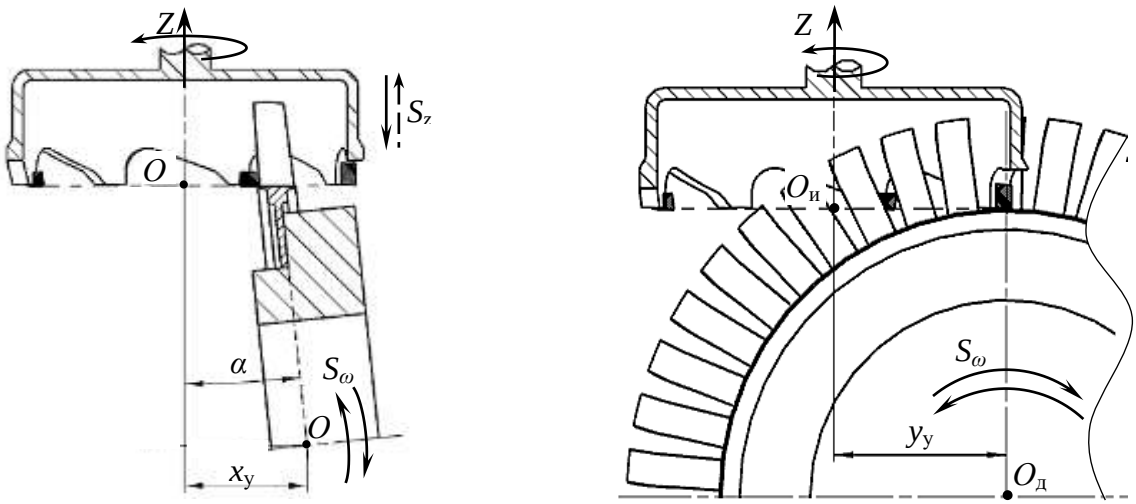


Рис.3.2 Кинематическая схема двухкоординатного формообразования межлопаточного канала: $O_д$ – центр детали; $O_и$ – центр инструмента; $x_у$ и $y_у$ – смещение инструмента от центра детали; $\alpha_у$ – средний угол наклона поверхности втулки к оси вращения моноколеса; S_z – линейное движение инструмента по оси Z; S_ω – вращение заготовки

Для реализации схемы двухкоординатного формообразования необходимо оборудование с числовым программным управлением для согласования движения инструмента вдоль оси $\boldsymbol{Z}$ и вращения заготовки $\boldsymbol{S_\omega}$. При этой кинематической схеме траектория движения кольцевого инструмента также будет достаточно мала. Однако при двухкоординатном формообразовании не учитывается кривизна профиля пера по координате $\boldsymbol{X}$, и после обработки остается большой слой неудаленного металла на входной и выходной кромках, концевой части, в середине профиля и корневой части пера лопаток.

При трехкоординатной обработке межлопаточного канала осевого моноколеса кольцевым введением третьей управляемой координаты $\boldsymbol{S_x}$ (рис. 3.3) позволяет уменьшить погрешность формообразования по профилю пера. Формообразование межлопаточного канала происходит за счет согласованного перемещения инструмента вдоль двух координатных осей $\boldsymbol{Z}$ и $\boldsymbol{X}$ и вращения заготовки $\boldsymbol{S_\omega}$.

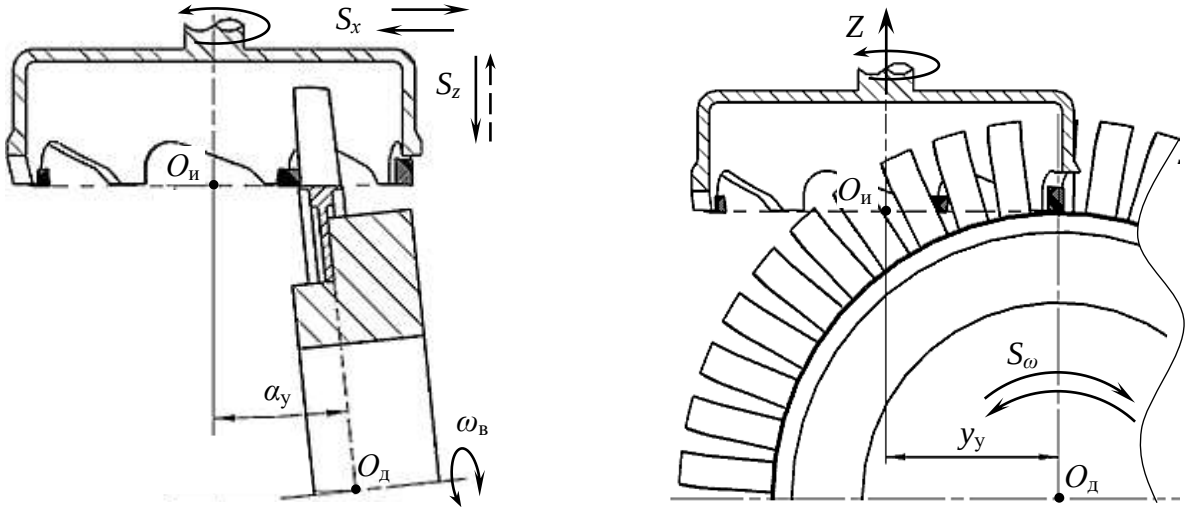


Рис. 3.3 Кинематическая схема трехкоординатного формообразования межлопаточного канала: $O_д$ – центр детали; $O_и$ – центр инструмента; $x_у$ и $y_у$ – смещение инструмента от центра детали; $\alpha_у$ – средний угол наклона поверхности втулки к оси вращения моноколеса ; S_z – линейное движение инструмента по оси Z; S_ω – вращение заготовки

При данной кинематической схеме в отличие от предыдущих двух можно реализовать различные стратегии формообразования межлопаточных каналов (строчная и плунжерная).

При строчечной стратегии формообразования межлопаточных каналов кольцевым инструментом вначале осуществляют врезание на глубину резания. Для обработки корыта инструмент перемещают по строке вдоль профиля по координате $\boldsymbol{X}$, осуществляя при этом согласованное движение и вращение заготовки $\boldsymbol{S_\omega}$. При этом обработка ведется внешними режущими кромками. По окончанию строки инструмент перемещают в сторону спинки соседней лопатки. Далее строка идет по спинке, а процесс съема материала осуществляется внутренними режущими кромками инструмента. И цикл обработки повторяется заново.

Плунжерная обработка при трехкоординатном формообразовании межлопаточного канала осуществляется также как при двухкоординатном формообразовании с разницей в том, что при перемещении кольцевого

инструмента по высоте пера лопатки осуществляют с управлением одновременно по трем координатам $\boldsymbol{S_z}$, $\boldsymbol{S_x}$ и $\boldsymbol{S_\omega}$.

Однако при трехкоординатной обработке не учитывается противоречие между необходимостью использования кольцевого инструмента больших диаметров для обработки спинки концевых профилей внутренними режущими кромками и кольцевого инструмента малого диаметра для обработки корыта корневых профилей наружными режущими кромками. Понятно, что эта задача может быть решена с использованием типового набора кольцевого инструмента с автоматической его сменой в процессе обработки по мере необходимости. Однако такое решение приведет к потере производительности и точности обработки.

Рассмотрим возможность обработки профиля корыта в тех сечениях пера лопаток, в которых наружный диаметр кольцевого инструмента становится равным окружности вписанной в профиль корыта. При этом центр вписанной окружности и центр инструмента должны совпадать. Такое условие невозможно реализовать при трехкоординатной обработке, так как в сечении кольцевой инструмент перемещается по одной координате $\boldsymbol{S_x}$. Поэтому линейное перемещение кольцевого инструмента по оси $\boldsymbol{Y}$ в процессе обработки обеспечивает возможность совпадения центра окружности и центра инструмента (рис. 3.4)

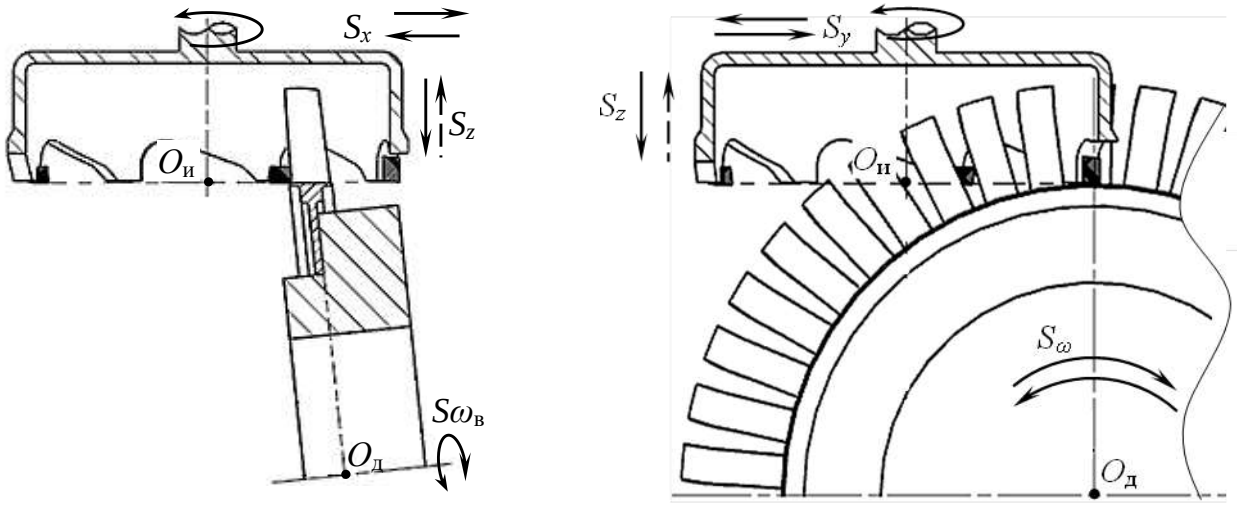


Рис. 3.4 Кинематическая схема четырехкоординатного формообразования межлопаточного канала:

$O_д$ – центр детали; $O_и$ – центр инструмента; S_x, S_y и S_z – линейное движение инструмента вдоль осей X, Y и Z; S_ω – вращение заготовки

Необходимость введения пятой управляемой координаты возникает при обработке профиля спинки в тех сечениях концевой части лопаток, в которых

внутренний диаметр кольцевого инструмента становится равным или меньше диаметра окружности, вписанной профиль спинки, поэтому поворот оси кольцевого инструмента вокруг оси ***X*** обеспечивает в этих случаях возможность обработки спинки в сечениях концевой части пера лопаток (рис.3.5).

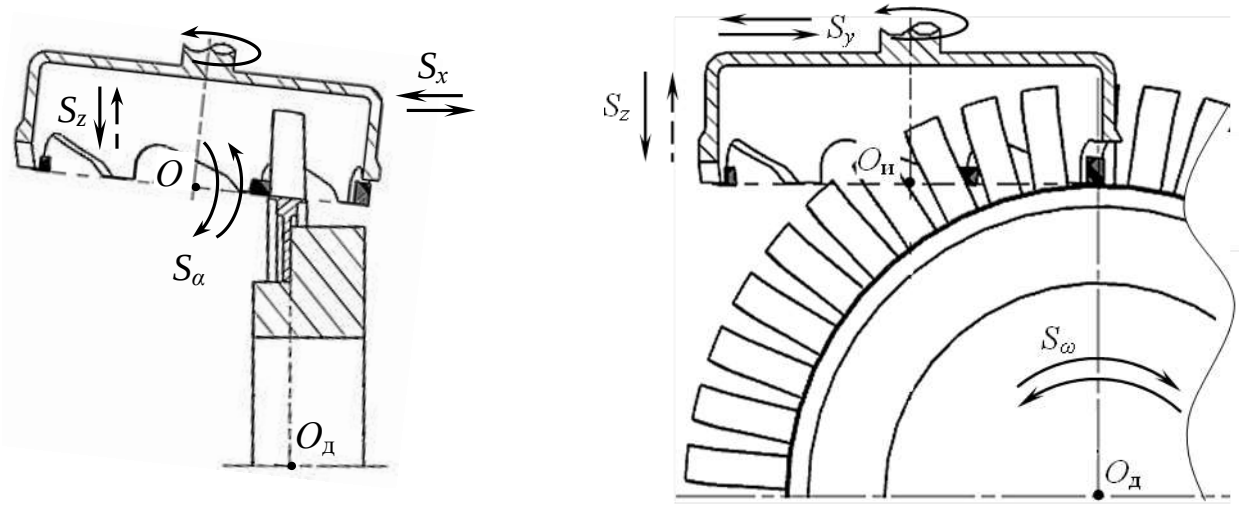


Рис. 3.5 Кинематическая схема пятикоординатного формообразования межлопаточного канала: $O_д$ – центр детали; $O_и$ – центр инструмента; S_x, S_y и S_z – линейное движение инструмента вдоль осей *X*, *Y* и *Z*; S_α – поворот инструмента вокруг оси *Y*; S_ω – вращение заготовки

Используя кольцевой инструмент с механизмом изменения диаметра режущей части в процессе формообразования [74], можно добиться получения поверхностей с переменным радиусом кривизны, и тем самым удалить из межлопаточного канала максимально возможное количество материала.

Обработку при шестикоординатном формообразовании осуществляют следующим образом: кольцевому инструменту обрабатывающему корыто, сообщают движение по высоте пера до дна межлопаточного канала (рис. 3.6). В соответствии с изменением кривизны обрабатываемой поверхности, изменяют наружный диаметр режущей части на величину $\boldsymbol{d_н}$ путем прямолинейного перемещения режущих элементов в радиальном направлении $\boldsymbol{S_д}$. Затем инструмент перемещают в сторону спинки соседней лопатки. Далее производят обработку до дна межлопаточного канала, перемещая инструмент по высоте пера, изменяют диаметр внутренней режущей части на величину $\boldsymbol{d_{вн}}$ в соответствии с изменением кривизны обрабатываемой поверхности.

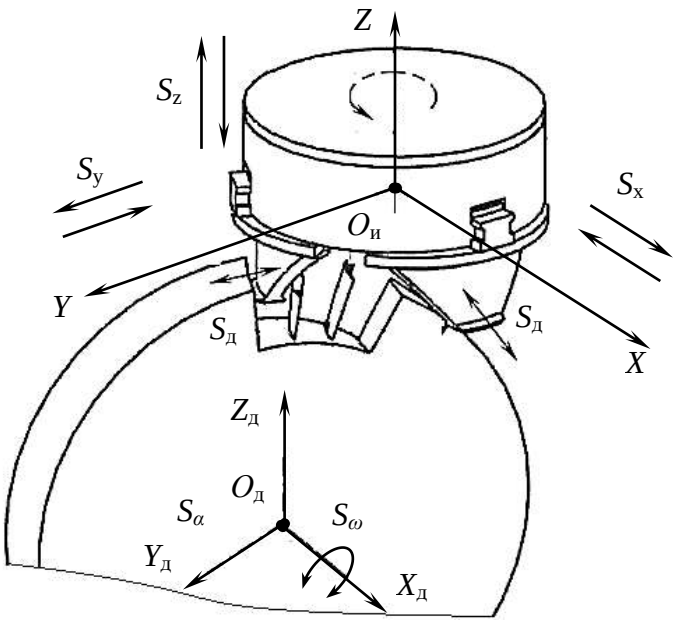


Рис. 3.6 Кинематическая схема шестикоординатного формообразования межлопаточного канала:
$O_д$ – центр детали; $O_и$ – центр инструмента; S_x, S_y и S_z – линейное движение инструмента вдоль осей X, Y и Z; S_α – поворот инструмента вокруг оси Y; S_ω – вращение заготовки

С точки зрения повышения производительности наружный или внутренний диаметр режущей части инструмента ($\boldsymbol{d_н}$, $\boldsymbol{d_{вн}}$) предпочтительно должен быть равен диаметру окружности, вписанной в профиль корыта или спинки ($\boldsymbol{d_к}$, $\boldsymbol{d_с}$) соответственно (рис. 3.7).

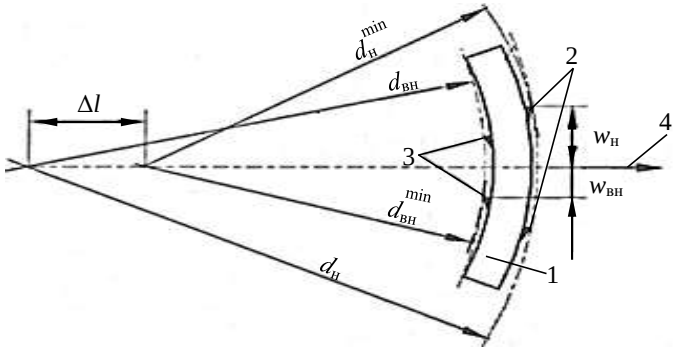


Рис. 3.7 Элементы кольцевого инструмента с изменяемым диаметром режущей части:
1 – подвижная часть инструмента; 2 и 3 – наружные и внутренние режущие кромки;
4 – ось перемещения подвижной части; $w_н$ и $w_{вн}$ – положение внешних и внутренних режущих кромок относительно оси перемещения

Для этого в процессе обработки режущие элементы ***2*** и ***3***, расположенные на подвижных частях кольцевого инструмента ***1***, напоминающих кулачки трехкулачкового патрона, перемещают на величину $\boldsymbol{\Delta l}$, при этом диаметры $\boldsymbol{d_н}$ и $\boldsymbol{d_{вн}}$ изменяются по следующим зависимостям:

$$d_{н} = \sqrt{4\Delta l^2 + \left(d_{н}^{\min}\right)^2 + 4\Delta l\sqrt{\left(d_{н}^{\min}\right)^2 - 4w_{н}^{\,2}}};$$
$$d_{вн} = \sqrt{4\Delta l^2 + \left(d_{вн}^{\min}\right)^2 + 4\Delta l\sqrt{\left(d_{вн}^{\min}\right)^2 - 4w_{вн}^{\,2}}}. \qquad (3.1)$$

где $d_{н}^{\min}$ и $d_{вн}^{\min}$ – наружный и внутренний диаметры режущей части инструмента, в исходном положении ($\Delta l = 0$); $w_{н}$ и $w_{вн}$ – смещение внешних и внутренних режущих кромок относительно оси перемещения режущих элементов инструмента в радиальном направлении ***4***.

При обработке корыта лопатки управляют изменением диаметра $\boldsymbol{d_{н}}$, а при обработке спинки – внутреннего диаметра $\boldsymbol{d_{вн}}$. Для реализации данной кинематической схемы (см. рис. 3.6) необходимо использовать кольцевой инструмент, имеющий механизм управляемого изменения диаметра режущей части инструмента путем прямолинейного движения в радиальном направлении $\boldsymbol{S_{д}}$ его режущих элементов.

При этом максимальная величина изменения диаметра режущей части ***Δd*** определяется в зависимости от изменения кривизны (рис. 3.8) поверхности корыта ***1*** и спинки ***2*** от корневой части ***3*** до концевой части ***4*** по следующим формулам:

$$\Delta d_1 = \left|d_{к}^{кн} - d_{с}^{кр}\right| - 2\cdot\delta R;$$
$$\Delta d_2 = \left|d_{с}^{кн} - d_{к}^{кр}\right| + 2\cdot\delta R; \qquad (3.2)$$
$$\Delta d = \max(\Delta d_1, \Delta d_2),$$

где $d_{к}^{кр}$ и $d_{к}^{кн}$ – диаметры окружности, вписанные в профиль корыта в корневом и концевом сечении; $d_{с}^{кр}$ и $d_{с}^{кн}$ – диаметры окружности, вписанные в профиль спинки в корневом и концевом сечении; δR – ширина режущей части.

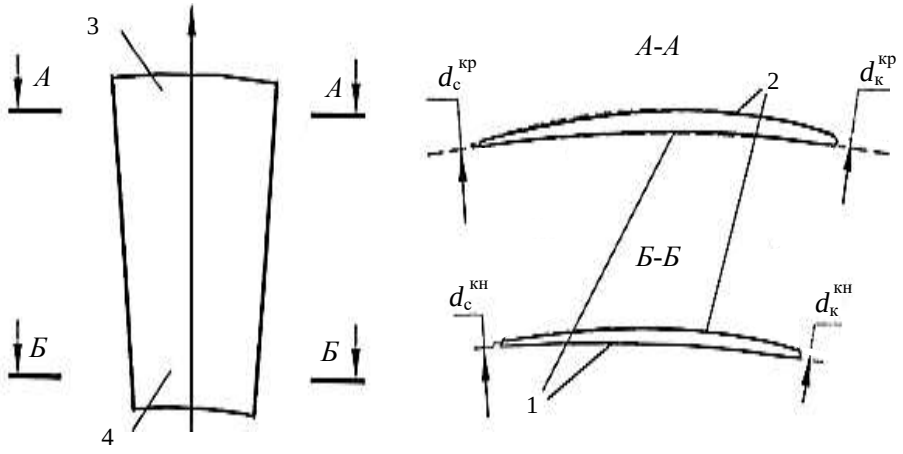


Рис. 3.8 Изменение кривизны профиля пера лопатки:
1 – профиль корыта; 2 – профиль спинки; 3 и 4– корневая и концевая части лопатки

Для реализации обработки межлопаточного канала по вышеуказанным кинематическим схемам требуется различная подготовительная информация. Например, если для однокоординатной обработки требуется определить лишь установочные размеры, то для двух и более координатной обработки необходимо разработать математические модели движения формообразования.

3.2. Граничные условия по положению и ориентации кольцевого инструмента при формообразовании межлопаточного канала.

В отличие от формообразования моноколес кольцевой фрезой, когда весь инструмент находится внутри межлопаточного канала, при формообразовании моноколес кольцевым инструментом большая его часть находится за пределами межлопаточного канала Осуществление при обработке формообразующих движений режущего инструмента может привести к столкновению или зарезу обрабатываемой заготовки.

Для исключения подобных случаев в кинематику формообразования межлопаточных каналов осевых моноколес вводятся следующие ограничения:

1) ограничение положения поверхностью корыта межлопаточного канала и прилегающих к ней входной и выходной кромок. При этом ограничении расстояние от оси инструмента до поверхности корыта должно быть не меньше, чем половина диаметра окружности, образованной внешними режущими кромками при вращении инструмента $D_н/2$, которое можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} x &\geq x^к(u,v) + \frac{D_н A_к}{2\sqrt{A_к^{\,2} + B_к^{\,2} + C_к^{\,2}}}; \\ y &\geq y^к(u,v) + \frac{D_н B_к}{2\sqrt{A_к^{\,2} + B_к^{\,2} + C_к^{\,2}}}; \\ z &\geq z^к(u,v) + \frac{D_н C_к}{2\sqrt{A_к^{\,2} + B_к^{\,2} + C_к^{\,2}}}, \end{aligned} \qquad (3.3)$$

где $\left[x^к(u,v);\, y^к(u,v);\, z^к(u,v)\right]$ – параметрическое уравнение поверхности корыта относительно системы координат станка; $u \in [0;1]$ и $v \in [0;1]$ – оси

параметрического пространства; $A_к$, $B_к$ и $C_к$ – направляющие коэффициенты нормали в точке поверхности корыта, которые находятся по следующим формулам [29]:

$$A_к = \begin{vmatrix} \frac{\delta y^к}{\delta u} & \frac{\delta y^к}{\delta v} \\ \frac{\delta z^к}{\delta u} & \frac{\delta z^к}{\delta v} \end{vmatrix} \qquad B_К = \begin{vmatrix} \frac{\delta z_и^к}{\delta u} & \frac{\delta z_и^к}{\delta v} \\ \frac{\delta x_и^к}{\delta u} & \frac{\delta x_и^к}{\delta v} \end{vmatrix} \qquad C_к = \begin{vmatrix} \frac{\delta x_и^к}{\delta u} & \frac{\delta x_и^к}{\delta v} \\ \frac{\delta y_и^к}{\delta u} & \frac{\delta y_и^к}{\delta v} \end{vmatrix}. \tag{3.4}$$

2) Ограничение положения поверхностью спинки пера обрабатываемой лопатки и прилегающих к ней входной и выходной кромок. При этом ограничении расстояние от оси инструмента до поверхности спинки должно быть не больше, чем половина диаметра внутренней режущей части инструмента $D_{вн}/2$, которое можно записать следующими выражениями:

$$\begin{aligned} x &\le x^с(u,v) - \frac{D_{вн} A_с}{2\sqrt{A_с^{\,2} + B_с^{\,2} + C_с^{\,2}}}; \\ y &\le y^с(u,v) - \frac{D_{вн} B_С}{2\sqrt{A_с^{\,2} + B_с^{\,2} + C_с^{\,2}}}; \\ z &\le z^с(u,v) - \frac{D_{вн} C_С}{2\sqrt{A_с^{\,2} + B_с^{\,2} + C_с^{\,2}}}, \end{aligned} \tag{3.5}$$

где $\left[x^с(u,v); y^с(u,v); z^с(u,v)\right]$ – параметрическое уравнение поверхности спинки относительно системы координат станка; $A_с$, $B_с$ и $C_с$ – направляющие коэффициенты нормали в точке поверхности спинки, которые находятся аналогично формуле (3.4).

3) Ограничение положения поверхностью дна межлопаточного канала и прилегающих к нему скруглений. При этом ограничении торцевая режущая часть кольцевого инструмента не должна находится ниже, чем дно межлопаточного канала:

$$\begin{aligned} z &\ge Z_с(u,v) - D_{вн} \frac{\sqrt{A_С^{\,2} + B_С^{\,2} + C_С^{\,2}}}{2C_С}; \\ z &\ge Z_и^к + D_н \cdot \frac{\sqrt{A_К^{\,2} + B_К^{\,2} + C_К^{\,2}}}{2C_К}. \end{aligned} \tag{3.6}$$

4) Ограничение положения инструмента поверхностью заготовки, находящейся за пределами обрабатываемого межлопаточного канала.

