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)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ульяновск 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» на кафедре «Технологии машиностроительных производств»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Лунев Александр Николаевич

Официальные оппоненты: **Макаров Владимир Федорович,**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», профессор кафедры «Инновационные технологии машиностроения».
Агапов Сергей Иванович,
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», доцент кафедры «Технология машиностроения».

Ведущая организация **ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьева»**

Защита состоится «27» декабря 2016 года в 15.00 часов на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.003.02, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «УлГТУ», почтовый адрес: 432027, ГСП, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32) и федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тольяттинский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ТГУ», почтовый адрес: 445667, ГСП, г. Тольятти, ул. Белорусская, д. 14) по адресу: 432063, г. Ульяновск, ул. Энгельса, 3, первый корпус, ауд. 117.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте Ульяновского государственного технического университета, адрес сайта www.ulstu.ru.

Автореферат разослан «___» ноября 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Веткасов Николай Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современные осевые компрессоры и турбины должны отвечать требованиям минимального веса, высокой эффективности, экономичности и долговечности. Для обеспечения непрерывности процессов сжатия и расширения рабочего тела они выполняются в виде лопаточных машин. Масса компрессора и турбины современных газотурбинных двигателей составляет 60...70 % массы всего авиационного двигателя, поэтому лопаточные машины должны иметь минимальную массу и габариты. Использование в роторе таких машин моноколес позволяет добиться снижения массы конструкции до 25 % от исходного и повысить частоту его вращения до 50…80 тысяч об/мин.

Изготовление осевых моноколес из непрофилированых заготовок, включающее фрезерную обработку лопаточных венцов концевой фрезой, является одним из самых распространённых способов производства этих деталей. Недостатком этого технологического приема является низкая производительность фрезерной обработки из-за необходимости удаления большого количества металла инструментом малой жесткости при небольшом размере его режущей части.

Производительность производства моноколес можно увеличить, использовав разработанную в КНИТУ-КАИ в 2003 г. схему прорезания межлопаточных каналов кольцевым инструментом. Эта схема близка к известному способу нарезания конических колес с круговыми зубьями резцовой головкой. Однако до сих пор рассматривали отдельные, часто не связанные между собой вопросы, отсутствуют методики определения геометрических параметров кольцевого инструмента и расчета процесса формообразования при различном количестве управляемых координат.

Цель работы. Повышение производительности изготовления осевых моноколес из непрофилированных заготовок.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

1. Выявлены зависимости конфигурации и размеров кольцевого режущего инструмента от комплекса параметров трактовых поверхностей моноколес осевых компрессоров и турбин.
2. Определена область применения кольцевого инструмента для формообразования межлопаточных каналов моноколес с применяемыми в авиадвигателестроении лопаточными решетками.
3. Разработаны кинематические схемы и математические модели многокоординатного формообразования межлопаточных каналов кольцевым инструментом.
4. Установлено влияние числа управляемых координат на погрешность формообразования межлопаточных каналов кольцевым инструментом с использованием численного эксперимента.
5. Экспериментально исследованы различные по числу управляемых координат схемы многокоординатного формообразования для сопоставления этих схем по

точности и производительности обработки с учетом результатов численного и натурного экспериментов.

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

Научная новизна работы заключается:

– в математических зависимостях формы и размеров кольцевого инструмента от комплекса геометрических параметров моноколес осевых компрессоров и турбин.

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

– в разработанных методиках расчета траектории движения кольцевого инструмента при прорезании межлопаточных каналов в зависимости от выбранной кинематической схемы.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования следующих разработок:

– методики подбора типоразмера кольцевого инструмента для обработки межлопаточных каналов различных моноколес осевых компрессоров и турбин;

– методики расчета траектории движения кольцевого инструмента во время обработки межлопаточных каналов;

– рекомендации по применению кольцевого инструмента для формообразования межлопаточных каналов моноколес и определению предпочтительной схемы по технико-экономическим показателям.

Методология и методы исследования. Теоретические исследования проводили на основе положений технологии машиностроения, теории математического моделирования. Исследования выполнены с использованием CAD/CAM системы Siemens NX и на станках с ЧПУ на кафедре «Технологии машиностроительных производств» КНИТУ им. А.Н. Туполева – КАИ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математические зависимости формы и размеров кольцевого инструмента от комплекса параметров трактовых поверхностей осевых моноколес.
2. Разработанные кинематические схемы и математические модели многокоординатного формообразования межлопаточных каналов кольцевым инструментом.
3. Результаты экспериментальных исследований выполненных с целью определения влияния количества управляемых координат на погрешность формообразования межлопаточных каналов кольцевым инструментом с использованием численного эксперимента.

4. Разработанные методики расчета траектории движения инструмента при прорезании межлопаточных каналов в зависимости от выбранной кинематической схемы.

Степень достоверности результатов и апробации работы.

Достоверность результатов теоретических исследований обеспеченая путем применения апробированных методов аналитической и дифференциальной геометрии, теории поверхностей, имитационного моделирования, теории формообразования. Достоверность разработанных математических моделей и схем формообразования подтверждается результатами имитационного моделирования и натурного эксперимента.