Тогда в результате допустимая область перемещения кольцевого инструмента определяется в результате решения системы уравнений (3.3) – (3.6). Эта область достаточно большая в концевой части лопаток, уменьшается ко дну межлопаточного канала. Также стоит упомянуть, что размеры этой области зависят от размера самого инструмента. Рассмотрим изменение допустимой области в корневом сечении при различных размерах кольцевого инструмента (рис. 3.9). В этом случае допустимая область ограничена поверхностями корыта (кривая ***1***), спинки (кривая ***2***), а также заготовки (кривая ***3***). Если центр кольцевого инструмента располагается в данной области (случай ***А***), то его наружная ***4*** и внутренняя ***5*** режущая часть находятся между корытом пера лопатки ***6*** и спинкой соседней лопатки ***7***. С уменьшением размера инструмента результирующим ограничением будет ограничение по поверхности заготовки (кривая ***3***), которая уменьшает допустимую область вплоть до нуля (случай ***Б***). При увеличении диаметра кольцевого инструмента данное ограничение уже меньше лимитирует допустимую область, и при некотором размере D_{Hmin} данным ограничением можно пренебречь (случай ***В***).

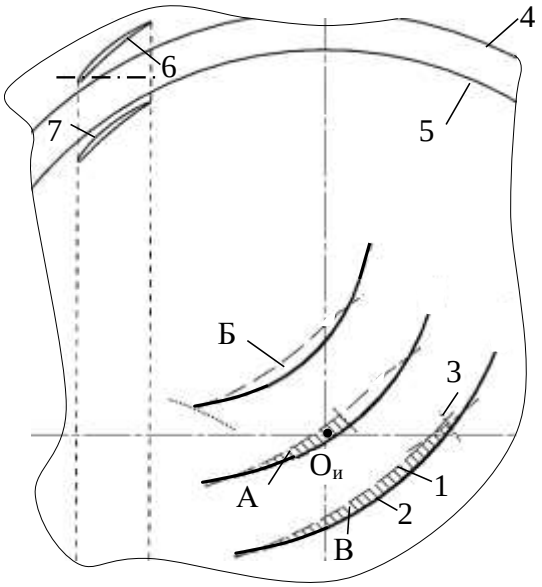


Рис. 3.9 Допустимая область при различных размерах режущей части кольцевого инструмента в корневом сечении:
1 – ограничение поверхностью корыта; 2 – ограничение поверхностью спинки; 3 – ограничение положения поверхностью заготовки

В зависимости от выбранной кинематической схемы изменяется конфигурация допустимой области. Так для двухкоординатной обработки ограничения (3.3)-(3.6) представляют собой плоские кривые. Допустимой будет плоская область, ограниченная данными кривыми. А при пятикоординатной обработке область ограничивается пятимерными поверхностями пятимерного пространства. Данный факт сильно усложняет задачу моделирования формообразования кольцевым инструментом при четырех и более координатной обработке.

3.3. Математическое моделирование многокоординатного формообразования

3.3.1. Математическое описание комплекса трактовых поверхностей межлопаточного канала осевого моноколеса

Для моделирования движения кольцевого инструмента при обработке осевого моноколеса необходимо математическое описание межлопаточного канала.

Можно выделить основные геометрические параметры, которые необходимо учитывать при формообразовании межлопаточного канала. Во первых это параметры описывающие размеры моноколеса: сюда входят ширина моноколеса $\boldsymbol{S_к}$, расстояние от торца диска до системы координат $\boldsymbol{X_д Y_д Z_д}$, связанной с деталью $\boldsymbol{S_о}$, наружный диаметр моноколеса $\boldsymbol{D_к}$ и диаметр проточной части на входе $\boldsymbol{D_{вт}^{вх}}$ и выходе $\boldsymbol{D_{вт}^{вых}}$ (рис. 3.10) .

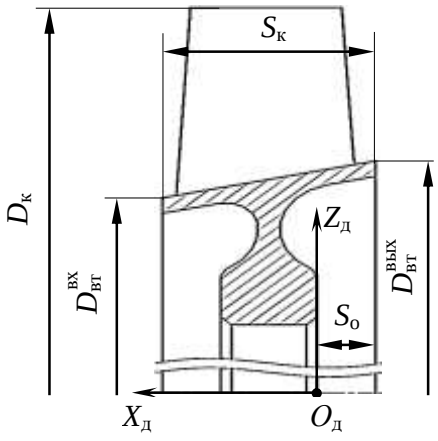


Рис. 3.10 Основные геометрические параметры моноколеса осевой ступени в медиальной плоскости

Во вторых это комплекс параметров, представляющих аэродинамические поверхности межлопаточного канала. В практике моделирования лопаточных венцов лопаточных машин геометрическую модель пера лопатки получают с помощью семейства согласованных между собой плоских профилей [3].

Поверхность сложной формы с помощью формул можно описать в виде линейчатой поверхности Кунса [29]:

$$P(u,v)=\begin{bmatrix}1-u & u & 1\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}-P_{0,0} & -P_{0,1} & P_{0,V}(v)\\ -P_{1,0} & -P_{1,1} & P_{1,V}(v)\\ P_{U,0}(u) & P_{U,1}(u) & 0\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}1-v\\ v\\ 1\end{bmatrix} \qquad (3.7)$$

где u =[0;1] и v = [0;1] – оси параметрического пространства; $P_{U,0}(u)$, $P_{U,1}(u)$, $P_{0,V}(v)$ и $P_{0,V}(v)$ – параметрические уравнения граничных кривых поверхности; $P_{0,0}$, $P_{0,1}$, $P_{1,0}$ и $P_{1,1}$ – точки пересечения граничных кривых.

Поверхность спинки и корыта межлопаточного канала состоят из граничных кривых в концевой части ***1***, в корневой части ***2***, у входной кромки ***3*** и выходной кромки ***4*** (рис. 3.11).

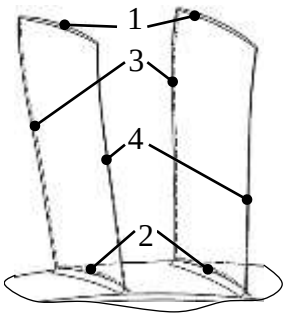


Рис 3.11 Граничные кривые поверхностей межлопаточного канала моноколеса: 1 – граничные кривые в корневой части пера лопатки; 2 – граничные кривые в концевой части; 3 – граничные кривые у входной кромки; 4 – граничные кривые у выходной кромки

Параметрические уравнения граничных кривых запишем в виде Кривой Безье n-й степени [29]:

$$L(t)=\begin{pmatrix}Lx(t)\\ Ly(t)\\ Lz(t)\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\sum_{i=0}^{n}Bx_i\dfrac{t^i\cdot(1-t)^{n-i}\cdot n!}{i!\cdot(n-i)!}\\ \sum_{i=0}^{n}By_i\dfrac{t^i\cdot(1-t)^{n-i}\cdot n!}{i!\cdot(n-i)!}\\ \sum_{i=0}^{n}Bz_i\dfrac{t^i\cdot(1-t)^{n-i}\cdot n!}{i!\cdot(n-i)!}\end{pmatrix} \qquad (3.8)$$

где t = [0;1] – параметр уравнения, (Bx_i; By_i; Bz_i) – координата i-й точки определяющего многоугольника Безье, n – степень полинома.

Инструменты анализа CAD/CAM-систем позволяют определить у пространственной кривой координаты точек определяющего многоугольника Безье и степень полинома.

Находим параметрические уравнения граничных кривых в концевой части межлопаточного канала $L^{к}(t)$, в корневой части $L^{д}(t)$, у входной $L^{вх}(t)$ и выходной кромки $L^{вых}(t)$ по выражению (3.8).

В итоге параметрическое уравнение поверхности спинки (корыта) относительно системы координат детали $X_д Y_д Z_д$ будет выглядеть следующим образом:

$$
\begin{aligned}
x_д^{с(к)}(u,v) &= \begin{bmatrix}1-u & u & 1\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix} -Lx_{с(к)}^{д}(0) & -Lx_{с(к)}^{вх}(1) & Lx_{с(к)}^{вх}(v) \\ -Lx_{с(к)}^{вых}(0) & -Lx_{с(к)}^{к}(1) & Lx_{с(к)}^{вых}(v) \\ Lx_{с(к)}^{д}(u) & Lx_{с(к)}^{к}(u) & 0 \end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}1-v \\ v \\ 1\end{bmatrix}; \\
y_д^{с(к)}(u,v) &= \begin{bmatrix}1-u & u & 1\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix} -Ly_{с(к)}^{д}(0) & -Ly_{с(к)}^{вх}(1) & Ly_{с(к)}^{вх}(v) \\ -Ly_{с(к)}^{вых}(0) & -Ly_{с(к)}^{к}(1) & Ly_{с(к)}^{вых}(v) \\ Ly_{с(к)}^{д}(u) & Ly_{с(к)}^{к}(u) & 0 \end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}1-v \\ v \\ 1\end{bmatrix}; \\
z_д^{с(к)}(u,v) &- \begin{bmatrix}1-u & u & 1\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix} -Lz_{с(к)}^{д}(0) & -Lz_{с(к)}^{вх}(1) & Lz_{с(к)}^{вх}(v) \\ -Lz_{с(к)}^{вых}(0) & -Lz_{с(к)}^{к}(1) & Lz_{с(к)}^{вых}(v) \\ Lz_{с(к)}^{д}(u) & Lz_{с(к)}^{к}(u) & 0 \end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}1-v \\ v \\ 1\end{bmatrix}.
\end{aligned}
\qquad (3.9)
$$

Параметрическая ось u направлена от входной до выходной кромки, а ось v от корневой к концевой части межлопаточного канала.

3.3.2. Моделирование движения кольцевого режущего инструмента при однокоординатном формообразовании межлопаточного канала

Детали, получаемые на станках, можно рассматривать как геометрические объекты. При изготовлении детали инструмент и заготовка перемещаются относительно друг друга по определенной траектории. Программа обработки описывает движение определенной точки инструмента – его центра $\boldsymbol{O}_{и}$ относительно системы координат станка *XYZ*. Для кольцевого инструмента данной точкой является центр окружности, образованной наружными кромками

при вращении инструмента и расположенной в торцевой плоскости ***П***, которая проходит через торцевые режущие кромки (рис. 3.12).

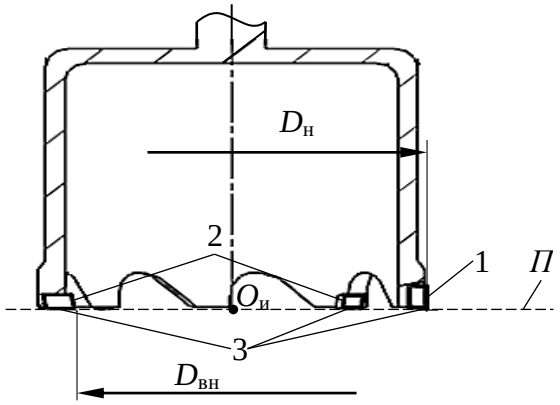


Рис. 3.12 Основные геометрические параметры кольцевого инструмента:
1 – наружные кромки; 2 – внутренние кромки; 3 – торцевые кромки;
$O_и$ – центр инструмента; *П* – плоскость в торцевой части инструмента;
$D_н$ – диаметр окружности образованной наружными кромками;
$D_{вн}$ – диаметр окружности образованной внутренними кромками;

При однокоординатном формообразовании межлопаточных каналов (см. рис. 3.1) заготовка устанавливается под углом $\alpha_у$, кольцевой инструмент в исходном положении находится на расстоянии $x_у$ и $y_у$ от базовой точки детали $O_д$. В процессе обработки инструмент перемещается по одной координате наружного диаметра моноколеса до дна межлопаточного канала.

Для уменьшения погрешности формообразования на дне межлопаточного канала со стороны входного сечения ***1*** и выходного сечения ***2*** плоскость ***П*** в торцевой части кольцевого инструмента должна быть параллельна конусу втулки осевого моноколеса (см. рис. 3.9). Это достигается поворотом заготовки вокруг оси $Y_д$ на угол установки $\alpha_у$. Значение угла установки $\alpha_у$ упрощенно можно определить по следующей формуле:

$$\alpha_у = \text{arctg}\left(\frac{D_{вт}^{вх} - D_{вт}^{вых}}{2 \cdot S_к}\right) \qquad (3.10)$$

где $D_{вт}^{вх}$ и $D_{вт}^{вых}$ – диаметр втулки моноколеса во входном и выходном сечениях; $S_к$ – ширина моноколеса.

Кроме того, для уменьшения погрешности формообразования на дне межлопаточного канала со стороны спинки и корыта, плоскость ***П*** должна проходить через граничные кривые поверхности спинки и корыта в концевой

части. Однако данные кривые не являются плоскими и поэтому через них невозможно провести плоскость. Поэтому плоскость ***П*** проходит через две самые удаленные друг от друга точки граничных кривых. Данными точками являются конечная точка граничной кривой поверхности спинки со стороны выходной кромки ***3*** и начальная точка граничной кривой поверхности корыта со стороны входной кромки ***4*** (рис. 3.13). Данное условие достигается условным поворотом заготовки вокруг оси $X_д$ на дополнительный угол $\omega_у$. Данный угол, в отличие от установочного $\alpha_{у,}$ не используется при базировании заготовки в станке. Дополнительный угол $\omega_у$ необходим только для определения положения центра инструмента относительно заготовки.

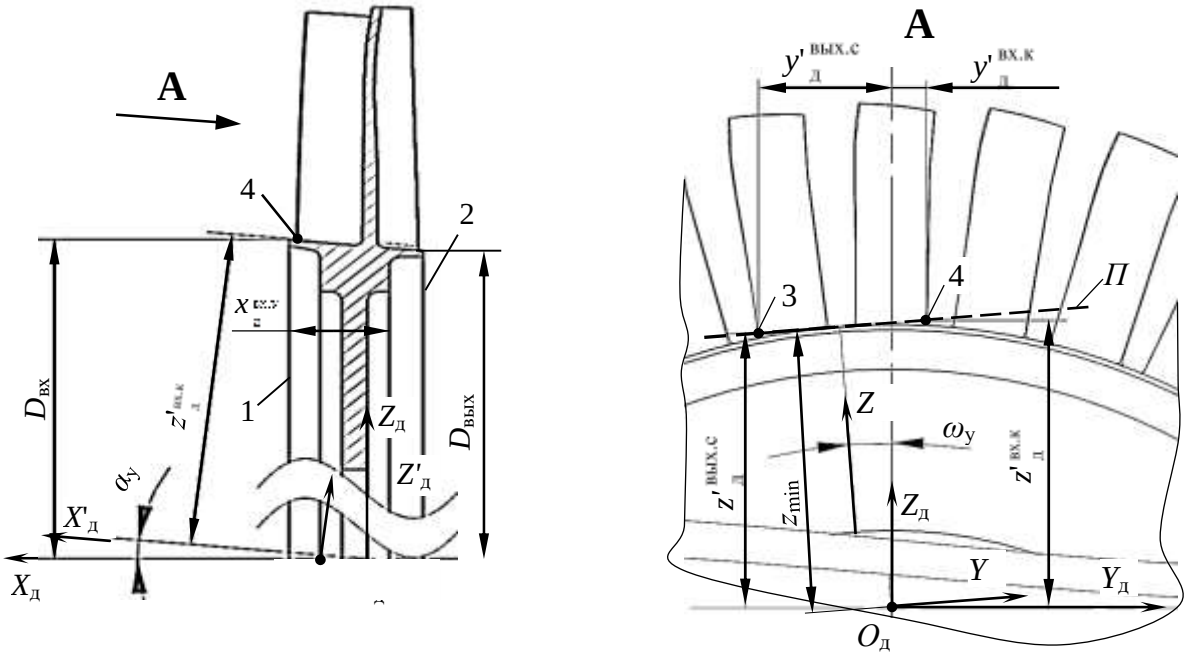


Рис. 3.13 Определение параметров установки при однокоординатной обработке межлопаточного канала кольцевым инструментом:
$X_д Y_д Z_д$ – система координат детали; XYZ – система координат станка; $O_д$ – базовая точка детали; *П* – торцевая плоскость инструмента при обработке дна межлопаточного канала; 1 – входное сечение; 2 – выходное сечение

Значение дополнительного угла $\omega_у$ определяется по следующему выражению (см. рис. 3.13):

$$\omega_у = \operatorname{arctg}\left(\left|\frac{z'^{вых.с}_д - z'^{вх.к}_д}{y'^{вых.с}_д - y'^{вх.к}_д}\right|\right) \qquad (3.11)$$

где – $\left[y'^{вых.с}_д; z'^{вых.с}_д\right]$ и $\left[y'^{вх.к}_д; z'^{вх.к}_д\right]$ – координаты точек граничных кривых относительно системы координат $X'_д Y'_д Z'_д$.

Параметрическая ось *u* направлена от входной кромки к выходной, а ось *v* от корневой части межлопаточного канала к концевой. Тогда по параметрическим уравнениям спинки и корыта (3.9) определим координаты точек граничных кривых относительно системы координат детали:

$$y_{д}^{вых.с}=y_{д}^{с}(0;1);\qquad z_{д}^{вых.с}=z_{д}^{с}(0;1)\qquad y_{д}^{вх.к}=y_{д}^{к}(0;0);\qquad z_{д}^{вх.к}=z_{д}^{к}(0;0). \tag{3.12}$$

Система координат $X'_{д}Y'_{д}Z'_{д}$ получена путем поворота системы координат детали $X_{д}Y_{д}Z_{д}$ вокруг оси $Y_{д}$ на угол установки $\alpha_{у}$. При этом координаты точки относительно $X'_{д}Y'_{д}Z'_{д}$ изменяются следующим образом:

$$x'=x\cos(\alpha_{у})-z\sin(\alpha_{у});\qquad y'=y;\qquad x'=z\cos(\alpha_{у})-x\sin(\alpha_{у}), \tag{3.13}$$

где [*x*, *y*, *z*] – координаты точки относительно системы координат детали $X_{д}Y_{д}Z_{д}$; [*x'*, *y'*, *z'*] – координаты точки относительно $X'_{д}Y'_{д}Z'_{д}$.

Подставив выражения (3.12) и (3.13) в формулу (3.11) получаем:

$$\omega_{у}=\operatorname{arctg}\left|\frac{\left(z_{д}^{к}(0,0)-z_{д}^{с}(1,0)\right)\cdot\cos(\alpha_{у})-\left(x_{д}^{к}(0,0)-x_{д}^{с}(1,0)\right)\cdot\sin(\alpha_{у})}{y_{д}^{к}(0,0)-y_{д}^{с}(1,0)}\right|. \tag{3.14}$$

Система координат станка *XYZ*, относительно которой будут заданы координаты перемещения центра кольцевого инструмента $O_{и}$, получена путем поворота системы координат $X_{д}Y_{д}Z_{д}$ вокруг оси $Y_{д}$ на угол $\alpha_{у}$, и последующего поворота вокруг оси $X'_{д}$ на угол $\omega_{у}$. Значение координат точек спинки и корыта относительно новой системы координат *XYZ* можно найти с помощью матрицы поворота [11]:

$$\begin{bmatrix}x\\y\\z\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos(\omega_{у}) & -\sin(\alpha_{у})\sin(\omega_{у}) & -\cos(\alpha_{у})\sin(\omega_{у})\\ 0 & \cos(\alpha_{у}) & -\sin(\alpha_{у})\\ \sin(\omega_{у}) & \sin(\alpha_{у})\cos(\omega_{у}) & \cos(\alpha_{у})\cos(\omega_{у})\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}x_{д}\\y_{д}\\z_{д}\end{bmatrix}. \tag{3.15}$$

Перед обработкой кольцевой инструмент устанавливают в исходное положение. При этом расстояние z_{max} от базовой точки детали $O_{д}$ до плоскости ***П*** находим как:

$$z_{max}\geq 0{,}5D_{к}^{вх}\cos(\alpha_{у})-S_{о}\sin(\alpha_{у}). \tag{3.16}$$

После чего инструменту сообщают поступательное движение вдоль оси Z до дна межлопаточного канала. Расстояние z_{min} от базовой точки детали $O_д$ до плоскости ***П*** (см. рис. 3.13) находим следующим образом:

$$z_{\min} = 0{,}5D_к^{вх}\cos(\alpha_у) + S_о\sin(\alpha_у) + \Delta, \tag{3.17}$$

где Δ – номинальный припуск на последующую обработку.

Рассмотрим взаимное расположение режущей части кольцевого инструмента ***1*** и заготовки ***2*** при обработке дна канала (рис. 3.14). При вращении наружные и внутренние режущие кромки инструмента представляют собой окружности ***3*** и ***4***. Диаметр окружности равен диаметру режущей части. Необходимо учесть, что после обработки должен остаться слой припуска на получистовую и чистовую обработку Δ. Тогда диаметр режущей части определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} D'_н &= D_н + 2\Delta; \\ D'_{вн} &= D_{вн} - 2\Delta, \end{aligned} \tag{3.18}$$

где $D_н$ и $D_{вн}$ – диаметры наружной и внутренней режущей части кольцевого инструмента; $D'_н$ и $D'_{вн}$ – диаметры режущей части инструмента с учетом припуска на последующую обработку Δ.

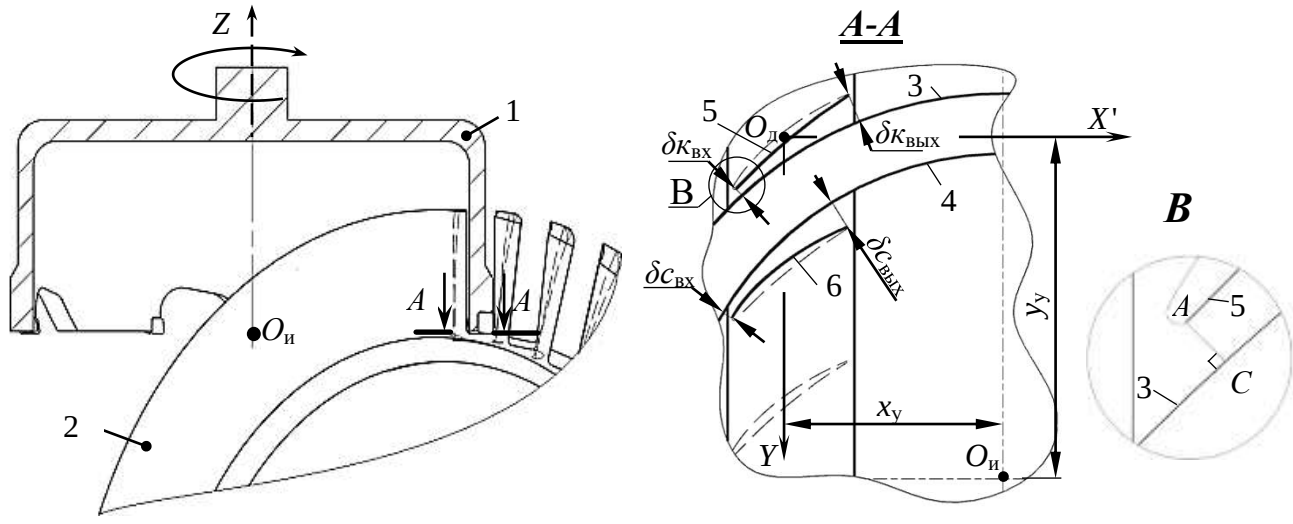


Рис. 3.14 Положение кольцевого инструмента в нижнем положении:
1 – наружная режущая кромка; 2 – внутренняя режущая кромка;
3 – сечение поверхности корыта в плоскости; 4 – сечение поверхности спинки в плоскости;
$O_д$ – базовая точка детали; $O_и$ – центр кольцевого инструмента; $x_у$ и $y_у$ – координаты центра инструмента относительно базовой точки детали

При пересечении плоскости ***П*** проходящей через торцевые режущие кромки кольцевого инструмента с поверхностями корыта и спинки межлопаточного канала образуются кривые ***5*** и ***6***.

При однокоординатной обработке реализуется метод копирования, и в заготовке образуется межлопаточный канал в виде кольцевой впадины. Разница между полученной впадиной и конфигурацией межлопаточного канала будет погрешностью формообразования.

Образованная погрешность формообразования должна быть минимальна. Поэтому положение кольцевого инструмента при формообразовании межлопаточного канала выбрано из условия, что после обработки погрешность формообразования на корыте $\delta к_{вх}$ и спинке $\delta с_{вх}$ со стороны входной и выходной кромок равны между собой ($\delta к_{вх} = \delta с_{вх} = \delta_{вх} = \delta к_{вых} = \delta с_{вых} = \delta_{вых}$) (см. рис. 3.14).

Проведем отрезок ***АС***, проходящий по нормали к наружной части режущей кромки ***1***, так чтобы точка ***А*** лежала на кривой пересечения плоскости и поверхности корыта ***3***, а точка *С* на окружности ***1***. Длина данного отрезка будет равна погрешности формообразования на корыте $\delta к$ в точке *А*. Расстояние *R* от центра кольцевого инструмента $О_и$ до произвольной точки корыта и спинки находим по следующему выражению (рис. 3.15):

$$\begin{aligned} R_{к_i} &= \frac{D_н}{2} + \Delta + \delta к_i; \\ R_{с_j} &= \frac{D_{вн}}{2} - \Delta - \delta с_j, \end{aligned} \qquad (3.19)$$

где $\delta к_i$ и $\delta с_j$ – погрешность формообразования на корыте и спинке в произвольных точках.

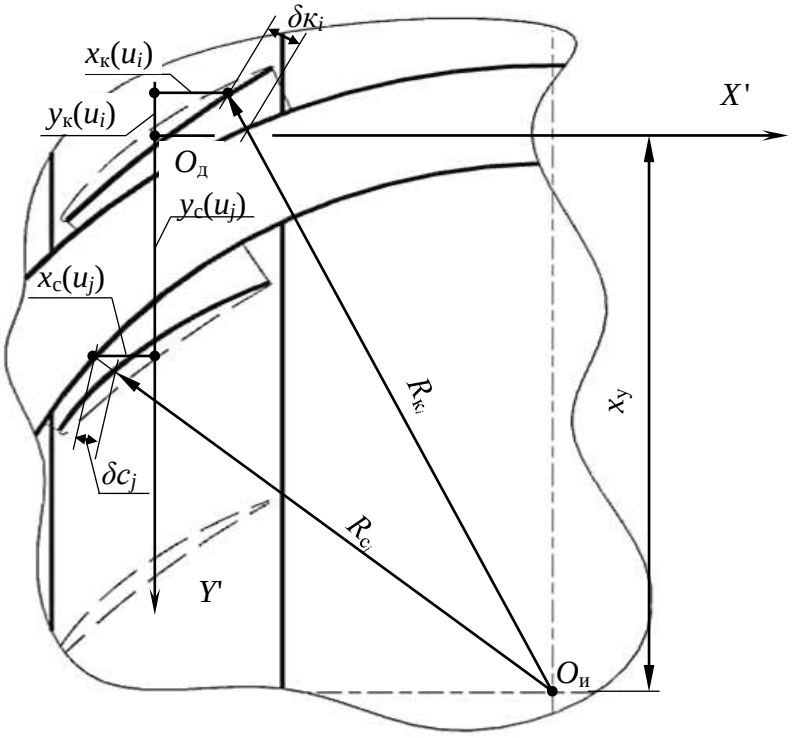


Рис. 3.15 Положение режущих кромок кольцевого инструмента в нижнем положении

Это же расстояние R можно определить через координаты центра кольцевого инструмента $O_и$ и координат произвольных точек корыта и спинки:

$$\begin{aligned} R_к &= \left(x_у - x_к(u_i)\right)^2 + \left(y_у - y_к(u_i)\right)^2; \\ R_с &= \left(x_у - x_с(u_j)\right)^2 + \left(y_у - y_с(u_j)\right)^2, \end{aligned} \tag{3.20}$$

где $x_у$ и $y_у$ – координаты центра кольцевого инструмента $O_и$ относительно системы координат XYZ (установочные размеры); $\{x_к(u); y_к(u)\}$ и $\{x_с(u); y_с(u)\}$ – параметрические уравнения кривых пересечения плоскости $\boldsymbol{П}$ и поверхности корыта и спинки межлопаточного канала относительно системы координат $X'Y'Z'$; u_i и u_j – значения параметра уравнения в произвольных точках корыта и спинки.

Приравняв выражения (3.19) и (3.20) с учетом условия равенства погрешности формообразования со стороны входной кромки ($\delta\kappa_{вх} = \delta c_{вх} = \delta_{вх}$) и со стороны выходной кромки ($\delta\kappa_{вых} = \delta c_{вых} = \delta_{вых}$) находим значения установочных размеров $x_у$ и $y_у$:

$$\begin{cases} \left(x_{\text{у}} - x_{\text{к}}(0)\right)^2 + \left(y_{\text{у}} - y_{\text{к}}(0)\right)^2 = \left(\dfrac{D_{\text{н}}}{2} + \Delta + \delta_{\text{вх}}\right)^2; \\ \left(x_{\text{у}} - x_{\text{с}}(0)\right)^2 + \left(y_{\text{у}} - y_{\text{с}}(0)\right)^2 = \left(\dfrac{D_{\text{вн}}}{2} - \Delta - \delta_{\text{вх}}\right)^2; \\ \left(x_{\text{у}} - x_{\text{к}}(1)\right)^2 + \left(y_{\text{у}} - y_{\text{к}}(1)\right)^2 = \left(\dfrac{D_{\text{н}}}{2} + \Delta + \delta_{\text{вых}}\right)^2; \\ \left(x_{\text{у}} - x_{\text{с}}(1)\right)^2 + \left(y_{\text{у}} - y_{\text{с}}(1)\right)^2 = \left(\dfrac{D_{\text{вн}}}{2} - \Delta - \delta_{\text{вых}}\right)^2, \end{cases} \quad (3.\ 21)$$

Чтобы определить уравнения кривых, полученных при пересечении поверхности спинки и корыта с плоскостью ***П*** $\{x_{\text{к}}(t);\ y_{\text{к}}(t)\}$ и $\{x_{\text{с}}(t);\ y_{\text{с}}(t)\}$, необходимо найти взаимосвязь между параметрами v и u. Так как плоскость ***П*** смещена от координатной плоскости $X'O_{\text{д}}Y'$ на расстояние $z_{\min}$, то с учетом матрицы поворота (3.15) запишем:

$$Y_{\text{с(к)}}(u,v)\sin(\omega_{\text{у}}) + X_{\text{с(к)}}(u,v)\sin(\alpha_{\text{у}})\cos(\omega_{\text{у}}) + Z_{\text{с(к)}}(u,v)\cos(\alpha_{\text{у}})\cos(\omega_{\text{у}}) = z_{\min}. \quad (3.22)$$

С помощью уравнения (3.22) находим зависимость значения параметра v от параметра u, углов $\alpha_{\text{у}}$ и $\omega_{\text{у}}$ и значения $z_{\min}$ вида:

$$v = f(u). \quad (3.23)$$

Подставив зависимость (3.23) в параметрические уравнения поверхности (3.9) с учетом матрицы поворота (3.15) получаем параметрические уравнения кривых пересечения поверхности корыта и спинки, с плоскостью резания $П$:

$$\begin{aligned} x(u) &= X\left(u, f(u)\right)\cos(\omega_{\text{у}}) - \sin(\omega_{\text{у}})\left(Y\left(u, f(u)\right)\sin(\alpha_{\text{у}}) + Z\left(u, f(u)\right)\cos(\alpha_{\text{у}})\right); \\ y(u) &= Y\left(u, f(u)\right)\cos(\alpha_{\text{у}}) + Z\left(u, f(u)\right)\sin(\alpha_{\text{у}}). \end{aligned} \quad (3.24)$$

Поверхность пера лопатки имеет нелинейчатую форму и закрутку, поэтому необходимо учитывать, что при найденных установочных значениях $x_{\text{у}}$ и $y_{\text{у}}$, возможен зарез поверхности корыта или спинки в некотором сечении.

Для исключения зареза рассмотрим взаимное положение проекций концевой части межлопаточного канала ***4***, входных (***5*** и **7**) и выходных кромок (***6*** и ***8***) на плоскость $П$ и режущей части кольцевого инструмента (**2** и **3**) (рис. 3.16).

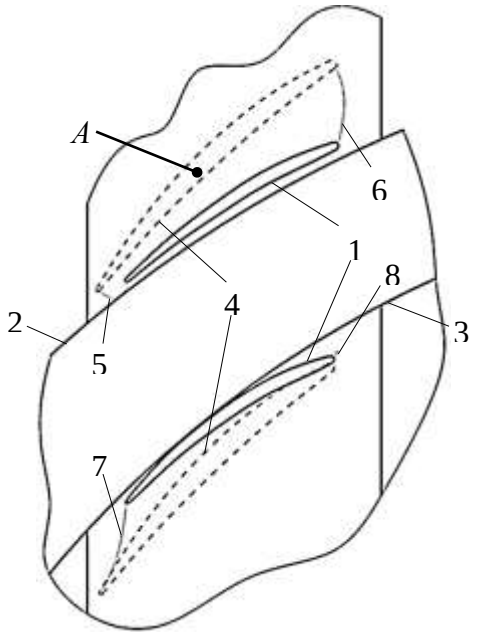


Рис. 3.16 Проекция межлопаточного канала на плоскость *П*:
1 – кривые пересечения межлопаточного канала с плоскостью *П*; 2 и 3 – наружная и внутренняя режущая часть инструмента; 4 – проекции концевой части профилей на плоскость *П*;
5 и 6 – проекции входной и выходной кромки корыта на плоскость *П*; 7 и 8 – проекции входной и выходной кромки спинки на плоскость *П*;

Ближе всего из проекций к режущим кромкам (***2*** и ***3***) располагаются кромки межлопаточного канала ***(5, 6, 7*** и ***8)***. Поэтому при определении x_y и y_y необходимо учитывать, что минимальное расстояние режущих кромок до данных проекций должно быть больше нуля.

Уравнение проекций кривых на плоскость *П* имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} x(u) &= X(t,u)\cos(\omega_y) - \sin(\omega_y)\left(Y(t,u)\sin(\alpha_y) + Z(t,u)\cos(\alpha_y)\right); \\ y(u) &= Y(t,u)\cos(\alpha_y) + Z(t,u)\sin(\alpha_y), \end{aligned} \qquad (3.25)$$

где $t = 0$ для проекции входной кромки; $t = 1$ для проекции выходной кромки.

В итоге условие, что при обработке межлопаточного канала отсутствует зарез поверхности кольцевой фрезой, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \left(x_{\text{у}} - x_{\text{к}}^{\text{вх(вых)}}(u_{1(2)})\right)^2 + \left(y_{\text{у}} - y_{\text{к}}^{\text{вх(вых)}}(u_{1(2)})\right)^2 \geq \left(\dfrac{D_{\text{н}}}{2} + \Delta\right)^2; \\ \dfrac{\dfrac{d}{du}x_{\text{к}}^{\text{вх(вых)}}(u_{1(2)})}{\dfrac{d}{du}y_{\text{к}}^{\text{вх(вых)}}(u_{1(2)})} = -\dfrac{y_{\text{у}} - y_{\text{к}}^{\text{вх(вых)}}(u_{1(2)})}{x_{\text{у}} - x_{\text{к}}^{\text{вх(вых)}}(u_{1(2)})}; \\ \left(x_{\text{у}} - x_{\text{с}}^{\text{вх(вых)}}(u_{3(4)})\right)^2 + \left(y_{\text{у}} - y_{\text{с}}^{\text{вх(вых)}}(u_{3(4)})\right)^2 \leq \left(\dfrac{D_{\text{вн}}}{2} - \Delta\right)^2; \\ \dfrac{\dfrac{d}{du}x_{\text{с}}^{\text{вх(вых)}}(u_{3(4)})}{\dfrac{d}{du}y_{\text{с}}^{\text{вх(вых)}}(u_{3(4)})} = -\dfrac{y_{\text{у}} - y_{\text{с}}^{\text{вх(вых)}}(u_{3(4)})}{x_{\text{у}} - x_{\text{с}}^{\text{вх(вых)}}(u_{3(4)})}, \end{cases} \quad (3.26)$$

где $\left\{x_{\text{к}}^{\text{вх(вых)}}(u);\, y_{\text{к}}^{\text{вх(вых)}}(u)\right\}$ и $\left\{x_{\text{с}}^{\text{вх(вых)}}(u);\, y_{\text{с}}^{\text{вх(вых)}}(u)\right\}$ – параметрические уравнения проекций входной (выходной) кромки корыта и спинки на плоскость *П*, найденные из выражения (3.25).

В итоге для подготовки однокоординатной обработки межлопаточных каналов кольцевым режущим инструментом необходимо по формуле (3.10) определить угол $\alpha_{\text{у}}$ между осью вращения инструмента и осью заготовки, найти координаты центра кольцевого инструмента ($x_{\text{у}}$ и $y_{\text{у}}$) относительно базовой точки детали $O_{\text{д}}$ из систем уравнения (3.21) и (3.26), а также рассчитать предельные значения хода инструмента $z_{\max}$ и $z_{\min}$ по выражениям (3.16) и (3.17).

Получить решение системы уравнений (3.21) и (3.26) можно также в CAD/CAM- системе графо-аналитическим методом:

1. Строим плоскость резания ***П*** в корневой части межлопаточного канала осевого моноколеса по следующему алгоритму:

а) через точку $O_{\text{д}}$ начала системы координат детали $X_{\text{д}}Y_{\text{д}}Z_{\text{д}}$ проводим ось X' в плоскости $X_{\text{д}}O_{\text{д}}Z_{\text{д}}$ под углом $\alpha_{\text{у}}$ к оси $X_{\text{д}}$ (рис. 3.17);

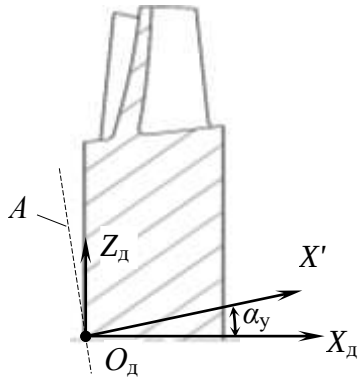


Рис. 3.17 Построение плоскости А

b) через точку $O_д$ строим плоскость *A* перпендикулярную оси *X'*;

c) в плоскости *A* строим проекции на плоскость выходной комки спинки ***1*** и входной комки корыта ***2*** (рис. 3.18);

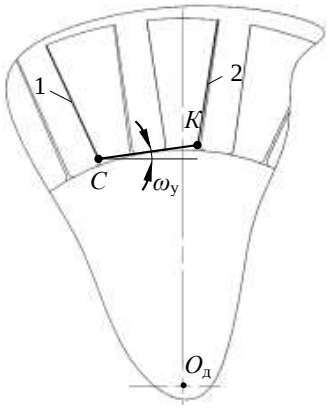


Рис. 3.18 Определение значение угла $\omega_у$ графо-аналитическим способом:
1 и 2 – проекции выходная кромка спинки и входная кромка корыта

d) в плоскости *A* через точки кривых ***1*** и ***2*** в корневой части проводим отрезок ***CK*** (рис. 3.18);

e) через точку $O_д$ перпендикулярно отрезку ***CK*** проводим линию $O_дB$, длина которой равна z_{min} (рис. 3.19);

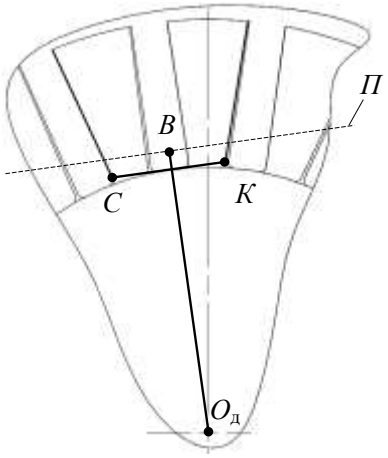


Рис. 3.19 Построение плоскости резания *П*

f) через точку *B* строим плоскость резания *П* перпендикулярную отрезку $O_д B$. (см. рис. 3.19).

2. В плоскости резания *П* создаются кривые пересечения поверхностей межлопаточного канал и проекции кромок межлопаточного канала на плоскость *П* (см. рис. 3.16).

3. С учетом положения полученных кривых и проекций положение кольцевого инструмента находится по двум вариантам:

a) положение выбрано из условия равенства напуска у входной кромки корыта $\delta к_{вх}$ и спинки $\delta с_{вх}$, а также у выходной кромки ($\delta к_{вых} = \delta с_{вых}$) (см. рис. 3.14). При этом режущие кромки не пересекают проекции кромок межлопаточного канала;

b) если же режущие кромки пересекают хотя бы одну из проекций кромок межлопаточного канала, то вместо условия равенства напуска у кромок, принимается, что режущая кромка либо касательна к пересекаемой проекции, либо проходит через ближайшую точку проекции (см. рис. 3.16).

Графо-аналитический способ определения значения размеров $x_у$ и $y_у$ более точен по сравнению с аналитическим в виду того, что во втором способе поверхности межлопаточного канала упрощены до линейчатых поверхностей Безье, а также не учитываются поверхности кромок пера лопатки.

3.3.3 Моделирование движения кольцевого режущего инструмента при формообразовании межлопаточного канала с управлением по двум координатам

При обработке межлопаточных каналов по схеме с управлением по двум координатам (см. рис. 3.2) кольцевой инструмент и заготовка устанавливаются аналогично предыдущей схеме, но в процессе формообразования при движении инструмента вдоль оси *Z* от z_{max} до z_{min} происходит согласованное вращение заготовки моноколеса S_ω.

Для определения значения угловой координаты ω от положения инструмента в процессе обработки по координате *Z* рассмотрим взаимное

расположение режущих кромок инструмента (***1*** и ***2***) и поверхностей межлопаточного канала (***3*** и ***4***) при обработке корыта в произвольной плоскости резания *П'*, которая смещена от координатной плоскости $X'O_дY'$ на расстояние *z* (рис. 3.20).

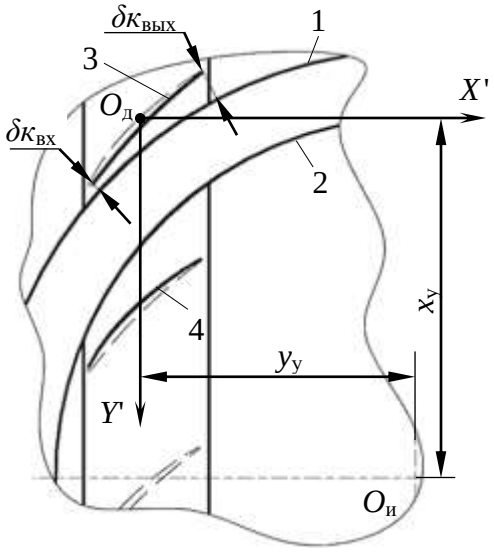


Рис. 3.20 Положение кольцевого инструмента при обработке корыта:
1 и 2 – наружная и внутренняя режущие части инструмента; 3 и 4 – сечения поверхности корыта и спинки в плоскости

При обработке корыта погрешность формообразования, определяемая как разница между профилем корыта ***3*** и наружной режущей частью инструмента ***1***, должна быть минимальной. Исходя из конструктивных особенностей осевого моноколеса данное условие достигается при $\delta\kappa_{вх} = 0$. Используя полученные ранее выражения (3.21) – (3.24) можно определить взаимосвязь между значением угловой координаты ω от значения координаты *z* при обработке корыта:

$$\begin{cases} X_к(0,v)\sin(\omega) + Y_к(0,v)\sin(\alpha_у)\cos(\omega) + Z_к(0,v)\cos(\alpha_у)\cos(\omega) = z; \\ \left(x_у - x_{вх}\right)^2 + \left(y_у - y_{вх}\right)^2 = \left(\dfrac{D_н}{2} + \Delta\right)^2, \end{cases} \tag{3.27}$$

где $D_н$ – наружный диаметр режущей части; ω – управляемая координата;

$$x_{вх} = \cos(\omega)X_к(0,v) + \sin(\omega)\left(\sin(\alpha_у)Y_к(0,v) + \cos(\alpha_у)Z_к(0,v)\right);$$

$$y_{вх} = \cos(\alpha_у)Y_к(0,v) - \sin(\alpha_у)X_к(0,v).$$

При определении значений ω необходимо также определить допустимую область положения инструмента для исключения возможности зареза с поверхностями заготовки. Рассмотрим положение режущего элемента,

образующего наружную часть режущей кромки кольцевого инструмента и пера лопатки при обработке корыта (рис. 3.21).

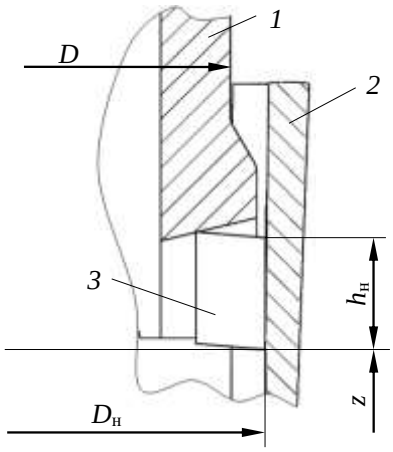


Рис. 3.21 Положение режущего элемента кольцевого инструмента при обработке корыта: 1 – кольцевой инструмент; 2 – перо лопатки; 3 – режущий элемент

Так как при определении значений ω принимается, что толщина слоя напуска со стороны входной кромки равно нулю ($\delta\kappa_{вх} = 0$), то условие отсутствия зареза поверхности межлопаточного канала с кольцевым режущим инструментом фрезой, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \left(x_у - x_{вх}\right)^2 + \left(y_у - y_{вх}\right)^2 \geq \left(\dfrac{D_н}{2} + \Delta\right)^2; \\ X_к(0,v)\sin(\omega) + Y_к(0,v)\sin(\alpha_у)\cos(\omega) + Z_к(0,v)\cos(\alpha_у)\cos(\omega) = z + h_н, \end{cases} \tag{3.28}$$

где $h_н$ – высота наружной режущей кромки.

Используя ранее полученные зависимости (3.27) и (3.28) запишем взаимосвязь между значением угловой координаты ω от значения координаты z при обработке спинки:

$$\begin{cases} X_с(0,v)\sin(\omega) + Y_с(0,v)\sin(\alpha_у)\cos(\omega) + Z_с(0,v)\cos(\alpha_у)\cos(\omega) = z; \\ \left(x_у - x_{вх}\right)^2 + \left(y_у - y_{вх}\right)^2 = \left(\dfrac{D_{вн}}{2} - \Delta\right)^2, \end{cases} \tag{3.29}$$

где ω – управляемая координата;

$$x_{вх} = \cos(\omega)X_с(0,v) + \sin(\omega)\left(\sin(\alpha_у)Y_с(0,v) + \cos(\alpha_у)Z_к(0,v)\right);$$

$$y_{вх} = \cos(\alpha_у)Y_с(0,v) - \sin(\alpha_у)X_с(0,v).$$

При этом допустимая область ограничивается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \left(x_{\text{у}} - x_{\text{вх}}\right)^2 + \left(y_{\text{у}} - y_{\text{вх}}\right)^2 \geq \left(\dfrac{D_{\text{вн}}}{2} - \Delta\right)^2; \\ X_{\text{с}}(0,v)\sin(\omega) + Y_{\text{с}}(0,v)\sin(\alpha_{\text{у}})\cos(\omega) + Z_{\text{с}}(0,v)\cos(\alpha_{\text{у}})\cos(\omega) = z' + h_{\text{вн}}, \end{cases} \quad (3.30)$$

где $h_{\text{вн}}$ – высота внутренней режущей кромки.

Для обработки межлопаточных каналов по схеме с управлением по двум координатам (см. рис. 3.3) необходимо получить математическую модель управления кольцевого инструмента вида:

$$\begin{aligned} z &= f_1(t); \\ \omega &= f_2(t), \end{aligned} \quad (3.31)$$

где t = [0;1] – параметр;

Так как кольцевой инструмент при обработке по оси Z перемещается прямолинейно от $z_{\max}$ до $z_{\min}$, то можно записать следующую зависимость:

$$z' = z_{\min} + \left(z_{\max} - z_{\min}\right)t, \quad (3.32)$$

Установочные размеры обработки рассчитывается также как и ранее. По формуле (3.10) определяем угол $\alpha_{\text{у}}$ между осью вращения инструмента и осью заготовки, находим значения смещения центра кольцевого инструмента $O_{\text{и}}$ относительно базовой точки детали $O_{\text{д}}$ ($x_{\text{у}}$ и $y_{\text{у}}$) из систем уравнения (3.21) и (3.26), а также рассчитываем предельные значения хода инструмента $z_{\max}$ и $z_{\min}$ по выражениям (3.16) и (3.17).

Взаимосвязь между значением угловой координаты ω и параметром t при обработке межлопаточного канала моноколеса находим из систем уравнений (3.27) и (3.28), при обработке корыта (3.29) и (3.30). Но, как и в предыдущем случае, получить решение можно в CAD/CAM-системе графо-аналитическим методом по следующему алгоритму:

1. Строим плоскость резания $П'$ в корневой части межлопаточного канала осевого моноколеса по следующему алгоритму:

a) через точку $O_{\text{д}}$ начала системы координат детали $X_{\text{д}}Y_{\text{д}}Z_{\text{д}}$ проводим ось X' в плоскости $X_{\text{д}}O_{\text{д}}Z_{\text{д}}$ под углом $\alpha_{\text{у}}$ к оси $X_{\text{д}}$ (рис. 3.22);

b) через точку $O_{\text{д}}$ строим плоскость A перпендикулярную оси X';

c) через точку $O_д$ перпендикулярно под произвольным углом ω к оси Z создаем линию $O_дB$, длина z' которой рассчитывается по выражению (3.24):

d) через точку B строим плоскость резания $П'$ перпендикулярную отрезку $O_дB$. (рис. 3.22).

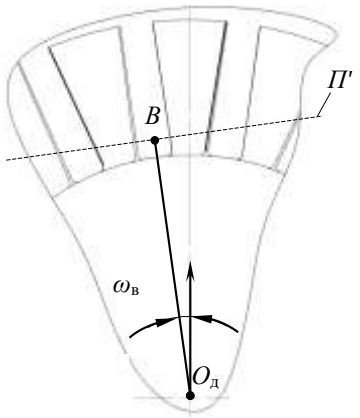


Рис. 3.22 Построение плоскости резания $П'$

2. В плоскости резания $П'$ центр кольцевого режущего инструмента будет находиться согласно ранее рассчитанным координатам ($x_у$ и $y_у$).