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

В полном объеме диссертация докладывалась на расширенном заседании кафедры «Технология машиностроительных производств» КНИТУ им. А.Н. Туполева-КАИ и на расширенном заседании кафедр «Технология машиностроения» и «Металлорежущие станки и инструменты» УлГТУ.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 11 научных работ, из них 4 в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, получен патент на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, библиографии (108 литературных источников) и приложений. Объем диссертации – 134 страницы. В тексте 80 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».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, дана ее общая характеристика, определены научное и практическое значение решаемой задачи, приведены научные положения и результаты, выносимые на защиту.

В первой главе показаны конструктивно-технологические особенности конструкции и рассмотрены проблемы производства моноколес осевых компрессоров и турбин. Установлено, что одним из основных способов производства моноколес является их изготовление из непрофилированых

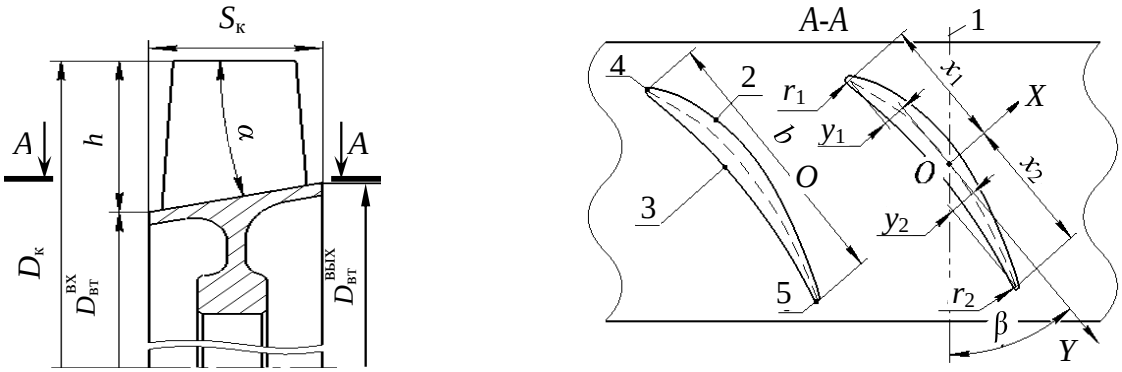
заготовок, включающее фрезерную обработку лопаточных венцов концевой фрезой с последующей окончательной обработкой с использованием шлифования и ЭХО. Проблеме механической обработки лопаточных венцов посвящены работы Богуслаева А.В., Гейкина В.А., Качана А.Я., Макарова В.Ф., Полетаева В.А., Witty M., Klocke F. и др. Авторы отмечают, что недостатком этой технологии является низкая производительность обработки из-за необходимости удаления большого объема металла инструментом малой жесткости при небольшом размере его режущей части и др.

Лунев А.Н., Моисеева Л.Т., Стариков А.В, Turcotte B.D., Erickson R.E. и др. предложили и запатентовали различные варианты конструкции кольцевого инструмента, а также принципиальные схемы траектории движения кольцевого инструмента, которые позволяют повысить производительность обработки лопаточных венцов. Однако в этих работах рассматривали лишь отдельные, часто не связанные между собой вопросы, отсутствуют методики определения оптимальных геометрических параметров кольцевого инструмента и методики расчета процесса формообразования при различном числе управляемых координат.

В заключение первой главы на основании анализа состояния проблемы и выбранного направления исследований сформулированы цель и задачи работы.

Во второй главе аналитическим путем получены зависимости формы и размеров кольцевого инструмента учитывающие геометрические параметры межлопаточных каналов моноколес осевых компрессоров и турбин.

Геометрические параметры осевого моноколеса условно можно разделить на параметры, описывающие осевое моноколесо в целом (рис. 1,а), и параметры, относящиеся к перу лопатки (рис. 1,б). Профиль пера лопатки осевого моноколеса описывают совокупностью заданных плоских профилей через координаты массива точек спинки *2* [$x_с$; $y_с$] и корыта *3* [$x_к$; $y_к$] относительно системы координат теоретического профиля *XOY*, которая повернута на угол β относительно оси вращения *1* (см. рис. 1,б).



а) *б*)

Рис.1. Основные геометрические параметры моноколеса осевой ступени
а – в меридиональном сечении; б – в сечении А-А;
1 – ось вращения моноколеса; 2, 3 – профили спинки и корыта; 4, 5 – входная и выходная кромки;
XOY – система координат профиля

Под кольцевым инструментом понимается инструмент, выполненный в виде тела вращения *1* с наличием внутренней полости. На наружной *2*, внутренней *3* и торцевой части *4* этого инструмента располагаются режущие кромки (рис. 2).