3. Создаем упрощенную модель кольцевого режущего инструмента согласно его положению в плоскости резания $П'$ (рис. 3.23)

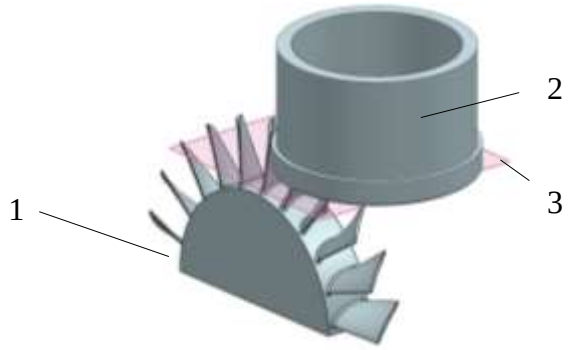


Рис. 3.23 Математические модели детали и кольцевого режущего инструмента:
1 – математическая модель моноколеса; 2 – упрощенная математическая модель кольцевого режущего инструмента; 3 – плоскость резания П'

4. Для контроля отсутствия зареза и столкновений во время обработки межлопаточного канала создается тело пересечения математической модели моноколеса и кольцевого инструмента (рис. 3.24), и определяется объем полученного пересечения V.

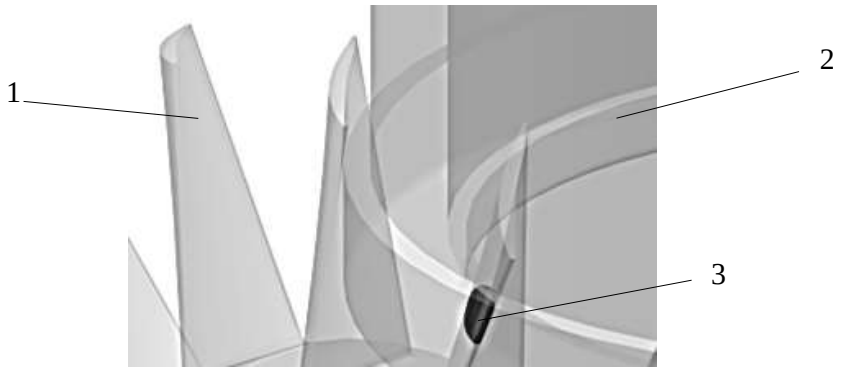


Рис. 3.24 Пересечение детали и кольцевого инструмента в процессе обработки:
1 – математическая модель моноколеса; 2 – упрощенная математическая модель инструмента; 3 – тело пересечения модели моноколеса и инструмента

5. С помощью инструментов анализа CAD-системы находим значение максимального напуска Δ_{max} обрабатываемой поверхности межлопаточного канала в плоскости резания $П'$.

6. Проводим оптимизацию полученной системы математических моделей, при этом:

– критерием оптимизации является значение максимального напуска $\Delta_{max} \rightarrow \min$;

– изменяемым параметром системы служит угол ω к оси Z;

– допустимое множество изменяемого параметра системы ограничиваем условием, что объем пересечения математической модели моноколеса и кольцевого инструмента равно нулю ($V = 0$).

7. Далее изменяется значение параметра t и повторяем все шаги алгоритма.

В итоге получаем зависимость вида:

$$\omega = f_2(t). \qquad (3.33)$$

Зависимости (3.32) и (3.33) являются математической моделью управления кольцевого инструмента по двум координатам при обработке поверхностей межлопаточного канала

3.3.4. Моделирование движения кольцевого режущего инструмента при формообразовании межлопаточного канала с управлением по трем координатам

При обработке межлопаточных каналов по схеме с управлением по трем координатам (см. рис. 3.3) кроме определения зависимости значения угловой координаты ω от положения кольцевой фрезы по координате Z' необходимо дополнительно найти изменение положения кольцевого инструмента по координате X'. Поэтому принимаем, что напуск на входной $\delta\kappa_{\text{вх}}$ и выходной кромке $\delta\kappa_{\text{вых}}$ равен нулю.

Используя полученные ранее выражения можно определить взаимосвязь между значением угловой координаты ω и линейной координаты x от значения координаты z при обработке корыта:

$$\begin{cases} X_{\text{к}}(0,v_{\text{вх}})\sin(\omega)+Y_{\text{к}}(0,v_{\text{вх}})\sin(\alpha_{\text{у}})\cos(\omega)+Z_{\text{к}}(0,v_{\text{вх}})\cos(\alpha_{\text{у}})\cos(\omega)=z; \\ (x-x_{\text{вх}})^2+(y_{\text{у}}-y_{\text{вх}})^2=\left(\dfrac{D_{\text{н}}}{2}+\Delta\right)^2; \\ X_{\text{к}}(1,v_{\text{вых}})\sin(\omega)+Y_{\text{к}}(1,v_{\text{вых}})\sin(\alpha_{\text{у}})\cos(\omega)+Z_{\text{к}}(1,v_{\text{вых}})\cos(\alpha_{\text{у}})\cos(\omega)=z; \\ (x-x_{\text{вых}})^2+(y_{\text{у}}-y_{\text{вых}})^2=\left(\dfrac{D_{\text{н}}}{2}+\Delta\right)^2, \end{cases} \tag{3.34}$$

где $x_{\text{вых}}=\cos(\omega)X_{\text{к}}(1,v_{\text{вых}})+\sin(\omega)\left(\sin(\alpha_{\text{у}})Y_{\text{к}}(1,v_{\text{вых}})+\cos(\alpha_{\text{у}})Z_{\text{к}}(1,v_{\text{вых}})\right)$;

$y_{\text{вых}}=\cos(\alpha_{\text{у}})Y_{\text{к}}(1,v_{\text{вых}})-\sin(\alpha_{\text{у}})X_{\text{к}}(1,v_{\text{вых}})$.

Условие отсутствия зареза корыта кольцевым инструмента примет следующий вид:

$$\begin{cases} (x-x_{\text{вх}})^2+(y_{\text{у}}-y_{\text{вх}})^2\geq\left(\dfrac{D_{\text{н}}}{2}+\Delta\right)^2; \\ X_{\text{к}}(0,v_{\text{вх}})\sin(\omega)+Y_{\text{к}}(0,v_{\text{вх}})\sin(\alpha_{\text{у}})\cos(\omega)+Z_{\text{к}}(0,v_{\text{вх}})\cos(\alpha_{\text{у}})\cos(\omega)=z+h_{\text{н}}; \\ (x-x_{\text{вых}})^2+(y_{\text{у}}-y_{\text{вых}})^2\geq\left(\dfrac{D_{\text{н}}}{2}+\Delta\right)^2; \\ X_{\text{к}}(1,v_{\text{вых}})\sin(\omega)+Y_{\text{к}}(1,v_{\text{вых}})\sin(\alpha_{\text{у}})\cos(\omega)+Z_{\text{к}}(1,v_{\text{вых}})\cos(\alpha_{\text{у}})\cos(\omega)=z+h_{\text{н}}, \end{cases} \tag{3.35}$$

Аналогично находим взаимосвязь между значением угловой координаты ω и линейной координаты x от значения координаты z при обработке спинки:

$$\begin{cases} X_c(0,v_{вх})\sin(\omega)+Y_c(0,v_{вх})\sin(\alpha_y)\cos(\omega)+Z_c(0,v_{вх})\cos(\alpha_y)\cos(\omega)=z; \\ (x-x_{вх})^2+(y_y-y_{вх})^2=\left(\frac{D_{вн}}{2}-\Delta\right)^2; \\ X_c(1,v_{вых})\sin(\omega)+Y_c(1,v_{вых})\sin(\alpha_y)\cos(\omega)+Z_c(1,v_{вых})\cos(\alpha_y)\cos(\omega)=z; \\ (x-x_{вых})^2+(y_y-y_{вых})^2=\left(\frac{D_{вн}}{2}-\Delta\right)^2, \end{cases} \quad (3.36)$$

где $x_{вых}=\cos(\omega)X_c(1,v_{вых})+\sin(\omega)\left(\sin(\alpha_y)Y_c(1,v_{вых})+\cos(\alpha_y)Z_c(1,v_{вых})\right);$

$y_{вых}=\cos(\alpha_y)Y_c(1,v_{вых})-\sin(\alpha_y)X_c(1,v_{вых}).$

Условие отсутствия зареза поверхности спинки кольцевым инструментом примет следующий вид:

$$\begin{cases} (x-x_{вх})^2+(y_y-y_{вх})^2\geq\left(\frac{D_{вн}}{2}-\Delta\right)^2; \\ X_c(0,v_{вх})\sin(\omega)+Y_c(0,v_{вх})\sin(\alpha_y)\cos(\omega)+Z_c(0,v_{вх})\cos(\alpha_y)\cos(\omega)=z+h_{вн}; \\ (x-x_{вых})^2+(y_y-y_{вых})^2\geq\left(\frac{D_{вн}}{2}-\Delta\right)^2; \\ X_c(1,v_{вых})\sin(\omega)+Y_c(1,v_{вых})\sin(\alpha_y)\cos(\omega)+Z_c(1,v_{вых})\cos(\alpha_y)\cos(\omega)=z+h_{вн}, \end{cases} \quad (3.37)$$

Для обработки поверхностей межлопаточного канала кольцевым режущим инструмента по трем координатам необходимо найти значения установочных размеров (α_y, z_{max}, z_{min}, y_y) и получить математическую модель управления кольцевого инструмента вида:

$$\begin{array}{l} z=f_1(t); \\ \omega_в=f_2(t); \\ x=f_3(t). \end{array} \quad (3.38)$$

Установочные размеры обработки рассчитывается также как и при одно-двухкоординатной обработке. Взаимосвязи (3.38) от параметра t находим из систем уравнений (3.34) – (3.37).

Алгоритм получения решения графо-аналитическим методом в CAD-системе схож с алгоритмом приведенным в параграфе 3.3.3 с небольшими изменениями:

– центр кольцевого режущего инструмента плоскости резания $П'$ (2 шаг) будет находиться согласно ранее рассчитанного установочного размера y_y и

условия, что напуск на входной $\delta\kappa_{вх}$ и выходной кромке $\delta\kappa_{вых}$ минимально возможный (см. рис. 3.16).

– кроме определения значения максимального напуска δ_{max} обрабатываемой поверхности (5 шаг), дополнительно находим с помощью инструментов анализа CAD-системы значение координаты *x* центра кольцевого инструмента в плоскости резания *П'*.

Остальные шаги алгоритма проводятся без изменений. Кроме того, следует упомянуть, что на точность обработки будет влиять значения шага изменения параметра *t* при определении зависимостей.

3.3.5 Моделирование движения кольцевого режущего инструмента при четырех и пяти осевой обработки межлопаточного канала

Современные CAM-системы позволяют производить автоматизированный расчет управления движением инструмента. При этом используется кинематические схемы с управлением трех линейных координат и одной или двух угловых. Поэтому для возможности автоматизации подготовки управляющей программы обработки кольцевым инструментом с использованием современных CAD/CAM систем необходимо использовать схему четырех или пятиосевой обработки (см. рис. 3.4 и 3.5).

Одним из главных недостатков технологии формообразования межлопаточных каналов является отсутствие автоматизированных методик управления движением кольцевого инструмента, ручной же расчет очень трудоемок и требует большой квалификации технолога.

Современные CAM-системы позволяют рассчитать траекторию движения инструмента имеющего внешнюю и торцевую режущую часть. И поэтому необходимо произвести дополнительные построения, чтобы система учитывала внутреннюю режущую часть.

Рассмотрим положение центра инструмента O_i при обработке спинки внутренними режущими кромками, представленные в виде окружности ***2***, в

произвольном сечении (рис. 3.25). При формообразовании поверхности в точке C_i вектор $\overrightarrow{O_iC_i}$ проходит по нормали к поверхности спинки.

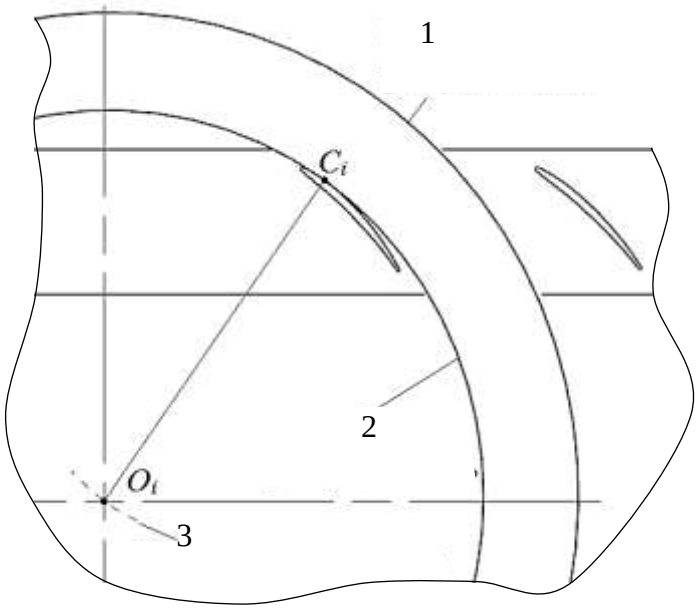


Рис. 3.25 Положение кольцевого инструмента при обработке поверхности спинки:
1 и 2 – наружная и внутренняя режущие части инструмента; 3 – траектория движения инструмента при обработки спинки

Совокупность точек O_i представляет собой траекторию движения кольцевого инструмента ***3*** при обработке спинки в произвольном сечении, которую можно определить из следующего выражения:

$$\begin{aligned} x &= X_c(u,v) - \frac{D_{вн} A_c}{2\sqrt{A_c^2 + B_c^2 + C_c^2}}; \\ y &= Y_c(u,v) - \frac{D_{вн} B_c}{2\sqrt{A_c^2 + B_c^2 + C_c^2}}; \\ z &= Z_c(u,v) - \frac{D_{вн} C_c}{2\sqrt{A_c^2 + B_c^2 + C_c^2}}. \end{aligned} \qquad (3.40)$$

Проведем из точки O_i вектор $\overrightarrow{O_iK_i}$ параллельно вектору $\overrightarrow{O_iC_i}$, но в противоположном направлении длиной равной половине наружного диаметра режущей части ***1*** (рис. 3.26). Точка K_i будет располагаться на наружной режущей части ***1***, при этом эта точка также лежит на некоторой поверхности "псевдо"-спинки ***3***, при этом вектор $\overrightarrow{O_iK_i}$ расположен по нормали к этой поверхности в точке K_i (рис. 3.26).

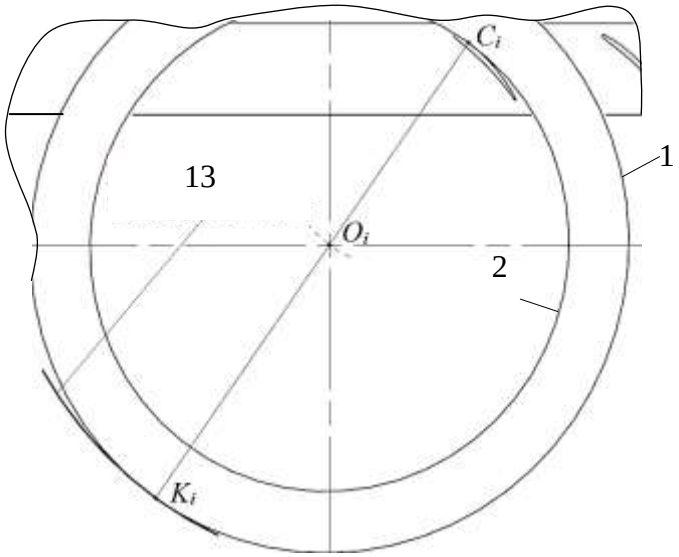


Рис. 3.26. Поверхность "псевдо"-спинки:
1 и 2 – наружная и внутренняя режущие части инструмента; 3 – поверхность "псевдо"-спинки

Тогда выражение (3.29) можно перезаписать следующим образом:

$$\begin{aligned} x &= X_{\text{П}}(u,v) + \frac{D_{\text{н}} A_{\text{П}}}{2\sqrt{A_{\text{П}}^{\,2} + B_{\text{П}}^{\,2} + C_{\text{П}}^{\,2}}}; \\ y &= Y_{\text{П}}(u,v) + \frac{D_{\text{н}} B_{\text{П}}}{2\sqrt{A_{\text{П}}^{\,2} + B_{\text{П}}^{\,2} + C_{\text{П}}^{\,2}}}; \\ z &= Z_{\text{П}}(u,v) + \frac{D_{\text{н}} C_{\text{П}}}{2\sqrt{A_{\text{П}}^{\,2} + B_{\text{П}}^{\,2} + C_{\text{П}}^{\,2}}}, \end{aligned} \tag{3.41}$$

где $[\varphi_{\text{п}}(u,v);\ \psi_{\text{п}}(u,v);\ \chi_{\text{п}}(u,v)]$ – параметрическое представление "псевдо"-спинки.

Для построения этой поверхности приравняем правые части выражений (3.40) и (3.41). В итоге с учетом того, что векторы $\overrightarrow{O_i K_i}$ и $\overrightarrow{O_i C_i}$ параллельны получаем:

$$\begin{aligned} X_{\text{П}}(u,v) &= X_{\text{с}}(u,v) - \frac{(D_{\text{вн}} + D_{\text{н}}) A_{\text{с}}}{2\sqrt{A_{\text{с}}^{\,2} + B_{\text{с}}^{\,2} + C_{\text{с}}^{\,2}}}; \\ Y_{\text{П}}(u,v) &= Y_{\text{с}}(u,v) - \frac{(D_{\text{вн}} + D_{\text{н}}) B_{\text{с}}}{2\sqrt{A_{\text{с}}^{\,2} + B_{\text{с}}^{\,2} + C_{\text{с}}^{\,2}}}; \\ Z_{\text{П}}(u,v) &= Z_{\text{с}}(u,v) - \frac{(D_{\text{вн}} + D_{\text{н}}) C_{\text{с}}}{2\sqrt{A_{\text{с}}^{\,2} + B_{\text{с}}^{\,2} + C_{\text{с}}^{\,2}}}. \end{aligned} \tag{3.42}$$

И теперь для определения траектории движения кольцевого инструмента при формообразовании межлопаточного канала в CAD/CAM-системе можно

использовать поверхность "псевдо"-спинки для имитации наличия внутренней режущей части у режущего инструмента (рис. 3.27).

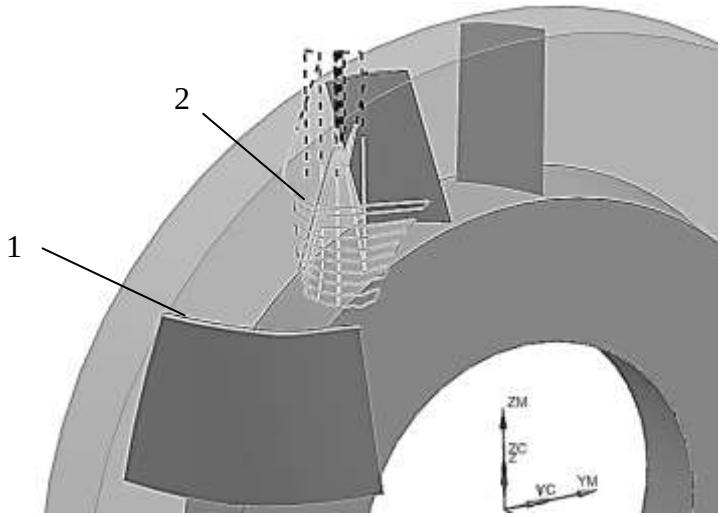


Рис. 3.27 Рассчитанная в CAM-системе траектория движения кольцевого инструмента: 1 – "псевдо"-спинка; 2 – траектория движения инструмента

3.4. Моделирование поверхностей межлопаточного канала осевого моноколеса после обработки кольцевым режущим инструментом в CAD/CAM-системе

Как уже было сказано в первой главе после обработки кольцевым режущим инструментом поверхностей межлопаточного канала, между фактической поверхностью и теоретическим профилем пера лопатки образуется неравномерный слой материала. И поэтому перед чистовой обработкой необходимо ввести дополнительную операцию по выравниванию данного слоя путем его удаления.

Величина, характер неравномерности погрешности формообразования зависит от размеров кольцевого режущего инструмента, конструкции и геометрических параметров обрабатываемого межлопаточного канала, а также кинематики движения инструмента в процессе обработки.

Чтобы оценить влияние выбранной кинематической схемы на точность обработки, характеризуемую величиной напуска, необходимо построить математическую модель поверхностей межлопаточного канала после обработки кольцевым режущим инструментом.

Современные CAD/CAM-системы позволяют получить математическую модель после фрезерной обработки. Однако при расчете учитывается, что режущий инструмент имеет наружную и торцевую режущую кромки. Поэтому

стандартные алгоритмы не применимы для обработки кольцевым режущим инструментом, который имеет внутреннюю режущую кромку.

Процесс формообразования поверхностей режущим инструментом упрощенно выглядит следующим образом:

1) Режущий инструмент имеет определенное положение относительно заготовки.

2) Тело инструмента и заготовки имеют пересечение в некоторой области.

3) В процессе обработки данная область удаляется из тела заготовки.

4) Совокупность удаления области пересечения заготовки и инструмента образует поверхности заготовки после обработки.

Данный алгоритм можно реализовать в CAD/CAM для имитирования процесса удаления метала в межлопаточном пространстве кольцевым режущим инструментом. Реализация алгоритма проводилась в CAD/CAM/CAE-системе Siemens NX.

Первый шаг алгоритма состоит в создании математических моделей кольцевого режущего инструмента и заготовки, которые имеют определенное взаимное положение в процессе обработки.

Для автоматизации алгоритма приняли, что заготовка в процессе обработки не перемещается. Поэтому сначала создаем математическую модель заготовки в системе координат *XYZ* относительно базовой точки $O_д$. Для ускорения процесса расчета CAD/CAM/CAE-системы тело заготовки строим упрощенное, в виде цилиндра, диаметром $D_к$ и шириной $S_к$ (рис. 3.28).



Рис. 3.28. Заготовка в виде цилиндра

После создания заготовки необходимо построить математическую модель кольцевого режущего инструмента с возможностью изменения его положения относительно заготовки. Введем параметры, описывающие положение инструмента в пространстве, а также основные геометрические параметры

кольцевого режущего инструмента (рис. 3.29). Значения данных параметров берем из результатов расчетов траектории, полученных из формул рассмотренных ранее.

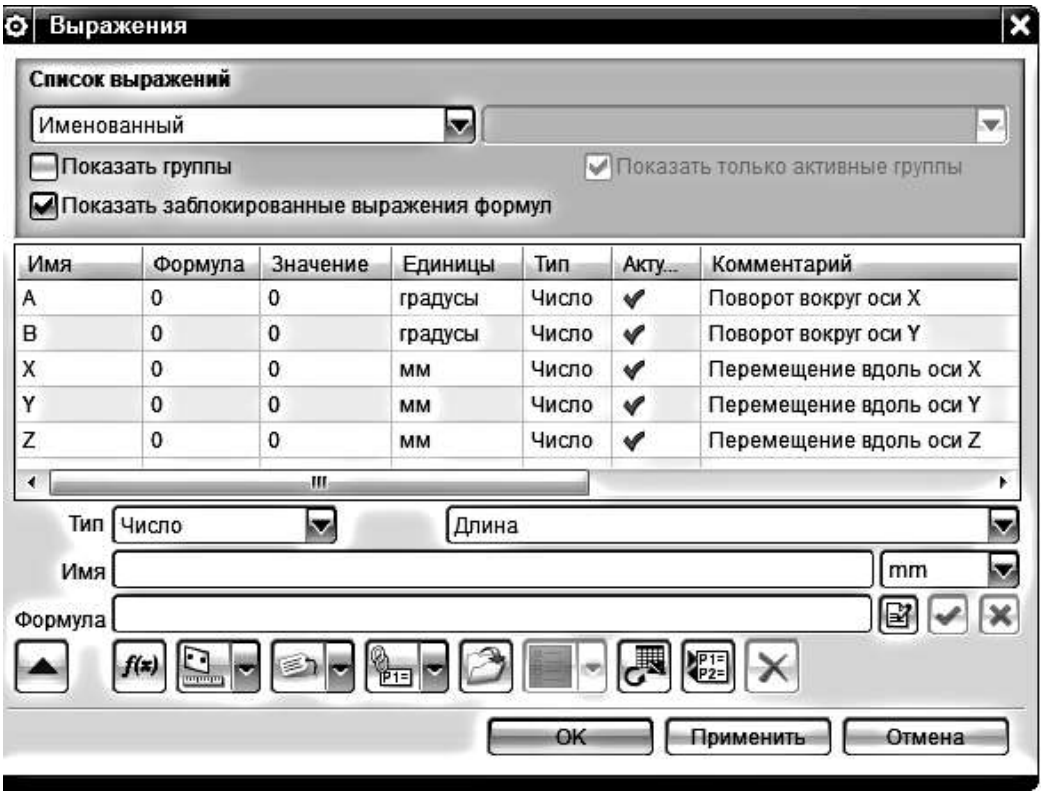


Рис. 3.29. Ввод параметров

Создадим систему координат $X'Y'Z'$, которая получена путем поворота системы XYZ вокруг оси Y на угол $\boldsymbol{A}$, и последующего поворота вокруг оси X' на угол $\boldsymbol{B}$, в следующей последовательности (рис. 3.30):

1. Создаем ось X' в виде отрезка с началом базовой точки $O_д$ и проходящая под углом $\boldsymbol{A}$ к оси X в координатной плоскости $XO_дZ$.

2. Создаем ось Z' в виде отрезка с началом базовой точки $O_д$ и проходящая под углом $\boldsymbol{B}$ к оси Z в плоскости перпендикулярной оси X'.

3. Создаем систему координат $X'Y'Z'$ с началом в базовой точки $O_д$.

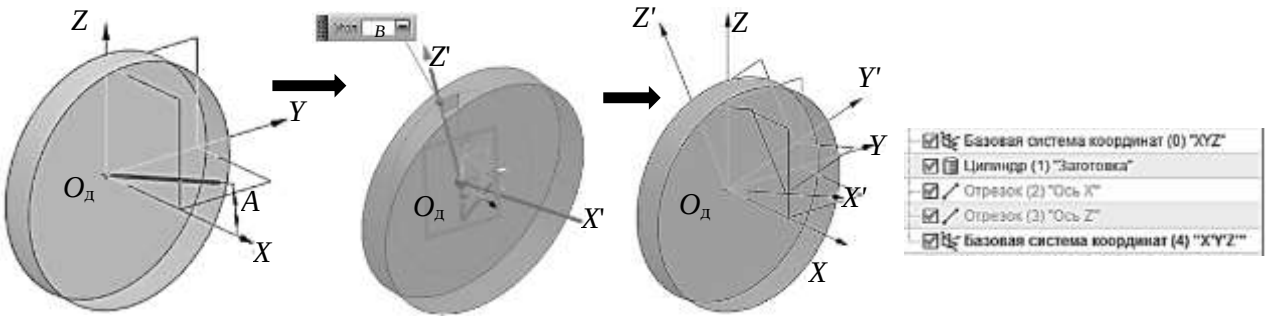


Рис. 3.30 Построение системы координат $X'Y'Z'$

После этого создаем плоскость резания $П$, которая смещена от координатной плоскости $X'O_дY'$ на расстояние z (рис. 3.31).

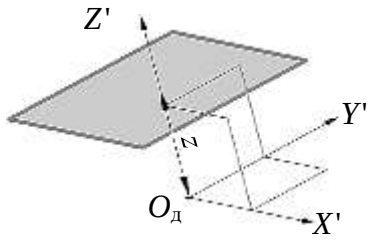


Рис. 3.31 Создание плоскости *П*

В плоскости *П* строим эскиз, в котором задаем положение наружной и внутренней части режущей кромки кольцевого инструмента в виде двух окружностей. Центр данных окружностей смещен относительно базовой точки $O_д$ на расстояния *x* и *y*.

Как уже было сказано ранее для ускорения процесса расчета математическая модель инструмента имеет упрощенный вид, поэтому режущие кромки представляют собой тело вращения, полученные путем вытягивания эскиза с наличием скруглений на нижней торцевой части (рис. 3.32).

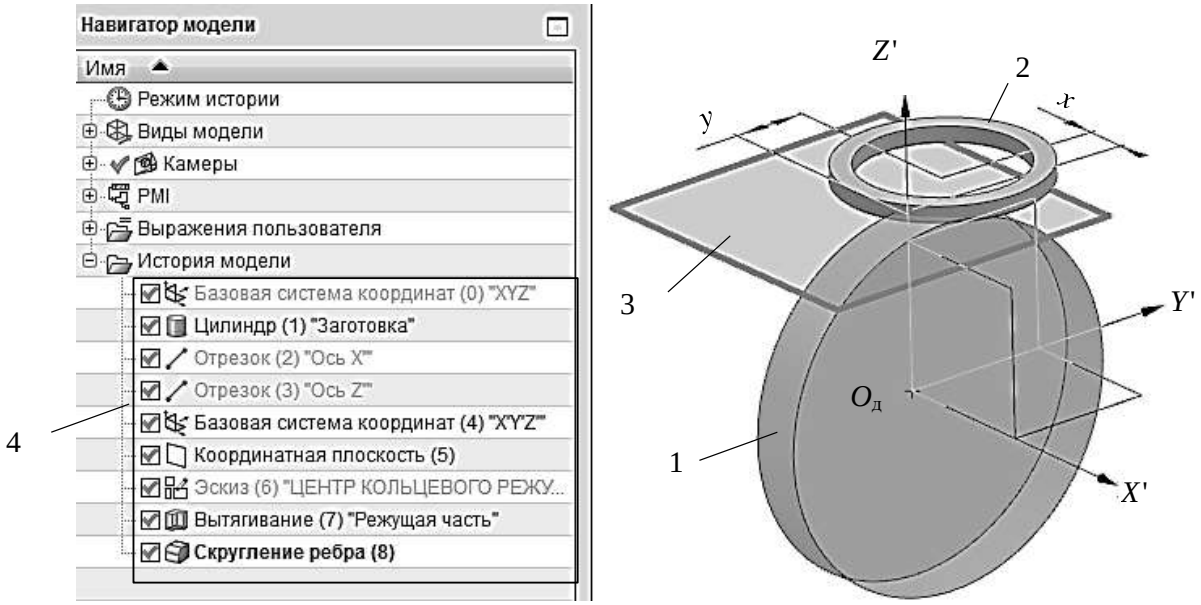


Рис. 3.32. Взаимное положение режущей части кольцевого инструмента и заготовки в процессе обработки:
1 – заготовка; 2 – режущая часть инструмента; 3 – плоскость *П*; 4 – дерево построения

Представим математическую модель заготовки в виде ассоциативного тела. Это сделано для того, чтобы можно было видоизменять твердое тело заготовки без нарушения дерева построения.

Далее математическую модель межлопаточного канала, полученного после обработки кольцевым режущим инструментом, получаем путем совокупности последовательных операций вычитаний из заготовки модели режущей части

инструмента. Из-за того, что последовательность может состоять из большого количества операций вычитаний, то данную последовательность необходимо проводить в автоматическом режиме.

Последовательность операций вычитаний автоматизируем с помощью написания подпрограммы. Исходными данными для данной подпрограммы служит математическая модель взаимного положения заготовки и кольцевого режущего инструмента, полученная ранее (рис. 3.33), а также массив данных координат точек описывающих траекторию движения инструмента в процессе обработки.

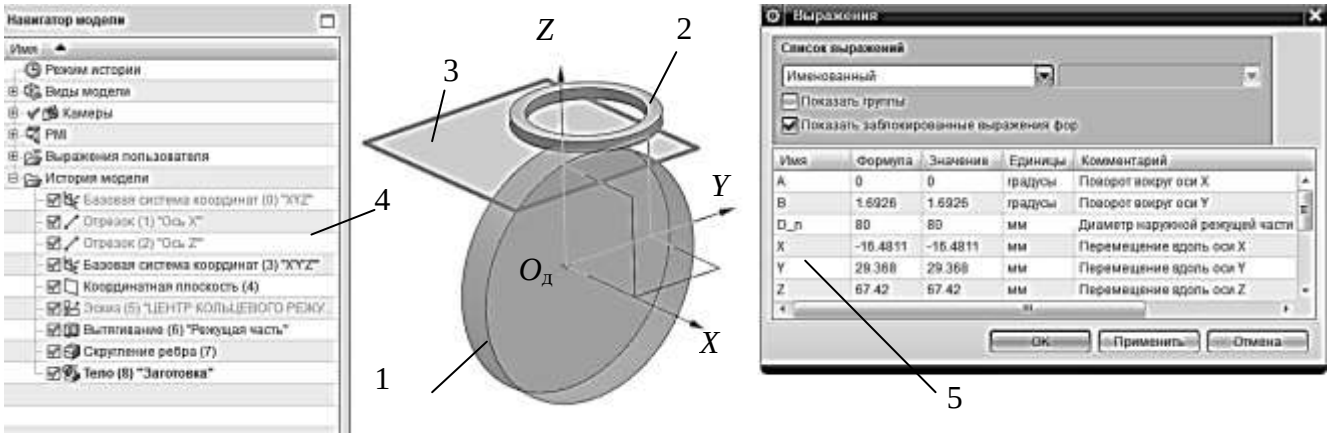


Рис. 3.33 Математическая модель заготовки и кольцевого инструмента в процессе обработки: 1 – заготовка; 2 – режущая часть инструмента; 3 – плоскость *П*; 4 – дерево построения; 5 – управляемые координаты

Подпрограмма в автоматизированном режиме выполняет следующие шаги:

1. выбирается первая точка траектории движения кольцевого режущего инструмента.

2. Изменяются значения управляемых координат положения кольцевого режущего инструмента в пространстве по координатам выбранной точки.

3. Проводится операция вычитания из заготовки «**Тело (8) "Заготовка"**» модели режущей части кольцевого инструмента «**Вытягивание (6) "Режущая часть"**».

4. Создается не ассоциативное тело из полученного вычитанием тела «**Вычитание (9)**»

5. Созданное не ассоциативное тело «**Тело (10)**» в дереве построения перемещается до первоначальной заготовки «**Тело (8) Заготовка**»

6. Удаляется первоначальная заготовка «**Тело (8) Заготовка**».

7. Не ассоциативное тело «**Тело (8)**» становится заготовкой

8. Выбирается следующая точка из массива траектории движения кольцевого режущего инструмента

9. Шаги 2 – 8 повторяются до последней точки массива.

Поверхности полученной математической модели межлопаточного канала имеют межстрочные гребешки из-за итерационного процесса создания поверхности (рис. 3.34). Погрешность математической модели зависит от высоты данных гребешков. Высота межстрочных гребешков в свою очередь будет зависеть от количества рассчитанных точек траектории движения кольцевого режущего инструмента при формообразовании поверхностей межлопаточного канала.

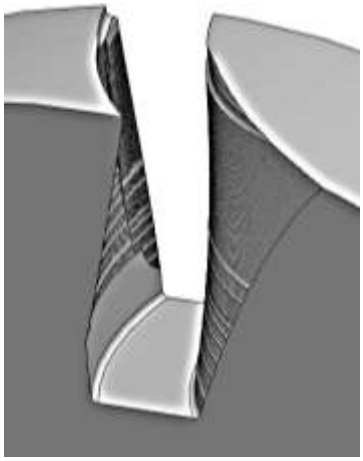


Рис. 3.34 Фрагмент полученной математической модели межлопаточного канала

Полученная математическая модель межлопаточного канала позволяет не только определить значение и характер изменения толщины слоя напуска, но и проверить на возможность столкновения элементов кольцевого инструмента с промежуточными поверхностями, полученных на одном из проходов.

3.5. Выводы по 3 главе

1. Получены кинематические схемы многокоординатного формообразования межлопаточных каналов кольцевым инструментом с количеством управляемых координат от одной до шести. При этом шестой управляемой координатой является диаметр режущей части. При

однокоординатной обработке (перемещение кольцевого инструмента по высоте пера) с использованием делительного приспособления копируется профиль режущей части инструмента (часть кольца прямоугольного или трапециевидного сечения) При двухкоординатной обработке (добавляется вращение заготовки) формообразуется межлопаточный канал переменного по высоте профиля. При трехкоординатной обработке (добавляется линейное перемещение инструмента вдоль оси вращения заготовки) формообразуется межлопаточный канал переменный по длине профиля. С увеличением количества управляемых осей приближаемся к теоретической форме межлопаточного канала

2. Получены математические модели многокоординатного формообразования межлопаточных каналов кольцевым инструментом с количеством управляемых координат от одной до трех. При этом с увеличением количества управляемых координат увеличивается сложность расчетов. Так для однокоординатной обработки необходимо установить координаты положения кольцевого инструмента, а при двух- и трехкоординатном формообразовании необходимо найти зависимости изменения управляемых координат в процесс обработки для написания управляющей программы

3. Установлено, что с использованием дополнительных построений, а именно моделирование "псевдо"-спинки можно реализовать автоматизированный расчет траектории движения кольцевого инструмента в CAM-системе для 4-х и пятикоординатной обработки.

4. Установлено, что современные CAD/CAM системы позволяют реализовать моделирование комплекса поверхностей образованных после обработки кольцевым инструментом с количеством управляемых осей от одного до шести. При этом при построении комплекса поверхностей используются разработанные математические модели двух и трехкоординатной обработки, а также координаты траектории движения кольцевого инструмента при 4-х и пятикоординатной обработке рассчитанные в CAD/CAM-системе.

ГЛАВА 4
ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЙ. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И НАТУРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

4.1. Производственная методика проектирования обработки межлопаточных каналов кольцевым инструментом

При подготовке производства конкретного моноколеса осевых компрессоров или турбин заводскому технологу необходимо решить следующие задачи:

1. определить основные размеры режущего инструмента (максимальную и минимальную ширину режущей части, диаметр инструмента и глубину внутренней полости) в зависимости от геометрических параметров моноколеса;

2. выбрать из шести возможных кинематических схем (по количеству управляемых координат от 1 до 6) одну или несколько предпочтительных с точки зрения имеющего технологического оборудования с целью последующего анализа технико-экономических показателей и принятия решения;

3. смоделировать процесс формообразования для всех выбранных схем и определить технико-экономические показатели (трудоемкость, производительность и др.) для каждой из них;

4. сравнить полученные показатели и выбрать один из вариантов для дальнейшего разработки;

5. разработать технологический процесс изготовления осевого колеса с учетом обрабатываемости материала детали, программы выпуска моноколес, сроков освоения, затрат на оборудование, инструмента и т.п.

Технико-экономический эффект каждой кинематической схемы зависит от множества факторов и, прежде всего, от конструкции осевого моноколеса. Методику выбора оптимального варианта предварительной обработки межлопаточного канала покажем на примере рабочего колеса компрессора высокого давления вертолетного двигателя (рис. 4.1).

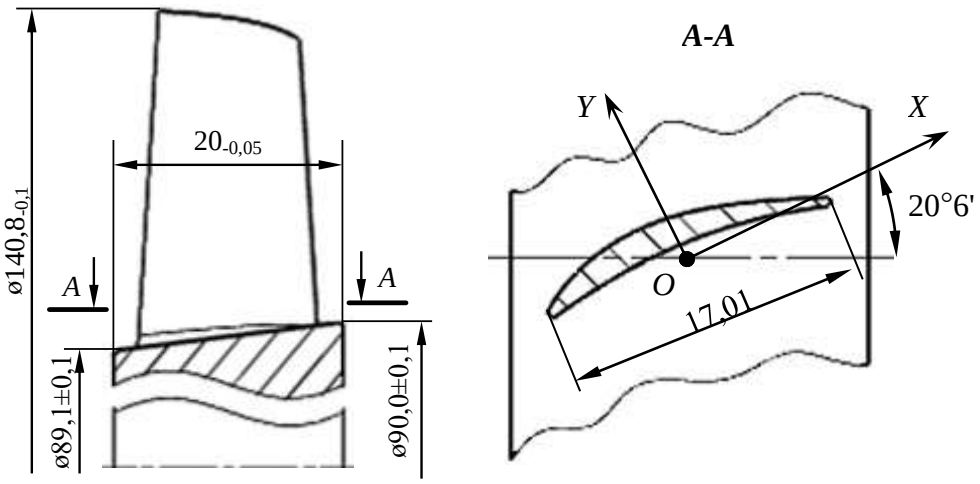


Рис. 4.1 Рабочее колесо компрессора

Таблица 4.1

Исходные данные

Наименование	**Обозначение**	**Значение**
Наружный диаметр моноколеса, мм	$D_к$	140,8
Диаметр втулки во входном сечении, мм	$D_{вт}$	89,1
Диаметр втулки во выходном сечении, мм	$D_{вт}$	90,0
Хорда профиля пера в корневом сечении, мм	b	17,01
Центр скругления входной кромки в корневом сечении, мм	$[x_1;y_1]$	[-7,83;-2,28]
Центр скругления выходной кромки в корневом сечении, мм	$[x_2;y_2]$	[7,8; -0,91]
Координаты средней точки профиля S	$[x_s; y_s]$	[0,0; 0,77]
Угол установки теоретического профиля, град;	β	20,1
Количество лопаток, шт.	N	20

Первым шагом в методике выбора оптимальной кинематической схемы является определение параметров кольцевого инструмента исходя из геометрических параметров изделия. С использованием зависимостей (2.10) и (2.15) находим значения следующих параметров, необходимых для моделирования (Таблица 4.2).

Таблица 4.2

Дополнительные данные

Наименование	**Обозначение**	**Формула**	**Значение**
Высота лопатки, мм	h	$\frac{D_к - D_{вт}}{2}$	25,0
Относительная высота,	$\bar{h}$	(2.9)	1,47
Веерность, мм	θ	(2.8)	17,01
Шаг решетки, мм	t	(2.10)	13,9
Входной угол спинки, град	δ_1	(2.15)	13,31
Выходной угол спинки, град	δ_2		14,27

По математическим зависимостям (2.6), (2.14) и (2.22) рассчитываем значения допустимых параметров кольцевого инструмента (Таблица 4.3).

Таблица 4.3

Допустимые параметры кольцевого режущего инструмента, мм.

Наименование	**Обозначение**	**Формула**	**Значение**	**Итоговое значение параметра**
Наружный диаметр режущей части	$D_н$	(2.6)	69,81	80,0
Ширина режущей части	δR	(2.14)	9,96	8,0
Глубина внутренней полости	B	(2.22)	34,9	40,0

С учетом полученных допустимых параметров, при численном моделировании будем использовать кольцевой инструмент с геометрическими параметрами представленными в последнем столбце таблицы.

4.1.1. Методика и результаты численного моделирования процесса многокоординатной обработки межлопаточных каналов

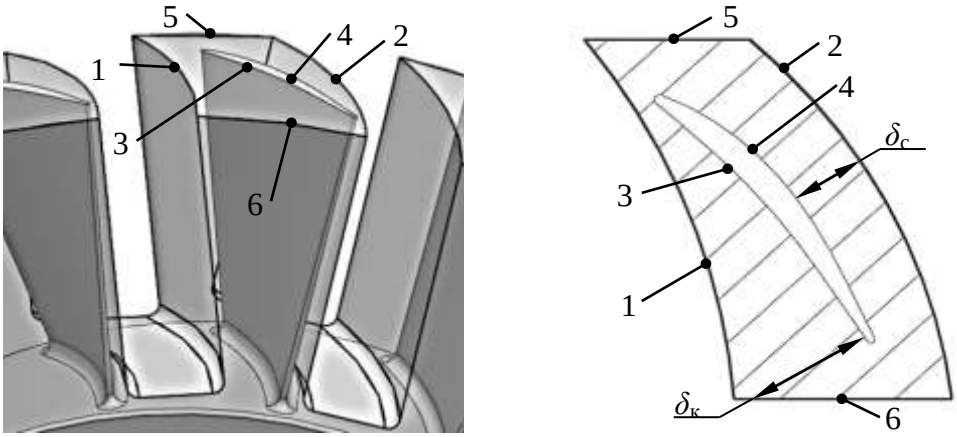
При моделировании процесса однокоординатной обработки межлопаточных каналов по схеме с управлением по одной координате (см. рис. 3.1) по выражению (3.10) определяем значение установочного угла α_y и предельные значения хода инструмента z_{max} и z_{min} рассчитываем по формулам (3.16) и (3.17). Значения размеров x_y и y_y находим из систем уравнений (3.21) и (3.22) Параметры рабочего колеса компрессора высокого давления и полученные результаты.

Таблица 4.4

Данные для моделирования однокоординатной обработки

Наименование		**Обозначение**	**Значение**
Исходные данные	Наружный диаметр моноколеса на входе, мм	$D_к^{вх}$	140,0
	Диаметр втулочной части колеса на входе, мм	$D_{вт}^{вх}$	90,0
	Диаметр втулочной части колеса на выходе, мм	$D_{вт}^{вых}$	90,0
	Ширина моноколеса, мм	$S_к$	20,0
	Расстояние от торца диска до системы координат, мм	$S_о$	0,0
	Припуск на последующую обработку, мм	Δ	0,5
Вычисленные значения	Угол установки, град	α_y	0,0
	Дополнительный угол, град	ω_y	7,46
	Верхнее положение инструмента, мм	z_{max}	70,0
	Нижнее положение инструмента, мм	z_{min}	45,5
	Положение инструмента по оси X, мм	x_y	3,11
	Положение инструмента по оси X, мм	y_y	-33,65

Используя полученные данные, был смоделирован комплекс поверхностей, образованный после однокоординатной обработки межлопаточного канала кольцевым инструментом (рис. 4.2).



а *б*

Рис. 4.2 Профиль пера лопатки после однокоординатной обработки кольцевым инструментом: а) теоретический профиль пера и полученный комплекс поверхностей; б) сечение лопатки; 1 – профиль со стороны корыта после обработки; 2 – профиль со стороны спинки после обработки; 3 – теоретический профиль корыта; 4 – теоретический профиль спинки; 5 и 6 – торцевые плоскости заготовки

Далее была найдена погрешность однокоординатного формообразования δ как разница между теоретическим профилем и обработанными поверхностями согласно полученной математической модели. Погрешность формообразования была найдена в четырех равноудаленных сечениях (рис. 4.3).

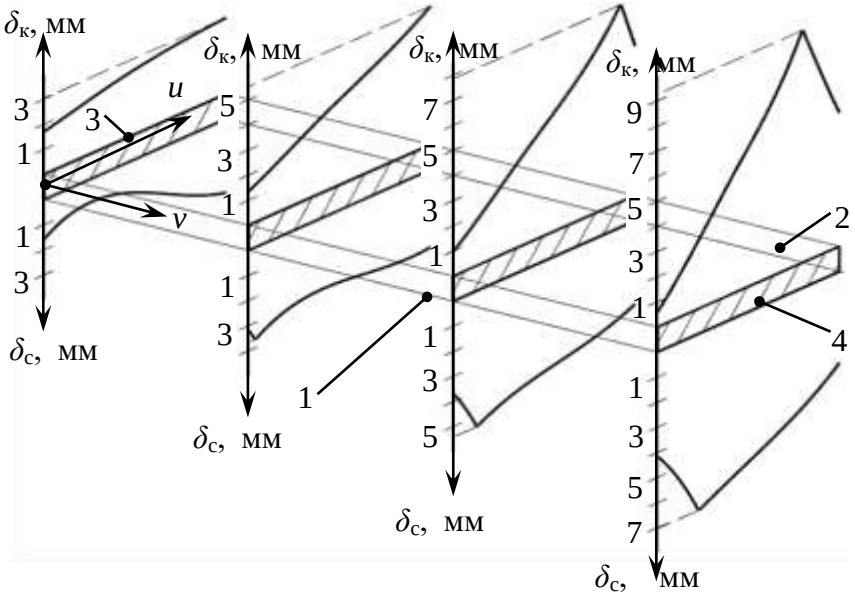


Рис 4.3 Погрешность формообразования при однокоординатной обработке: 1 – входная кромка; 2 – выходная кромка; 3 – корневая часть; 4 – концевая часть

Полученные данные показывают, что при однокоординатной обработке погрешность формообразования на спинке и корыте растет от корневой части ***3*** пера лопатки к концевой ***4***. При этом погрешность на спинке и корыте растет от входной кромки ***1*** к выходной ***2***, а на спинке, наоборот, от выходной кромки ***2*** к входной ***1***. Резкое снижение погрешности формообразования у кромок объясняется тем, что из-за особенности формы пера лопатки погрешность в некоторых точках профиля определялась как между теоретическим профилем, так и торцевыми плоскостями заготовки ***5*** и ***6*** (см. рис. 4.2,б). Также можно отметить, что максимальная погрешность формообразования со стороны спинки составила 7,02 мм, а со стороны корыта 9,25 мм.

При моделировании процесса двухкоординатной обработки межлопаточных каналов (см. рис. 3.2) дополнительно к имеющимся данным установим по формулам (3.27) и (3.29) зависимость углового положения заготовки ω от перемещения инструмента по координате Z от z_{max} до z_{min} при обработке корыта ***1*** и спинки ***2*** (рис. 4.4). Также была установлена из систем уравнений (3.28) и (3.30) допустимая область. Данная область ограничена двумя кривыми. Нижняя кривая ***3*** характеризует ограничение положением инструмента для предотвращения зареза корыта наружными режущими кромками, а верхняя кривая ***4*** – для предотвращения зареза спинки внутренними кромками.

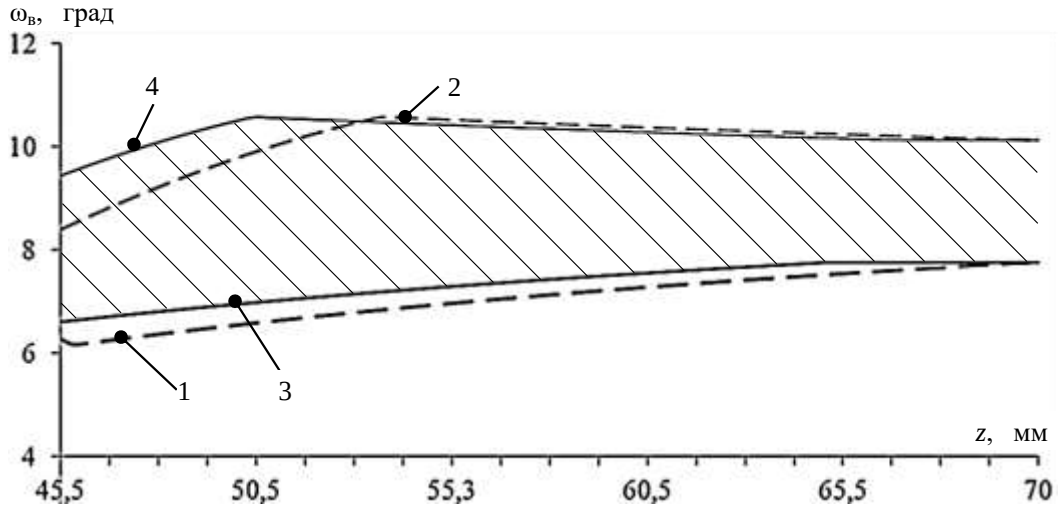


Рис. 4.4 Определение зависимости поворота заготовки от линейного перемещения кольцевого инструмента при двухкоординатной обработке:
1 – зависимость при обработке корыта; 2 – зависимость при обработке спинки;
3 – ограничение по положению инструмента для предотвращения зареза корыта;
4 – ограничение по положению инструмента для предотвращения зареза спинки;

Итоговая зависимость углового положения заготовки ω от перемещения инструмента по координате Z будет совокупностью кривых ***1*** и ***2***, и ограничений ***3*** и ***4***. В нашем случае при обработке корыта используем ограничение ***3***, а при обработке спинки при линейном перемещении кольцевого инструмента от 70 мм до 53 мм вращение заготовки будет проводиться согласно ограничению ***4***, а после по зависимости ***2***.

Был смоделирован комплекс поверхностей, образованный после двухкоординатной обработки межлопаточного канала (рис. 4.5) и была найдена погрешность двухкоординатного формообразования δ (рис. 4.6).

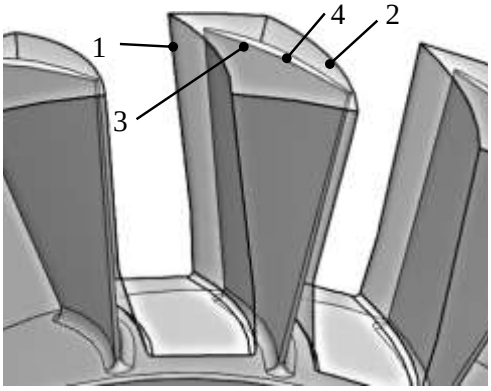


Рис. 4.5 Профиль пера лопатки после однокоординатной обработки кольцевым инструментом: 1 – профиль со стороны корыта после обработки; 2 – профиль со стороны спинки после обработки; 3 – теоретический профиль корыта; 4 – теоретический профиль спинки

При двухкоординатной обработке как и при однокоординатной погрешность формообразования на спинке и корыте растет от корневой части ***3*** пера лопатки к концевой ***4***. Добавление одной координаты (вращение заготовки) позволило уменьшить максимальную погрешность формообразования со стороны спинки с 7,02 мм до 5,12 мм, а со стороны корыта с 9,25 мм до 8,03 мм.

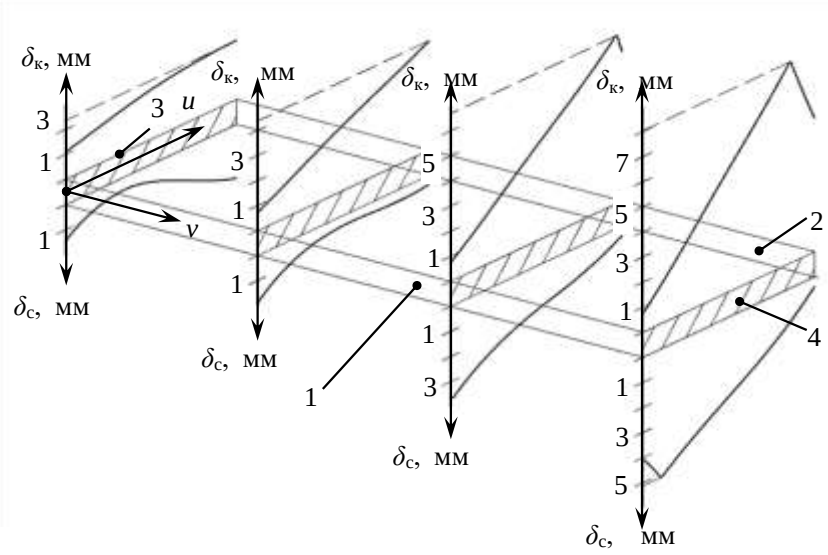


Рис 4.6 Погрешность формообразования при двухкоординатной обработке: 1 – входная кромка; 2 – выходная кромка; 3 – корневая часть; 4 – концевая часть

Для моделировании процесса трехкоординатной обработки межлопаточных каналов (см. рис. 3.3) установили по формулам (3.34) и (3.36) зависимости углового положения заготовки ω и линейной координаты инструмента по оси X от перемещения инструмента по координате Z от z_{max} до z_{min} при обработке корыта ***1*** и спинки ***2*** (рис. 4.7). Также была установлена из систем уравнений (3.35) и (3.37) допустимая область. Данная область ограничена двумя поверхностями. Нижняя поверхность ***3*** характеризует ограничение положением инструмента для предотвращения зареза корыта наружными режущими кромками, а верхняя поверхность ***4*** – для предотвращения зареза спинки внутренними кромками.

При трехкоординатной обработке значения управляемых координат должны находиться в области между поверхностями ***3*** и ***4***. И в итоге математическая модель изменения углового положения заготовки ω и линейных координат инструмента по осям X и Z будет совокупностью кривых ***1*** или ***2*** и их проекций на поверхности ***3*** или ***4***. В нашем случае при обработке корыта используем проекцию кривой ***1,*** ограничение ***3***, а при обработке спинки при линейном перемещении кольцевого инструмента от 70 мм до 53 мм вращение заготовки будет проводиться согласно ограничению ***4***, а после по зависимости ***2***.

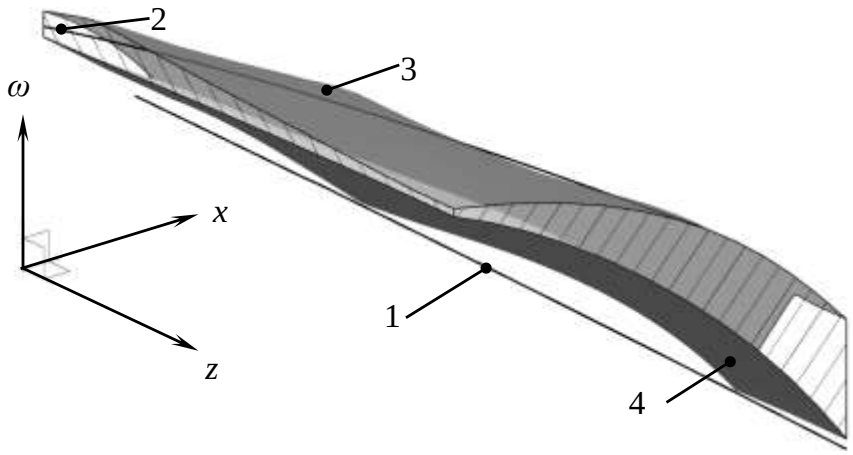


Рис 4.7 Определение зависимости поворота заготовки и линейной координаты от линейного перемещения кольцевого инструмента при трехкоординатной обработке:
1 – зависимость при обработке корыта; 2 – зависимость при обработке спинки;
3 – ограничение по положению инструмента для предотвращения зареза корыта;
4 – ограничение по положению инструмента для предотвращения зареза спинки;

Далее был смоделирован комплекс поверхностей, образованный после трехкоординатной обработки межлопаточного канала, и была найдена погрешность трехкоординатного формообразования δ (рис. 4.8).

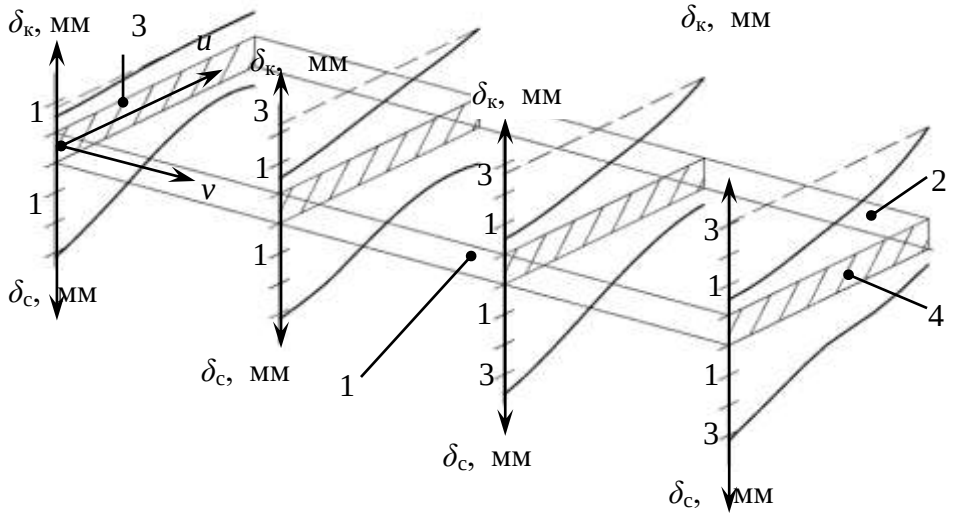
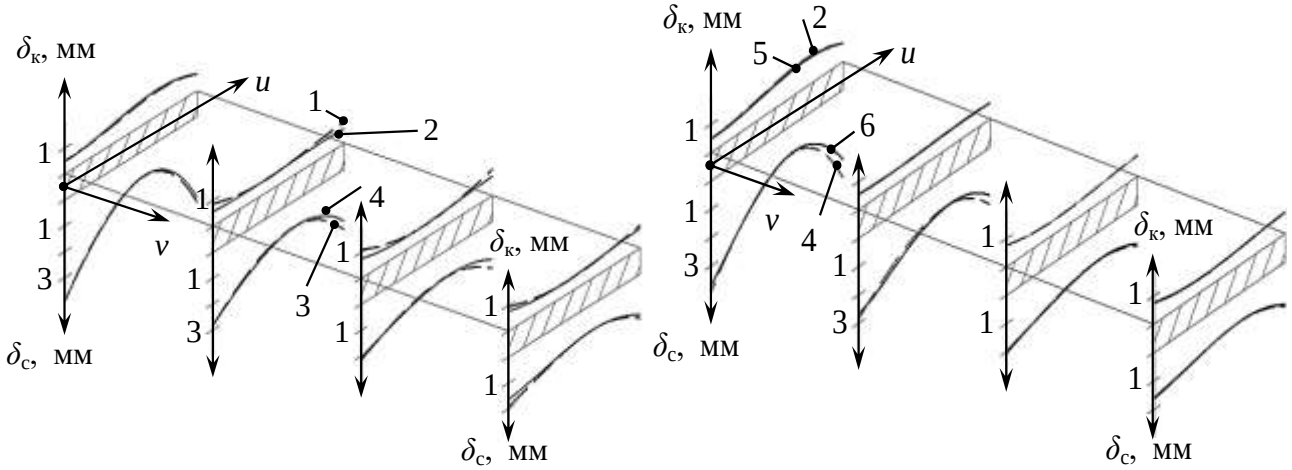


Рис 4.8 Погрешность формообразования при трехкоординатной обработке:
1 – входная кромка; 2 – выходная кромка; 3 – корневая часть; 4 – концевая часть

При трехкоординатной обработке как и при однокоординатной погрешность формообразования на спинке и корыте растет от корневой части ***3*** пера лопатки к концевой ***4***. Добавление одной координаты (вращение заготовки) позволило уменьшить максимальную погрешность формообразования со стороны спинки с 7,02 мм до 5,12 мм, а со стороны корыта с 9,25 мм до 8,03 мм.

Были смоделированы комплекс поверхностей, образованный после четрех-, пяти и шестикоординатной обработки межлопаточного канала, и была найдена погрешность формообразования δ. Результаты вычислений представлены в виде графиков на рисунке 4.9.



а *б*

Рис. 4.9 Погрешность формообразования пера лопатки при обработке кольцевым инструментом
а – 4 и 5 координатная обработка; б – 5 и 6 координатная обработка кольцевым инструментом
1, 2, и 5 – графики изменения погрешности формообразования со стороны корыта при 4, 5 и 6 координатной обработке; 3, 4, и 6 – графики изменения погрешности формообразования со стороны спинки при 4, 5 и 6 координатной обработке

Полученные данные показывают, что при четырех и более координатной обработке, в отличии от предыдущих схем, погрешность формообразования на спинке и корыте растет от концевой части пера лопатки к корневой. Также можно отметить, что введение четвертой управляемой координаты резко снизило максимальную погрешность формообразования со стороны корыта с 8,03 мм до 1,2 мм, а со стороны корыта с 5,12 мм до 3,88 мм. Дальнейшее увеличение управляемых координат дает незначительное уменьшение погрешности, как со стороны корыта, так и со стороны спинки. При пятикоординатной обработки максимальная погрешность со стороны корыта уменьшилась до 1,02 мм, а со стороны спинки до 3,86 мм. При шестикоординатной погрешность со стороны корыта уменьшилась до 0,99 мм, а со стороны спинки до 3,67 мм Это с ограничением положения кольцевого инструмента в корневом сечении.

4.2 Предварительная обработка межлопаточных каналов осевого моноколеса кольцевым режущим инструментом

Для проверки математических моделей были изготовлены и измерены действительные значения погрешности формообразования после обработки поверхностей межлопаточного канала кольцевым инструментом.

При обработке использовалась непрофилированная заготовка материала Д16Т. Кольцевой режущий инструмент был выбран по методике, описанной в параграфе 4.1. Обработка производилась в автоматическом режиме на четырех-координатном фрезерном станке Fanuc Robodrill α21-FI (рис. 4.10).

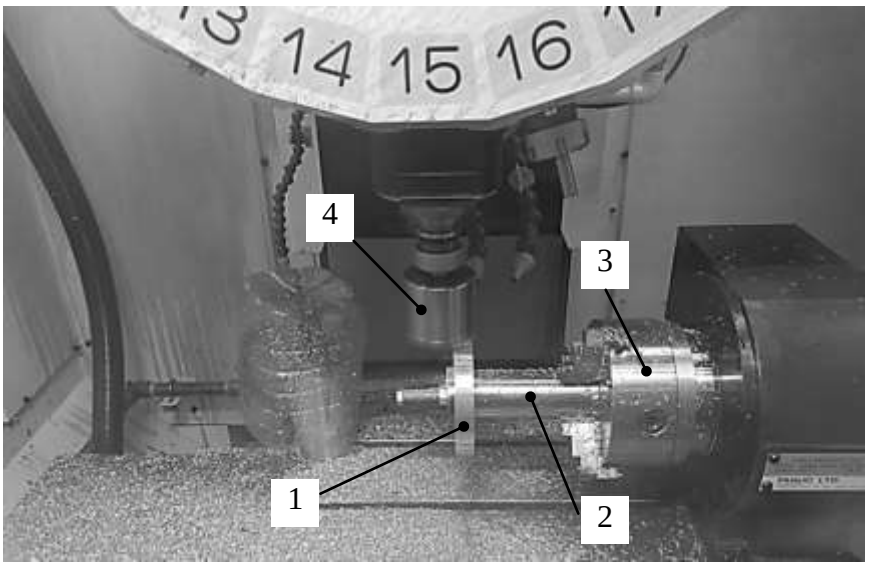


Рис. 4.10. Обработка межлопаточных каналов кольцевым инструментом на фрезерном станке: 1 – непрофилированная заготовка моноколеса; 2 – приспособление; 3 – трехкулачковый патрон поворотного стола; 4 – кольцевой инструмент

Перед началом обработки непрофилированная заготовка моноколеса ***1*** была установлена в приспособлении ***2***. Само приспособление было установлено в трехкулачковом патроне поворотного стола ***3*** фрезерной станка. Приспособление ***2*** было спроектировано и изготовлено с целью обеспечения гарантированного зазора между режущими кромками кольцевого инструмента ***4*** и рабочих органов станка. После установки заготовки измерили радиальное биение наружной цилиндрической поверхности заготовки относительно оси вращения поворотного стола. Если при измерении выяснялось, что радиальное биение было больше допустимого, то проводились мероприятия для его снижения (поворот заготовки в приспособлении, подкладывание в зазор между базовым отверстием заготовки и базовой поверхности приспособления слой фольги и т.п.)

Затем был установлен кольцевой инструмент ***4*** в инструментальный магазин фрезерного станка. После была определена базовая точка детали $O_д$, относительно которой будут задаваться перемещения инструмента в управляющей программе. Обработка межлопаточных каналов проводилась с использованием четырех кинематических схем (от одной координаты до четырех). При этом при трехкоординатной и четырехкоординатной обработке рассматривалась стратегия плунжерной и строченой обработки.

Подачу на зуб определили из рекомендуемых значений [37] как для обработки конического колеса с круговым зубом резцовой головкой с учетом поправочных коэффициентов на твердость обрабатываемого материала. Назначили по нормативным материалам – справочным таблицам из [37] подачу на зуб Sz = 0,003 мм/зуб. Скорость резания и частота вращения шпинделя при обработке межлопаточных каналов кольцевым режущим инструментом находились также из справочных таблиц [43]. При обработке кольцевым инструментом диаметром до 80 мм скорость резания примем равной υ = 15 м/мин, частоту оборотов шпинделя n = 700 об/мин.

Для начала была проведена однокоординатная обработка межлопаточного канала. При написании управляющей программы использовались данные из таблицы 4.4. Управляющая программа имела следующий алгоритм:

1. инструмент подводился к координате [x_y; y_y; z_{max}];
2. вращающийся инструмент на рабочей подачи опускался вниз до z_{min};
3. инструмент отводился из полученного канала до z_{max};
4. заготовка поворачивалась на угол $\omega_{дел}$;

5. шаги 2 – 4 повторялись до обработки всех межлопаточных каналов.

В процессе однокоординатной обработки было выявлено, что при отводе инструмента из z_{min} до z_{max} слышен звук высокой частоты, возникающий вследствие соприкасаний и соударений режущих кромок инструмента с обработанными поверхностями канала.

При написании управляющей программы для двухкоординатной обработки использовались данные из таблицы 4.4, а также зависимости поворота заготовки от линейного перемещения кольцевого инструмента (рис. 4.4) Управляющая программа имела следующий алгоритм:

1. Инструмент подводился к точке с координатой [x_y; y_y; z_{max}].

2. Вращающийся инструмент на рабочей подаче опускался вниз до z_{min}, при этом заготовка вращалась согласно полученной зависимости для обработки поверхности со стороны корыта.

3. Инструмент отводился из полученного канала до z_{max}, при этом путь инструмента был аналогичен пути резанию.

4. Вращающийся инструмент на рабочей подаче опускался вниз до z_{min}, при этом заготовка вращалась согласно полученной зависимости для обработки поверхности со стороны спинки.

5. Инструмент отводился из полученного канала до z_{max} по прямой траектории.

6. Шаги 2 – 5 повторялись до обработки всех межлопаточных каналов.

Полученный межлопаточный канал представлен на рисунке 4.11.

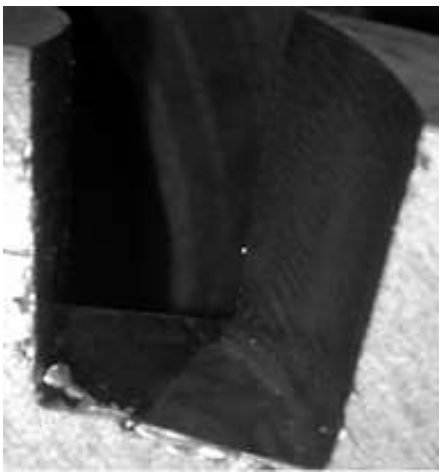


Рис. 4.11. Межлопаточный канал после двухкоординатной обработки

При написании управляющей программы для трехкоординатной обработки использовались ранее полученные зависимости (рис. 4.7). Управляющая

программа имела алгоритм схожий с двухкоординатной обработке с разницей в том, что отвод инструмента производился по траектории резания.

Для четырех осевой обработки использовалась управляющая программа полученная в CAD/CAM-системе с помощью построения "псевдо"-спинки. При этом использовалась стратегия построчечной обработки, поэтому на поверхности межлопаточного канала образовались межстрочечные гребешки.

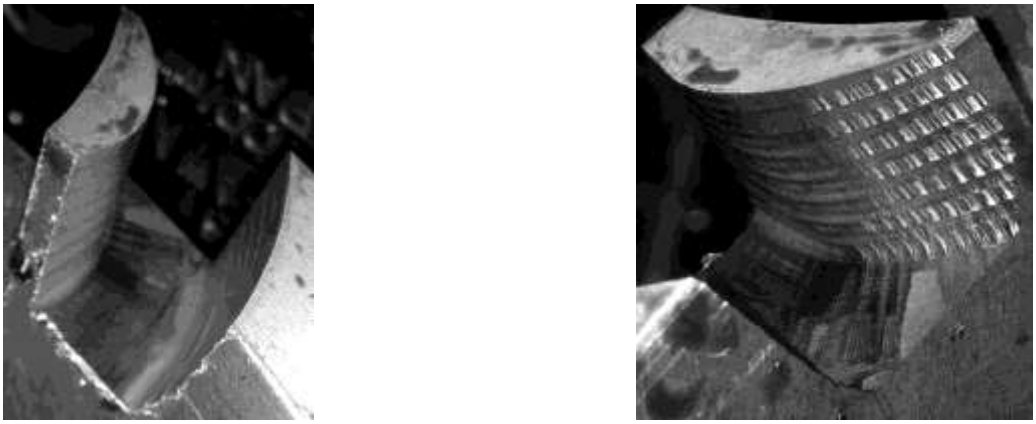


Рис. 4.12. Межлопаточный канал после четырехкоординатной обработки

Для проверки адекватности действительности методики расчета траектории движения кольцевого режущего инструмента нужно сопоставить расчетные и фактические размеры профилей.

Профиль лопаток изготовленного осевого моноколеса после четырехкоординатной обработки измерялся на автоматизированном томографе X-ray X5000 CT (рис. 4.12,а). Результатом измерения являлась 3D модель осевого моноколеса после обработки (рис. 4.12,б) Сравнивались значения погрешности формообразования δ со стороны корыта и спинки у фактического и расчетного профиля в 5 точках с шагом 1,0 мм в корневом и концевом сечениях.



а *б*

Рис. 4.13. Получение математической модели фактического моноколеса после обработки: а) автоматизированный томограф X-ray X5000 CT; б) 3D модель моноколеса

Результаты измерений погрешности формообразования со стороны спинки $\delta_с$ и корыта $\delta_к$ профиля пера лопатки приведены в таблице 4.5 и таблице 4.6.

Таблица 4.5

Значения фактического и расчетного слоя припуска δ_c после обработки

Профиль пера лопатки	№ лопатки	Корневая часть					Концевая часть				
		№ рассматриваемой точки									
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
		Значение напуска δ_c, мм									
Рассчитанный		**3,25**	**3,14**	**2,44**	**2,76**	**2,98**	**2,81**	**2,74**	**2,49**	**2,06**	**2,64**
Измеренный	1	3,25	3,00	2,41	2,86	2,92	2,85	2,65	2,37	1,97	2,79
	2	3,16	3,02	2,35	2,95	3,03	2,93	2,92	2,51	2,24	2,80
	3	3,06	3,15	2,40	2,93	3,13	2,95	2,87	2,58	1,91	2,50
	4	3,07	3,28	2,51	2,65	2,79	2,82	2,63	2,56	1,99	2,83
	5	3,41	2,99	2,29	2,70	2,90	2,68	2,54	2,61	1,92	2,45
	6	3,44	3,16	2,40	2,71	2,86	2,68	2,76	2,38	1,88	2,49
	7	3,41	3,21	2,55	2,82	3,07	2,88	2,80	2,58	2,20	2,56
	8	3,06	3,01	2,44	2,85	3,15	2,70	2,62	2,49	2,21	2,78
	9	3,39	3,08	2,62	2,96	3,07	2,92	2,58	2,42	2,02	2,54
	10	3,06	3,31	2,30	2,89	2,90	2,66	2,60	2,50	2,09	2,81
	11	3,27	2,97	2,34	2,85	3,08	2,61	2,61	2,65	2,12	2,76
	12	3,09	3,15	2,59	2,69	3,17	2,71	2,79	2,36	2,23	2,66
	13	3,36	3,05	2,24	2,82	3,13	2,91	2,89	2,29	2,14	2,56
	14	3,42	3,11	2,43	2,76	2,78	2,84	2,84	2,37	2,00	2,51
	15	3,42	3,22	2,58	2,91	2,82	2,97	2,83	2,35	2,20	2,75
	16	3,40	3,25	2,58	2,89	3,13	2,68	2,90	2,37	2,03	2,45
	17	3,34	3,09	2,40	2,60	2,92	2,92	2,63	2,30	1,89	2,60
	18	3,07	3,11	2,35	2,68	2,94	2,92	2,55	2,31	2,12	2,51
	19	3,21	3,18	2,59	2,70	2,96	2,91	2,76	2,49	2,05	2,48
	20	3,18	3,23	2,43	2,84	2,83	2,87	2,58	2,37	2,23	2,67

Таблица 4.6

Значения фактического и расчетного припуска $\delta_к$ после обработки

Профиль пера лопатки	№ лопатки	Корневая часть					Концевая часть				
		№ рассматриваемой точки									
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
		Значение напуска $\delta_к$, мм									
Рассчитанный		**0,59**	**0,71**	**0,84**	**1,16**	**1,09**	**0,43**	**0,59**	**0,86**	**1,18**	**1,15**
Измеренный	1	0,61	0,54	0,81	1,10	1,03	0,27	0,59	0,70	1,13	1,08
	2	0,56	0,63	0,86	1,05	1,01	0,40	0,58	0,82	1,37	1,02
	3	0,55	0,54	0,95	1,34	1,24	0,56	0,78	0,90	1,38	1,11
	4	0,77	0,55	0,72	1,06	0,94	0,51	0,77	0,93	1,14	1,07
	5	0,78	0,85	0,81	1,23	1,18	0,52	0,67	0,73	1,04	1,04
	6	0,68	0,64	0,64	1,03	1,29	0,52	0,53	0,86	1,06	1,15
	7	0,76	0,58	0,94	1,23	1,19	0,42	0,75	0,78	1,09	1,35
	8	0,60	0,75	0,89	1,13	1,09	0,23	0,41	0,79	1,32	1,19

Продолжение таблицы 4.6

	9	0,39	0,73	0,87	1,23	1,00	0,28	0,67	1,03	1,37	1,24
	10	0,47	0,73	0,99	1,14	1,02	0,28	0,59	1,05	1,26	1,03
	11	0,61	0,57	0,72	1,08	1,13	0,41	0,77	1,03	1,35	1,21
	12	0,75	0,58	0,75	1,17	1,24	0,57	0,60	0,78	0,99	1,07
	13	0,59	0,90	0,81	1,25	1,18	0,38	0,68	1,03	1,30	1,30
	14	0,69	0,58	0,78	1,23	1,19	0,51	0,79	0,72	1,10	1,21
	15	0,65	0,73	0,87	1,08	1,03	0,44	0,74	0,79	1,34	1,15
	16	0,43	0,82	0,73	1,22	1,16	0,34	0,74	0,85	1,23	1,17
	17	0,65	0,86	0,97	1,16	0,94	0,55	0,65	1,02	1,03	1,11
	18	0,53	0,72	0,77	1,18	1,05	0,53	0,79	0,68	1,14	1,32
	19	0,39	0,78	0,78	1,00	1,06	0,45	0,54	0,96	1,12	1,09
	20	0,61	0,58	0,87	1,04	1,11	0,45	0,75	0,75	1,16	1,28

Средняя разница между значениями погрешности полученных по модели и значениями полученных после измерения составила 0,15 мм. Результаты измерений показали достоверность теоретических выкладок при сравнении результатов предварительной обработки осевого моноколеса кольцевым режущим инструментом в производственных условиях с результатами математического моделирования.

4.3 Технико-экономические показатели при обработке межлопаточных каналов кольцевым инструментом

Производительность обработки зависит от параметров и структуры технологического процесса [62]. Для операции структура представляет собой набор переходов и последовательность их выполнения, а также набор режущих инструментов и последовательность их применения.

Прорезку межлопаточных каналов моноколес осевых ступеней можно осуществить концевой фрезой, а также кольцевым инструментом, но при этом необходимо ввести дополнительную операцию по выравниванию припуска.

Выбранная стратегия порезки межлопаточного канала кольцевым инструментом влияет на величину и равномерность припуска с увеличением количества управляемых координат уменьшается погрешность формообразования

и увеличивается объем удаленной части. При этом увеличивается машинное время обработки.

С другой стороны, увеличив объем материала на операции прорезки межлопаточного канала кольцевым инструментом, мы уменьшаем машинное время обработки по выравниванию припуска.

В итоге экономический эффект обработки межлопаточных каналов кольцевым режущим инструментом будет зависеть от рационального выбора кинематической схемы и стратегии обработки кольцевым режущим инструментом.

Определим машинное время черновой и получистовой обработки поверхностей межлопаточных каналов ранее рассмотренного моноколеса осевой ступени (Таблица 4.1) концевой фрезой и кольцевым режущим инструментом при различных кинематических схемах.

Расчет траектории движения фрезы и машинное время при обработке межлопаточных каналов производился в CAD/CAM/CAE-системе Siemens NX.

Для данного инструмента в CAM-системе была создана операция по черновой обработке межлопаточного канала, со следующими рекомендуемыми [43] режимами резания: подача на зуб Sz = 0,01 мм/зуб и скорость резания v = 150 мм/мин. Глубина резания и ширина фрезерования составляла 2 мм.

Расчет траектории кольцевого режущего инструмента при различных кинематических схемах проводился по методикам описанных в параграфе 4.1. Машинное время обработки определялось в CAM-системе.

Для расчета траектории движения концевой фрезы при выравнивании припуска после обработки межлопаточного канала кольцевым режущим инструментом были смоделированы межлопаточные каналы по методике представленной в главе 3.

Выравнивание припуска в зависимости от сформированного межлопаточного канала выполнялась в несколько проходов. Глубина и ширина резания, а также режимы резания были выбраны такие же, как в черновой обработке межлопаточного канала концевой фрезой.

В таблице 4.8 представлены значения машинного времени для различных стратегий черновой обработки межлопаточных каналов моноколеса осевой ступени.

Таблица 4.8

Сравнение стратегий черновой обработки межлопаточных каналов

Стратегия обработки	Этапы черновой обработки			Итоговое машинное время, мин
	Прорезка канала		Выравнивание припуска	
	Процент удаления металла, %	Машинное время, мин	Машинное время, мин	
5 осевая обработка концевой фрезой	100	14,3	–	286,1
однокоординатная обработка кольцевым инструментом	71,1	**2,1**	9,2	226,9
двухкоординатная обработка кольцевым инструментом	80,3	4,9	5,3	**204,5**
трехкоординатная обработка кольцевым инструментом	86,4	9,8	3,5	266,3
четырехкоординатная обработка кольцевым инструментом	94,1	15,6	**2,5**	362,1

Сравнивая разные варианты прорезки межлопаточных каналов можно ответить, что однокоординатная обработка позволяет прорезать межлопаточный канал с минимальными затратами времени, однако из-за большой погрешности формообразования затрачивается много времени для выравнивания припуска. После четырехкоординатной обработки на выравнивание припуска необходимо меньше времени, чем для остальных кинематических схем. Однако из-за сложной траектории при формообразовании итоговое машинное время вышло даже больше, чем при прорезании канала концевой фрезой. Это связано с тем, что при обработке кольцевым инструментом на всех участках режимы резания были постоянны и поэтому не оптимальны.

Таким образом, при изготовлении данного осевого моноколеса меньшее итоговое машинное время получаем при использовании предварительной двухкоординатной обработке кольцевым инструментом.

4.4. Результаты практической реализации на машиностроительных предприятиях

Разработки и результаты исследований по многокоординатному формообразованию межлопаточных каналов осевых моноколес при предварительном прорезании кольцевым инструментом были предложены для реализации на машиностроительных предприятиях для повышения производительности изготовления осевых моноколес из непрофилированных заготовок.

Одним из заинтересовавшихся предприятием стала АО «КМПО». Основное направление деятельности КМПО – серийное производство газотурбинных двигателей и оборудования на их основе для транспортировки и распределения природного газа.

Для подготовки лопаточного производства, в том числе при освоении изготовления моноколес осевого компрессора нового вертолетного газотурбинного двигателя были переданы, а КМПО приняты, следующие разработки (*Приложение 1*):

1. Методики и геометрические модели для определения размеров кольцевого инструмента в зависимости от комплекса параметров трактовых поверхностей моноколес.

2. Кинематические схемы и математические модели формообразования кольцевым режущим инструментом, учитывающие возможность использования при предварительном прорезании межлопаточных каналов от одной до шести управляемых координат.

3. Методики и рекомендации по разработке технологических процессов производства моноколес в части определения заводскими технологами количества управляемых координат и использовании предпочтительной по технико-экономическим показателям схемы многокоординатного формообразования, обеспечивающей максимальную производительность с учетом обработки кольцевым инструментом и последующим выравниванием припуска.

Другим предприятием, которое заинтересовалось разработками и результатами исследований, стало ПАО «КАИ-Лазер».

«КАИ-Лазер» – региональный инжиниринговый центр промышленных лазерных технологий оказывает поддержку производственным предприятиям малого и среднего предпринимательства путем внедрения современных лазерных технологий (сварки, резки, маркировки, упрочнения, наплавки, фрезеровки) в технологические производственные комплексы предприятий.

Предприятие заинтересовалось разработками с целью повышения производительности изготовления направляющего аппарата осевого компрессора. В данном предприятии направляющий аппарат изготавливают путем сборки ранее обработанных колец и лопаток с помощью лазерной сварки. При лазерной сварке лопаток к нижнему кольцу направляющего аппарата происходит увод концевой части лопатки. Поэтому для получения годной продукции при изготовлении лопаток в корневой части лопаток оставляют большой слой припуска для компенсации увода лопатки при сварке. Перед лазерной сваркой верхнего кольца направляющего аппарата к лопаткам данных слой припуска удаляют механической обработкой. Для повышения производительности механической обработки были предложены разработки по многокоординатному формообразованию межлопаточных каналов осевых моноколес кольцевым инструментом (*Приложение 2*)

4.5. Выводы по 4 главе

1. Получена методика предварительной разработки технологии прорезания межлопаточных каналов в зависимости от выбранной кинематической схемы. С помощью данной методики можно определить технико-экономические показатели выбранной технологии для возможности выбора оптимального варианта изготовления осевого моноколеса.

2. С использованием численного эксперимента установлено, что при одно-, двух- и трехкоординатной обработке погрешность формообразования на спинке и корыте растет от корневой части лопатки к концевой, а при четырех и более

координатной обработке, наоборот, уменьшается от корневой части лопатки к концевой. Также установлено, что с увеличением количества управляемых координат уменьшается погрешность формообразования и увеличивается объем удаленной части. При этом увеличение управляемых координат до 5 и 6 дает незначительное уменьшение погрешности, как со стороны корыта, так и со стороны спинки.

3. Натурный эксперимент показал достоверность теоретических выкладок при сравнении результатов предварительной обработки осевого моноколеса кольцевым режущим инструментом в производственных условиях с результатами математического моделирования.

4. Установлено, что прорезание межлопаточных каналов осевых моноколес кольцевым режущим инструментом позволяет сократить машинное время обработки изделия с 286,1 мин до 204,5 для рассматриваемого случая. При этом увеличение количества управляемых координат во время обработки кольцевым инструментом не всегда уменьшает машинное время обработки изделия. Это связано с тем, что при обработке кольцевым инструментом на всех участках, режимы резания были и поэтому не оптимальны.

5. Научные и практические результаты работы приняты и будут использованы при освоении изготовления моноколес осевого компрессора нового вертолетного газотурбинного двигателя в АО «КМПО», рекомендуется для применения на предприятиях производящих осевые моноколеса из непрофилированной заготовки, а также в учебном процессе при подготовке инженерно-технических и научно-педагогических по направлению «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получены аналитические зависимости конфигурации и размеров режущего инструмента от геометрических параметров межлопаточных каналов моноколеса осевых компрессоров и турбин. При этом установлено, что увеличение основных геометрических параметров (наружный диаметр осевого моноколеса $D_к$; угла установки профиля лопатки β; относительная высота лопатки $\bar{h}$) кроме веерности θ приводит к увеличению наружного диаметра режущей части

кольцевого инструмента $D_н$ и высоты внутренней полости корпуса инструмента B. При этом минимальный наружный диаметр режущей части находится в прямой зависимости от диаметра моноколеса. Влияние остальных параметром носит сложный характер.

2. Установлена теоретическая область применения кольцевого режущего инструмента для прорезания межлопаточных каналов моноколес различной конфигурации. При этом ограничение по минимальной ширине режущей части сужает область применения из-за наличия конструктивных особенностей у некоторых моноколес (отогнутый профиль, наличие антивибрационной полки, большой угол закрутки пера и др.). Обработка межлопаточных каналов моноколес осевых турбин последних ступеней с относительной высотой лопатки $\bar{h}$ = 1,9 и веерностью θ = 5,0 кольцевым инструментом возможна для 76% профилей из атласа. При этом для оставшихся 24% профилей обработка возможна лишь части канала, либо совершенно не возможна. Для моноколес осевых турбин первых ступеней с относительной высотой лопатки $\bar{h}$ = 7,0 и веерностью θ = 4,0 область применения уменьшается до 11% из-за необходимости применения кольцевого инструмента большего диаметра.

3. Получены кинематические схемы и математические модели многокоординатного формообразования межлопаточных каналов кольцевым инструментом. При однокоординатной обработке (перемещение кольцевого инструмента по высоте пера) с использованием делительного приспособления копируется профиль режущей части инструмента (часть кольца прямоугольного

или трапециевидного сечения) При двухкоординатной обработке (добавляется вращение заготовки) формообразуется межлопаточный канал переменного по высоте профиля. При трехкоординатной обработке (добавляется линейное перемещение инструмента вдоль оси вращения заготовки) формообразуется межлопаточный канал переменный по длине профиля. С увеличением количества управляемых осей приближаемся к теоретической форме межлопаточного канала

4. С использованием численного эксперимента установлено, что при одно-, двух- и трехкоординатной обработке погрешность формообразования на спинке и корыте растет от корневой части лопатки к концевой, а при четырех и более координатной обработке, наоборот, уменьшается от корневой части лопатки к концевой. Также установлено, что с увеличением количества управляемых координат уменьшается погрешность формообразования и увеличивается объем удаленной части. При этом увеличение управляемых координат до 5 и 6 дает незначительное уменьшение погрешности, как со стороны корыта, так и со стороны спинки.

5. Экспериментально опробованы различные схемы многокоординатного формообразования кольцевым инструментом с количеством управляемых координат от одной до четырех.

6. Получена методика предварительной разработки технологии прорезания межлопаточных каналов в зависимости от выбранной кинематической схемы. С помощью данной методики можно определить технико-экономические показатели выбранной технологии для возможности выбора оптимального варианта изготовления осевого моноколеса. При этом прорезание межлопаточных каналов осевых моноколес кольцевым инструментом позволяет сократить машинное время обработки изделия.

7. Научные и практические результаты работы приняты и будут использованы при освоении изготовления моноколес осевого компрессора нового вертолетного газотурбинного двигателя в АО «КМПО», рекомендуется для применения на предприятиях производящих осевые моноколеса из непрофилированной заготовки, а также в учебном процессе при подготовке инженерно-технических и научно-педагогических по направлению

«Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1.Абросимова А.Р. и др. К вопросу повышения качества обработки сложнопрофильных деталей на фрезерных станках. Материалы 77-й международной научно-технической конференции МАМИ «Автомобиле – и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров». [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://mami.ru/science/aai77/scientific/article/инстрs07/s07_01.pdf. – (Дата обращения: 08.01.2015).

2. Аверченков В.И., и др. Автоматизация подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ. – Учебное пособие для вузов. Часть 2. – Брянск, 2012. - 212 с.

3. Аронов Б.М. Профилирование лопаток авиационных газовых турбин М.: Машиностроение, 1975. — 192 с.

4. Атлас экспериментальных характеристик плоских решеток охлаждаемых газовых турбин / В.Д. Венедиктов, А.В Грановский, А.М. Карелин, А.Н. Колесов, М.Х. Мухтаров. – М.: ЦИАМ, 1990. 393 с.

5. Багров С.В., Уваров Л.Б. Оптимизация технологических процессов изготовления осевых моноколес компрессоров газотурбинных двигателей // Полет. Изд-во: Машиностроение. – 2009. №12. – С. 24-32.

6. Барановский Ю.В. Режимы резания металлов/справочник под. ред. Барановского Ю.В. Москва, Машиностроение, 1972. – 497с.

7.Батуев В.В. Повышение производительности и точности чистового фрезерования пространственно-сложных поверхностей со ступенчатым припуском: дис. канд.тех.наук: 05.02.08. / Батуев Виктор Викторович. -Челябинск, 2007. – 182с.

8. Батурин О.В. Конспекты лекций по учебной дисциплине «Теория и расчет лопаточных машин: учеб. пособие / О.В. Батурин // – Самара: СГАУ. – 2011. – 241 с.: ил.

9. Безъязычный В.Ф. Лазерные технологии контроля в производстве лопаток компрессора современных ГТД/ В.Ф. Безъязычный, М.А. Ганзен, А.Н. Сутягин, М.В. Тимофеев // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2015. № 3 (34). С. 78-82.

10. Бекаев А.А., Денисов Р.А. Анализ технологических способов обработки сложнопрофильных изделий на примере лопаток моноколес газотурбинных двигателей (ГТД) / А.А. Бекаев, Р.А. Денисов // XXVI Международная Инновационно-ориентированная конференция молодых учёных и студентов МИКМУС-2014 Труды конференции. Российская Академия наук; РФФИ;

Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления; Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. – 2015. – С. 384-388.

11. Беклемишев Д.В. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры: Учеб. для вузов. - М.: Физматлит, 2005. - 304 с.

12. Богуслаев В.А. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора. Часть I. Монография / В.А. Богуслаев – Запорожье: ОАО «Мотор Сич». – 2003. — 396 с.

13. Богуслаев А. В. и др. Обеспечение несущей способности лопаток осевых моноколёс высокоскоростным фрезерованием // Вестник двигателестроения. 2006. №2. С. 17 – 20.

14. Брусиловский И.В. Выбор густоты решетки профилей и угла атаки в осевых вентиляторах // Промышленная аэродинамика. 1975. Сб. № 32. С. 93-117.

15. Богуслаев А.В., Качан А.Я., Карась В.П. Высокоскоростное финишное фрезерование лопаток моноколес // Вестник двигателе-строения, 2002 г.-№1.-С. 110-111.

16. Бычков В.М., Медведев А.Ю., Савичев М.П., Смирнов В.В., Супов А.В. Контроль качества при изготовлении блисков с применением линейной сварки трением. Уфа: Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2012. Т. 16.№ 7 (52). С. 95-101.

17. Волков Д.И. Автоматизация управления технологическим процессом глубинного шлифования деталей ГТД// Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2012. № 1. С. 73-78.

18. Выбойщик А.В. Повышение точности и производительности фрезерования пространственно-сложных поверхностей на станках с ЧПУ: дис. канд. техн. наук: 05.02.08. / Выбойщик Александр Владимирович. - Челябинск, 2000. – 182с.

19. Гейкин В.А. Технология производства двигателей нового поколения / В.А. Гейкин, Н.И. Шаронова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – Т. 3. № 2 (45). – С. 11-13.

20. Горелов В.А., К вопросу выбора технологии обработки сложнопрофильных изделий (на примере лопаток моноколес газотурбинных двигателей) / В.А. Горелов, С.В. Аршинов, Ю.В. Максимов, Б.Е. Пини, А.А. Бекаев, В.Г. Мерзликин, А.Ю. Второва // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2012. – Т. 2. № 2 (14). – С. 67-73.

21. ГОСТ 23537-79 Лопатки авиационных осевых компрессоров и турбин. Термины и определения.

22. ГОСТ 23851-79 Двигатели газотурбинные авиационные. Термины и определения.

23. ГОС Т 26339-84 Сверла алмазные кольцевые. Технические условия.

24.Грановский Г.И. Кинематика резания. М.: Машгиз, 1948.

25. Григорьева А.В. Повышение точности проходного сечения сопловых лопаток турбин / А.В. Григорьева, Р.А.Туранский, В.Ф. Макаров // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика. 2014. Т. 2. С. 399-405.

26. Даниелян А.М., Бобрик П.И., Гуревич Я.Л. и др. Обработка резанием жаропрочных сталей, сплавов и тугоплавких материалов. М., «Машиностроение», 1965

27. Дейч М.Е. Атлас профилей решеток осевых турбин / М.Е. Дейч, Г.А. Филлипов, Л.Я. Лазарев. – М.: Машиностроение, – 1965. – 96 с.

28. Демин Ф.И. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей: [учебник] / Ф. И. Демин, Н. Д. Проничев, И. Л. Шитарев; под. общ. ред. проф. Ф. И. Демина. – 2-е изд. – Самара: СГАУ, 2012. – 324 с.

29. Дружинский И.А. Сложные поверхности: Математическое описание и технологическое обеспечение: Справочник. - Л. Машиностроение, Ленингр. отд-е, 1985. - 263 с.

30. Емин О.Н. Выбор параметров и газодинамический расчет осевых компрессоров и турбин авиационных ГТД Учебное пособие / О.Н. Емин, В.Н. Карасев, Ю.А. Ржавин. – М.: МАИ, 2003. – 146 с.

31. Жамангараев С.Ж. Кинематика и динамика формообразования сложных поверхностей на станках с ЧПУ: дис. канд. тех. наук: 05.02.18. / Жамангараев Самарбек Жолдошбекович. - Санкт-Петербург. - 1993.

32. Жеманюк П.Д. Формообразование сложно-профильных поверхностей моноколес высокоскоростным фрезерованием/ П.Д. Жеманюк, В.Ф. Мозговой, А.Я. Качан, В.П. Карась // Газотурбинные технологии, 2003 г. — №5 (26) — С. 18-21.

33. Жиганов, В. И. Механическая обработка зубчатых колес : учебное пособие /В. И. Жиганов, Ю. А. Сахно, В. В. Демидов, Е. Ю. Сахно. –Ульяновск : УлГТУ, 2011. – 134 с.

34. Зубов В.П. Исследование влияния формы, размеров и ориентации концевого инструмента на точность обработки аэродинамических поверхностей моноколес компрессора / В.П. Зубов, М.А. Абросимова. – Казань: Изв. вузов. Авиационная техника, 2000. – №4. – С.42-44

35. Ильин В.А., Позняк Э.Г. Аналитическая геометрия: Учеб. для вузов. М.:Наука, 2004 - 224 с.

36. Иноземцев А.А. Газотурбинные двигатели / А.А. Иноземцев, М.А. Нихамкин, – Пермь: ОАО "Авиадвигатель", – 2006. – 1203 с.

37. Калашников С.Н. Зуборезные резцовые головки/ С.Н. Калашников. М.: Машиностроение, 1972 – 162 с.

38. Качан А.Я. Технология обработки моноколёс высокоскоростным фрезерованием / А.Я. Качан, С.А. Петров, В.А. Панасенко, С.В. Мозговой, Г.В. Карась. – Запорожье: Вестник двигателестроения. – 2006.– №1. – С. 106 – 117.

39. Кистойчев, А. В. Проектирование лопаточного аппарата осевых компрессоров ГТУ: учебное пособие / А. В. Кистойчев. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 120 с.

40. Калинин А.А. Разработка моделей пространственно-сложных поверхностей для программирования обработки на станках с ЧПУ: дис. канд. тех. наук: 05.13.06. / Калинин Анатолий Анатольевич. – Москва. – 2007. – 129с.

41. Кайбышев О.А. Способ изготовления дисков с лопатками типа "блиск" (варианты) и штамп для осуществления способа (RU 2450883) Пат. 2450883 C1 Рос. федерация. 8 с., 1 л. ил.

42. Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей. Под общей редакцией Д.В.Хронина - М.: Машиностроение, 1989 г.

43. Косилова А.Г., Мещеряков Р.К. Справочник технолога-машиностроителя. Том 1. М., Машиностроение, 1986.

44. Кутин А.А., Туркин М.В. Передовые технологии производства сложнопрофильных изделий авиадвигателестроения на примере изготовления моноколес газотурбинных двигателей. Межотраслевая информационная служба. 2012. № 4. С. 52-57.

45. Курылев Д.В. Исследование стратегий формообразования межлопаточных каналов моноколес кольцевым инструментом// Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2016. № 2 С. 123-127.

46. Курылев Д.В. Определение геометрических параметров кольцевой фрезы для предварительной обработки межлопаточных каналов осевых моноколес// В сборнике: Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2016. С. 483-488.

47. Курылев Д.В., Лунев А.Н. Снижение кинематической погрешности при механической обработке межлопаточных каналов моноколеса кольцевым режущим инструментом// В сборнике: Поиск эффективных решений в процессе создания и реализации научных разработок в российской авиационной и ракетно-космической промышленности Международная научно-практическая конференци. 2014. С. 393-395.

48. Курылев Д.В., Лунев А.Н., Янбаев Р.М. Исследование технологических особенностей процесса лезвийной обработки деталей и заготовок, полученных различными методами аддитивной технологии// В сборнике: Аддитивные

технологии: настоящее и будущее материалы II Международной конференции. ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ. 2016. С. 28.

49. Лунев А.Н., Моисеева Л.Т., Курылев Д.В. Моделирование глубинного фрезерования пространственно-сложных поверхностей деталей из условия обеспечения заданной высоты межстрочечных гребешков в CAD/CAM системе Siemens NX// Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2014. № 2. С. 108-111.

50. Лунев А.Н., Курылев Д.В. Обзор прогрессивных методов изготовления осевых моноколес авиационных газотурбинных двигателей// Фундаментальные исследования, 2016 № 6 -1. С.78-82.

51. Лещенко А.И. Формирование качественных показателей сложно-профильных поверхностей при обработке на станках с ЧПУ. [Электронный ресурс]. // Прогресивні технологі і системи машинобудування. 2012. № 1 (44). С.135-141. Режим доступа: http://uran.donetsk.ua/~masters/2013/fimm/korol/library/article4.pdf . – (Дата обращения: 11.01.2015).

52. Ловыгин А.А., Теверовский Л.В. Современный станок с ЧПУ и CAD/CAM система. М.: ДМК Пресс, 2012. – 279 с.

53. Лозицкий Л.П. Конструкция и прочность авиационных газотурбинных двигателей. М.: Воздушный транспорт, 1992.- 533 с.

54. Лунев А.Н., Моисеева Л.Т., Мухаметзянов М.Р. Оптимизация подач при обработке межлопаточных каналов моноколеса для различных траекторий движения кольцевого инструмента. Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2008. № 4. С. 45-50.

55. Лунев А.Н., Моисеев В.С., Моисеева Л.Т. Туранов А.В., Оптимизация выбора инструментов и траектории обработки поверхностей пера лопаток ГТД. Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2004. № 2. С. 67-71.

56. Лунев А.Н., Моисеева Л.Т., Туранов А.В. Оптимизация режимов фрезерования межлопаточных каналов блисков кольцевым инструментом. Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2006. № 3. С. 60-63.

57. Лунев А.Н., Моисеева Л.Т., Стариков А.В., Ермаков Р.С. Расчет кинематической погрешности при обработке кольцевым инструментом межлопаточного канала моноколес ГТД. Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2007. № 3. С. 72-74.

58. Лунев А.Н., Моисеева Л.Т., Курылев Д.В. Моделирование глубинного фрезерования пространственно-сложных поверхностей деталей из условия обеспечения заданной высоты межстрочечных гребешков в CAD/CAM системе Siemens NX// Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2014. № 2. С. 108-111.

59. Моисеева Л.Т., Захаров О.Г., Туранов А.В., Стариков А.В. Моделирование процесса обработки межлопаточных каналов моноколес ГТД кольцевым инструментом Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2005. № 4. С. 62-66.

60. Мозговой В.Ф., Балушок К.Б., Котов И.И., Панасенко В.А., Бирук М.К. Стратегии обработки лопаток моноколёс на обрабатывающих центрах с ЧПУ с переменной 3d-коррекцией авиационно-космическая техника и технология, 2013, № 7 (104) 22-28.

61. Магеррамова Л. А. Применение биметаллических блисков, изготавливаемых методом ГИП из гранулируемых и литейных никелевых суперсплавов, для увеличения надежности и ресурса газовых турбин. Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2011. Т. 15 № 4. С. 33-38.

62. Моисеева Л.Т., Курылев Д.В. Оптимизация набора инструментов для механической обработки методами теории графов// Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2011. № 4. С. 67-69.

63. Мешкас А.Е. Технологии, позволяющие повысить эффективность обработки композиционных материалов методом фрезерования / А.Е. Мешкас, В.Ф. Макаров, В.В. Ширинкин// Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 8-2. С. 291-299.

64. Нечаев Ю.Н., Федоров Р.М. Теория авиационных газотурбинных двигателей. Часть 1 М.: Машиностроение, 1977. — 312 с.

65. ОСТ 1 02571-86 Лопатки компрессоров и турбин. Предельные отклонения размеров, формы и расположения пера.

66. ОСТ 108.020.10-82 Правила правила выполнения чертежей профилей сечений рабочей части лопаток паровых и газовых турбин и осевых компрессоров. Основные положения

67. Пат. 2264891 РФ. Способ формообразования сложнопрофильных межлопаточных каналов моноколеса ГТД и инструмент для его осуществления / О.Г. Захаров, Л.Т. Моисеева, А.Н. Лунев, В.К. Жуков

68. Пат. 2323068 РФ. Инструмент для прорезания и чистовой обработки сложнопрофильных межлопаточных каналов моноколеса газотурбинного двигателя / О.Г. Захаров, Л.Т. Моисеева, А.Н.Лунев, И.Т. Ядгаров

69. Пат 2276632 РФ. Инструмент для формообразования сложнопрофильных межлопаточных каналов моноколеса ГТД / А.В. Стариков

70. Пат. 20040033115 США Airfoil machining using cup tool / Ioan Sasu, Bertrand Turcotte

71. Пат. 20080131216 США Cup mill for airfoils / Ioan Sasu, Bertrand Turcotte

72. Пат. 20110189924 США Method of machining between contoured surfaces with cup shaped tool / Robert E. Erickson

73. Пат. 20090285647 США Method of machining integral bladed rotors for a gas turbine engine / Robert E. Erickson, Paul R. Faughnan, JR.

74. П. м. №162205 РФ. Инструмент для обработки сложнопрофильных межлопаточных каналов моноколеса газотурбинного двигателя (патент на полезную модель / А.Н. Лунев, Д.В. Курылев

75. Петров С. А. Определение траектории режущего инструмента для пятикоординатной высокоскоростной обработки несущих поверхностей лопаток и моноколёс авиационных ГТД на станках с ЧПУ // Вестник двигателестроения. 2006. №4. С. 67 – 73.

76. Полетаев В.А. Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей. Учебное пособие Москва, 2006. Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2010. № 10. С. 9-12.

77. Полетаев В.А., Волков Д.И. Основные технологические схемы обработки проточной части крыльчаток газотурбинных двигателей

78. Полетаев В.А., Волков Д.И., Клементьев А.В. Универсальный способ обработки проточной части крыльчаток ГТД. Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2010. № 1. С. 116-120.

79. Полетаев В.А., Сыркин И.С. Разработка и управление ходом технологического процесса электроэрозионной обработки// Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2007. № 1. С. 60-66.

80. Полетаев В.А., Цветков Е.В. Особенности автоматизированной механической обработки лопаток турбин// СТИН. 2014. № 9. С. 20-23.

81. Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Галушка И.А. Технология пайки конструкции типа «блиск» из разноименных сплавов. Труды ВИАМ. 2013. № 10. С. 2.

82. Сакаев А.Х., Высокотехнологическое обеспечение обработки профильных поверхностей лопаток турбин на обрабатывающем центре / А.Х. Сакаев, В.Ф. Макаров // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2012. № 15. С. 138-141.

83. Свищев Г.П. Надежность и ресурс авиационных газотурбинных двигателей/ под ред. Свищева Г.П., Биргера И.А. М.: Машиностроение, 1969.

84. Сироткин Я.А. Аэродинамический расчет лопаток осевых турбомашин, М.: Машиностроение, 1972. 448 с.

85. Смольников Н.Я. Влияние схемы резания на точность зубофрезерования / Н.Я. Смольников, С.И. Агапов // СТИН. 2002. № 7. С. 31-32.

86. Стржемячный М.М., Хренов А.С. Компьютерное проектирование процессов механической обработки деталей на многопрофильных станках с ЧПУ на основе анализа объемных технологических размерных цепей [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.mami.ru/science/mami145/scientific/article/s07/s07_38.pdf. – (Дата обращения: 08.01.2015).

87. Технология производства авиационных газотурбинных двигателей: Учебное пособие для вузов / Ю.С. Елисеев, А.Г. Бойцов, В.В. Крымов, Л.А. Хворостухин. М.: Машиностроение, 2003. 512 с, ил.

88. Тихонов Н.Т. Теория лопаточных машин авиационных газотурбинных двигателей. Курс лекций. / Н.Т. Тихонов, Н.Ф. Мусаткин, В.Н. Матвеев – :Изд-во СГАУ, Самара. 2001. – 155 с.

89. Туранов А.В., Моисеева Л.Т., Лунев А.Н. К методике расчета режимов фрезерования поверхностей лопаток ГТД. Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2005. № 2. С. 60-64.

90. Ушаков К.А., Брусиловский И.В., Бушель А.Р. Аэродинамика осевых вентиляторов и элементы их конструкций. М.: Гостехиздат, 1960. 424 с.

91. Фомичев Е.О., Воронин Н.Н. Анализ существующих способов восстановления лопаток компрессора газотурбинного двигателя. Двигатель. 2013. № 5 (89). С. 20-21.

92. Холщевников К.В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. М.: Машиностроение, 1970. 523 е., ил.

93. Шевелева Г.И. Теория формообразования и контакта движущихся тел. Монография. М.: 1999.

94. Юрьев В.Л. Повышение точности механообработки нежестких деталей ГТД на основе коррекции траектории движения инструмента / В.Л. Юрьев, С.В. Старовойтов, А.А. Тихонова // Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий. – Уфа. – 2015. – С. 54-59.

95. Юнусов Ф.С., Краснова Н.В. Математическое моделирование процесса формообразования винтовых поверхностей аэродинамического профиля. // Прогрессивные методы обработки деталей летательных аппаратов и двигателей: Межвузовский сборник научных трудов. - Казань: КАИ, 1978.

96. Юнусов Ф.С., Лунев А.Н., Юнусов Р.Ф. Формообразование сложно-профильных и крупногабаритных поверхностей полусвободным инструментом: Монография. Казань: Изд-во Казан. гос.техн. ун-та, 2011. - 280с.

97. Application of Vibropeening on Aero-Engine Component / G. Feldmann, C.C. Wong, W. Wei, T. Haubolda// Procedia CIRP. – 2014. – Is. 13. – P. 423 – 428.

98. Bhamji I., Preuss M., Threadgill P.L., Addison A.C. Solid state joining of metals by linear friction welding: a literature review. Materials Science and Technology. 2011. Т. 27. № 1. С. 2-12.

99. Cutting tool geometry for plunge milling - process optimization for a stainless steel / M. Witty, T. Bergs, A. Schafer, and G Cabral // Journal of Materials Processing Technology. – 2013. – Vol. 213, Is. 8. – P. 1378-1386

100. Dong Z., Di Z., Zhengyang X., Laishui Z. Trajectory control strategy of cathodes in blisk electrochemical machining. Chinese Journal of Aeronautics. 2013. Т. 26 № 4. С. 1064 - 1070.

101. ECM - электрохимическая обработка. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2013. № 2 (62). С. 6-12

102. Klocke F. Experimental research on the electrochemical machining of modern titanium- and nickel-based alloys for aero engine components / F. Klocke, M. Zeis, A. Klink, D.Veselovac // Procedia CIRP. – 2013. – Is. 6. – P. 368 – 372.

103. Klocke F. Influence of Threshold Based Process Control on Sinking EDM of a High Aspect Ratio Geometry in a Gamma Titanium Aluminide / F. Klocke, M. Holstena, D. Welling, A. Klink, R. Perez // Procedia CIRP. – 2015. – Is. 35. – P. 73 – 78.

104. Klocke, F. New concepts of force measurement systems for specific machining processes in aeronautic industry / F. Klocke, S. Gierlings, O. Adams, T. Auerbach, S. Kamps, D. Veselovac, M. Eckstein, A. Kirchheim, M.Blattner, R. Thiel, D. Kohler // Procedia CIRP. – 2012. – Is. 1. – P. 552 – 557.

105. Klocke F. Technological and Economical Comparison of Roughing Strategies via Milling, EDM and ECM for Titanium- and Nickel-based Blisks / F. Klocke, M. Zeis, A. Klink, D. Veselovac // Procedia CIRP. – 2012. Is.2. – P. 98 - 101.

106. Kappmeyer G., Hubig C., Hardy M., Witty M., Busch M. Modern machining of advanced aerospace alloys - enabler for quality and performance. Procedia CIRP, 2012, 1, 28-43

107. Koop W. The Integrated High Performance Turbine Engine Technology (IHPTET) Program. ISABE 97-7175. 5p.

108. Liu X. Liang Electrode feeding path searching for 5-axis EDM of integral shrouded blisks / X. Liu, X. Kang, W. Zhao, W. Liang //Procedia CIRP. – 2013. – Is. 6. С. 107 - 111.

109. Overview on five-axis precision EDM techniques / D.Y. Yang, F.G. Cao, J.Y. Liu, L.G. Yang, K. Zhang, Y.F Zhu // Procedia CIRP. – 2013. – Is. 6. – P. 192 – 198.

110. Reliable Manufacturing Process in Turbine Blisks and Compressors / A. Calleja, A. Fernández, F.J. Campa , A. Lamikiz , L.N. López de Lacalle // Procedia Engineering. – 2013. – Is. 63. – P. 960 – 66

111. Shot Peening Method for Aerofoil Treatment of Blisk Assemblies / W. Hennig, G. Feldmann, T. Haubold // Procedia CIRP. – 2014. – Is. 13. – P. 355 – 358.

112.Stricken J.M., Norden CM. Advanced Turbine Engine Concepts and Their Impact on the Next Millenium. ISABE97-7174. 8p.

113. Tool Path Generation for Clean-up Machining of Impeller/ T. Ming, Z. Dinghua, L. Ming, W. Baohai// Chinese Journal of Aeronautics. –2012. – Is. 25. – P. 131-136.

114. Yigit I.E., A solid modeler based engagement model for 5-axis ball end milling / I.E. Yigit, S. Ehsan Layegh K., I. Lazoglu // Procedia CIRP. – 2015. – 31. – P. 179 – 184.

115. Zhao W. A novel high efficiency electrical erosion process – Blasting erosion arc machining / W. Zhao, L. Gu, H. Xu, L. Li, X. Xiang // Procedia CIRP. – 2013. – Is.6. – P. 621 – 625.

Приложение 1. Акт внедрения АО КМПО

Утверждаю
Заместитель генерального директора АО «КМПО»
по газоэнергетическому оборудованию
_____ Бобылев Л.В.
«__» _____ 2016 г.

АКТ

о практическом использовании результатов научно-исследовательской работы

Разработка Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н.Туполева «Основы многокоординатного формообразования межлопаточных каналов осевых моноколес при предварительном прорезании кольцевым режущим инструментом», выполненная аспирантом кафедры технологии машиностроительных производств Курылевым Дмитрием Валерьевичем, передана Казанскому моторостроительному производственному объединению и принята им для использования в подготовке лопаточного производства, в том числе при освоении изготовления моноколес осевого компрессора нового вертолетного газотурбинного двигателя.

КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева переданы, а КМПО приняты:

1.Методики и геометрические модели для определения размеров кольцевого инструмента в зависимости от комплекса параметров трактовых поверхностей моноколес.

2.Кинематические схемы и математические модели формообразования кольцевым режущим инструментом, учитывающие возможность использования при предварительном прорезании межлопаточных каналов от одной до шести управляемых координат.

3.Методики и рекомендации по разработке технологических процессов производства моноколес в части определения заводскими технологами количества управляемых координат и использовании предпочтительной по технико-экономическим показателям схемы многокоординатного формообразования, обеспечивающей максимальную производительность с учетом обработки кольцевым инструментом и последующим выравниванием припуска.

От предприятия:
Главный конструктор газотурбинных двигателей _____ Бывшев И.И.
Главный технолог _____ Долгих Е.М.
Начальник отдела механизации и автоматизации, к.т.н. _____ Фирсов А.Г.

От КНИТУ-КАИ:
Исполнитель
_____ Курылев Д.В.

Приложение 2. Акт внедрения ПАО КМПО

Утверждаю
Директор по производству
ПАО «КАИ-Лазер»
_____ Кротов О.В.
2 сентября 2016 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Курылева Д.В. «Основы многокоординатного формообразования межлопаточных каналов осевых моноколес при предварительном прорезании кольцевым инструментом»

Настоящим подтверждается, что результаты научно-исследовательской работы «Основы многокоординатного формообразования межлопаточных каналов осевых моноколес при предварительном прорезании кольцевым инструментом», выполненной аспирантом Казанского национального исследовательского технического университета имена А.Н.Туполева Курылевым Дмитрием Валерьевичем, переданы Региональному инжиниринговому центру промышленных лазерных технологий «КАИ-Лазер» и приняты для использования в разрабатываемых технологиях по производству сборно-сварных конструкций сопловых и направляющих аппаратов газотурбинных двигателей на операции пригонки концевых профилей пера после лазерной сварки лопаток с внутренним кольцом и перед сваркой с наружным кольцом статора. Необходимость данной операции обусловлена короблением лопаток при сварке и появлением смещения профилей пера от номинального расположения. За основу для разработки операционной технологии взята разработанная Курылевым Д.В. схема многокоординатного формообразования спинки и корыта концевой части пера лопаток в составе лопаточного венца чашечными алмазными кругами с ориентацией инструмента вокруг хорды обрабатываемого профиля.

От ПАО «КАИ-Лазер»
Инженер исследователь
_____ Нагуманн С.Ю.
Оператор станка с ПУ
_____ Нюхляев О.А.

От КНИТУ-КАИ:
Исполнитель
_____ Курылев Д.В.

Приложение 3. Акт внедрения КНИТУ-КАИ

Утверждаю
Проректор по НиИД
_____ С.А. Михайлов
«3» октября 2016 г.

АКТ
об использовании результатов научно-исследовательской работы
в образовательной деятельности

Разработка Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н.Туполева «Основы многокоординатного формообразования межлопаточных каналов осевых моноколес при предварительном прорезании кольцевым режущим инструментом», выполненная аспирантом кафедры технологии машиностроительных производств Курылевым Дмитрием Валерьевичем принята для использования в учебном процессе студентов 4 курсов на кафедре «Технологии машиностроительных производств» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ» .

При подготовке лекционного курса и практических занятий по дисциплине «Автоматизация подготовки механосборочных производств» были использованы:

1. Кинематические схемы и математические модели формообразования межлопаточных каналов осевых моноколес кольцевым инструментом и их реализация в системе автоматизированного проектирования.

2. Методики по разработке технологических процессов производства моноколес в части определения заводскими технологами количества управляемых координат и использовании предпочтительной по технико-экономическим показателям схемы многокоординатного формообразования, обеспечивающей максимальную производительность с учетом обработки кольцевым инструментом и последующим выравниванием припуска.

Заведующий кафедрой технологии
машиностроительных производств
к.т.н., доцент
_____ Янбаев Р.М.

Исполнитель
_____ Курылев Д.В.

Приложение 4 Патент на полезную модель



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 162205

ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ МЕЖЛОПАТОЧНЫХ КАНАЛОВ МОНОКОЛЕСА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ" (КНИТУ-КАИ) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № **2015120192**

Приоритет полезной модели **27 мая 2015 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации ***11 мая 2016 г.***

Срок действия патента истекает **27 мая 2025 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

Приложение 5. Код программы построения математической модели комплекса поверхностей после обработки кольцевым инструментом

```
Option Strict Off
Imports System
Imports NXOpen
Imports System.IO
Imports System.Text
Imports System.Xml.Linq
Module NXJournal
Sub Main (ByVal args() As String)
Dim theSession As NXOpen.Session = NXOpen.Session.GetSession()
Dim workPart As NXOpen.Part = theSession.Parts.Work
Dim displayPart As NXOpen.Part = theSession.Parts.Display
Dim nullNXOpen_Unit As NXOpen.Unit = Nothing
Dim path As String = "C:\Programming\O4185.txt"
Dim line() As String = IO.File.ReadAllLines(path)
Dim b as string
For i As integer = 0 to N
        Dim st() as string = split(line(i))
        b = replace(st(4),"B","")
        workPart.Expressions.EditWithUnits(CType(workPart.Expressions.FindObject("x"), NXOpen.Expression),
nullNXOpen_Unit, replace(st(2),"Y",""))
        workPart.Expressions.EditWithUnits(CType(workPart.Expressions.FindObject("y"), NXOpen.Expression),
nullNXOpen_Unit, replace(st(1),"X-",""))
        workPart.Expressions.EditWithUnits(CType(workPart.Expressions.FindObject("z"), NXOpen.Expression),
nullNXOpen_Unit, replace(st(3),"Z",""))
        workPart.Expressions.EditWithUnits(CType(workPart.Expressions.FindObject("B"), NXOpen.Expression),
nullNXOpen_Unit, b)
        workPart.Expressions.EditWithUnits(CType(workPart.Expressions.FindObject("i"), NXOpen.Expression),
nullNXOpen_Unit, Cstr(i))
        theSession.UpdateManager.DoUpdate(theSession.SetUndoMark(NXOpen.Session.MarkVisibility.Visible,
"Начало"))
Dim nullNXOpen_Features_BooleanFeature As NXOpen.Features.BooleanFeature = Nothing
Dim booleanBuilder1 As NXOpen.Features.BooleanBuilder
booleanBuilder1 = workPart.Features.CreateBooleanBuilderUsingCollector(nullNXOpen_Features_BooleanFeature)
Dim scCollector1 As NXOpen.ScCollector
scCollector1 = booleanBuilder1.ToolBodyCollector
Dim booleanRegionSelect1 As NXOpen.GeometricUtilities.BooleanRegionSelect
booleanRegionSelect1 = booleanBuilder1.BooleanRegionSelect
booleanBuilder1.Tolerance = 0.001
booleanBuilder1.Operation = NXOpen.Features.Feature.BooleanType.Subtract
Dim body1 As NXOpen.Body = CType(workPart.Bodies.FindObject("UNPARAMETERIZED_FEATURE(6)"),
NXOpen.Body)
Dim added1 As Boolean
added1 = booleanBuilder1.Targets.Add(body1)
Dim targets1(0) As NXOpen.TaggedObject
targets1(0) = body1
booleanRegionSelect1.AssignTargets(targets1)
```

```
Dim scCollector2 As NXOpen.ScCollector
scCollector2 = workPart.ScCollectors.CreateCollector()
Dim features1(0) As NXOpen.Features.Feature
Dim extrude1 As NXOpen.Features.Revolve = CType(workPart.Features.FindObject("REVOLVED(5)"),
NXOpen.Features.Revolve)
features1(0) = extrude1
Dim bodyFeatureRule1 As NXOpen.BodyFeatureRule
bodyFeatureRule1 = workPart.ScRuleFactory.CreateRuleBodyFeature(features1, False)
Dim rules1(0) As NXOpen.SelectionIntentRule
rules1(0) = bodyFeatureRule1
scCollector2.ReplaceRules(rules1, False)
booleanBuilder1.ToolBodyCollector = scCollector2
Dim targets2(0) As NXOpen.TaggedObject
targets2(0) = body1
booleanRegionSelect1.AssignTargets(targets2)
Dim nXObject1 As NXOpen.NXObject
Dim n as string = "8"
Try
  nXObject1 = booleanBuilder1.Commit()
Catch ex As NXException
        n = "7"
End Try
booleanBuilder1.Destroy()
Dim nullNXOpen_Features_MoveObject As NXOpen.Features.MoveObject = Nothing
Dim moveObjectBuilder1 As NXOpen.Features.MoveObjectBuilder
moveObjectBuilder1 = workPart.BaseFeatures.CreateMoveObjectBuilder(nullNXOpen_Features_MoveObject)
moveObjectBuilder1.MoveObjectResult = NXOpen.Features.MoveObjectBuilder.MoveObjectResultOptions.CopyOriginal
moveObjectBuilder1.LayerOption = NXOpen.Features.MoveObjectBuilder.LayerOptionType.AsSpecified
moveObjectBuilder1.MoveParents = False
moveObjectBuilder1.Associative = True
Dim origin1 As NXOpen.Point3d = New NXOpen.Point3d(0.0, 0.0, 0.0)
Dim vector1 As NXOpen.Vector3d = New NXOpen.Vector3d(1.0, 0.0, 0.0)
Dim direction1 As NXOpen.Direction
direction1 = workPart.Directions.CreateDirection(origin1, vector1, NXOpen.SmartObject.UpdateOption.WithinModeling)
moveObjectBuilder1.TransformMotion.DistanceVector = direction1
Dim origin2 As NXOpen.Point3d = New NXOpen.Point3d(0.0, 0.0, 0.0)
direction1.Origin = origin2
Dim added2 As Boolean
added2 = moveObjectBuilder1.ObjectToMoveObject.Add(body1)
Dim nXObject2 As NXOpen.NXObject
nXObject2 = moveObjectBuilder1.Commit()
Dim objects1() As NXOpen.NXObject
objects1 = moveObjectBuilder1.GetCommittedObjects()
moveObjectBuilder1.Destroy()
Dim ob as string = "UNPARAMETERIZED_FEATURE(" + n + ")"
Dim features2(0) As NXOpen.Features.Feature
Dim brep1 As NXOpen.Features.Brep = CType(workPart.Features.FindObject(ob), NXOpen.Features.Brep)
features2(0) = brep1
```

```
workPart.Features.ReorderFeature(features2, extrude1, NXOpen.Features.FeatureCollection.ReorderType.After)
Dim objects2(0) As NXOpen.NXObject
Dim brep2 As NXOpen.Features.Brep = CType(workPart.Features.FindObject("UNPARAMETERIZED_FEATURE(7)"),
NXOpen.Features.Brep)
objects2(0) = brep2
theSession.UpdateManager.AddToDeleteList(objects2)
Dim notifyOnDelete2 As Boolean
notifyOnDelete2 = theSession.Preferences.Modeling.NotifyOnDelete
Dim features3(0) As NXOpen.Features.Feature
features3(0) = brep1
Dim edgeBlend1 As NXOpen.Features.Revolve = CType(workPart.Features.FindObject("REVOLVED(5)"),
NXOpen.Features.Revolve)
workPart.Features.ReorderFeature(features3, edgeBlend1, NXOpen.Features.FeatureCollection.ReorderType.After)
theSession.UpdateManager.DoUpdate(theSession.SetUndoMark(NXOpen.Session.MarkVisibility.Visible, "Start"))
Dim markId1 As NXOpen.Session.UndoMarkId
markId1 = theSession.SetUndoMark(NXOpen.Session.MarkVisibility.Visible, "Start")
brep1 = CType(workPart.Features.FindObject("UNPARAMETERIZED_FEATURE(6)"), NXOpen.Features.Brep)
features1(0) = brep1
edgeBlend1  = CType(workPart.Features.FindObject("REVOLVED(5)"), NXOpen.Features.Revolve)
workPart.Features.ReorderFeature(features1, edgeBlend1, NXOpen.Features.FeatureCollection.ReorderType.Before)
theSession.Preferences.Modeling.UpdatePending = False
Dim nErrs1 As Integer
nErrs1 = theSession.UpdateManager.DoUpdate(markId1)
theSession.Preferences.Modeling.UpdatePending = False
theSession.SetUndoMarkName(markId1, "Изменить порядок построения")
Dim markId2 As NXOpen.Session.UndoMarkId
markId2 = theSession.SetUndoMark(NXOpen.Session.MarkVisibility.Visible, "Start")
features2(0) = brep1
workPart.Features.ReorderFeature(features2, edgeBlend1, NXOpen.Features.FeatureCollection.ReorderType.After)
theSession.Preferences.Modeling.UpdatePending = False
Dim nErrs2 As Integer
nErrs2 = theSession.UpdateManager.DoUpdate(markId2)
theSession.Preferences.Modeling.UpdatePending = False
theSession.SetUndoMarkName(markId2, "Изменить порядок построения")
Next
End Sub
End Module
```