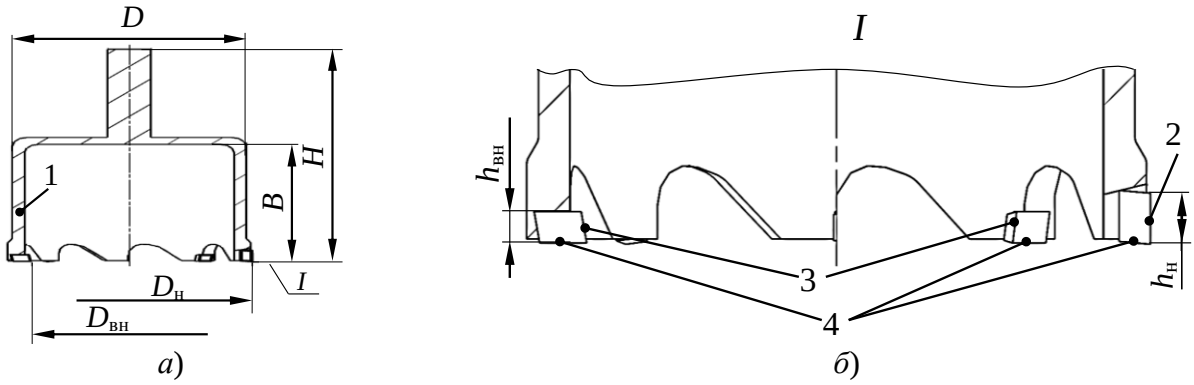


Рис. 2. Основные геометрические параметры кольцевого инструмента:
а - кольцевой инструмент; б – режущие элементы;
1 – корпус инструмента; 2, 3 и 4 – наружная, внутренняя и торцевая части режущей кромки

При определении размеров кольцевого инструмента необходимо учитывать особенности конструкции осевого моноколеса и его геометрические параметры. Условно выделены три ограничения:

1. Ограничение по наружному диаметру режущей части кольцевого инструмента. При прорезке межлопаточного канала моноколеса съем материала должен происходить только в зоне обработки (рис. 3).

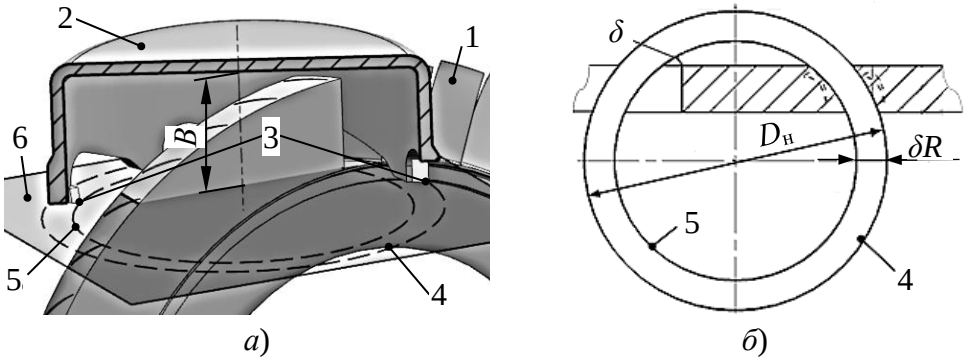


Рис. 3. Положение кольцевого режущего инструмента при обработке осевого моноколеса:
а – положение инструмента и заготовки; б – сечение в плоскости резание;
1 – заготовка; 2 – кольцевой инструмент; 3 – режущие кромки инструмента;
4 и 5 – наружная и внутренние части режущей кромки; 6 – плоскость резания;
δ – гарантированный зазор

Минимальный наружный диаметр режущей части, гарантирующий в процессе обработки зазор δ:

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

где $D_к$ – наружный диаметр моноколеса (см. рис. 1,а), мм; $\bar{h} = h/b$ – относительная высота пера лопатки; h – абсолютная высота пера лопатки, мм; b – длина хорды профиля (см. рис. 1,б), мм; $\theta = D_к/h$ – веерность моноколеса.

2. Ограничение по ширине режущей части инструмента. Максимальная ширина режущей части $\delta R_{\max}$ ограничивается шириной межлопаточного канала в корневой части пера лопаток. Упрощенно её можно определить как

$$\delta R_{\max} = \frac{D_{\text{н}}}{2} - \frac{b}{2\sin(\alpha_1+\alpha_2)} - \sqrt{\left(\frac{D_{\text{к}}}{2}\sin\left(\frac{360}{N}\right)\right)^2 \sin^2(\beta) + \left(\frac{\sqrt{D_{\text{н}}^2 - b^2}}{2} - \frac{b}{2\operatorname{tg}(\alpha_1+\alpha_2)} - t\cos(\beta)\right)^2}, \quad (2)$$

где N – количество лопаток моноколеса, шт; α_1 и α_2 – углы, характеризующие профиль спинки:

$$\alpha_1 = \operatorname{arctg}\left(\frac{y_j - y_1}{x_j - x_1}\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right); \qquad \alpha_2 = \operatorname{arctg}\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{y_j - y_2}{x_j - x_2}\right), \quad (3)$$

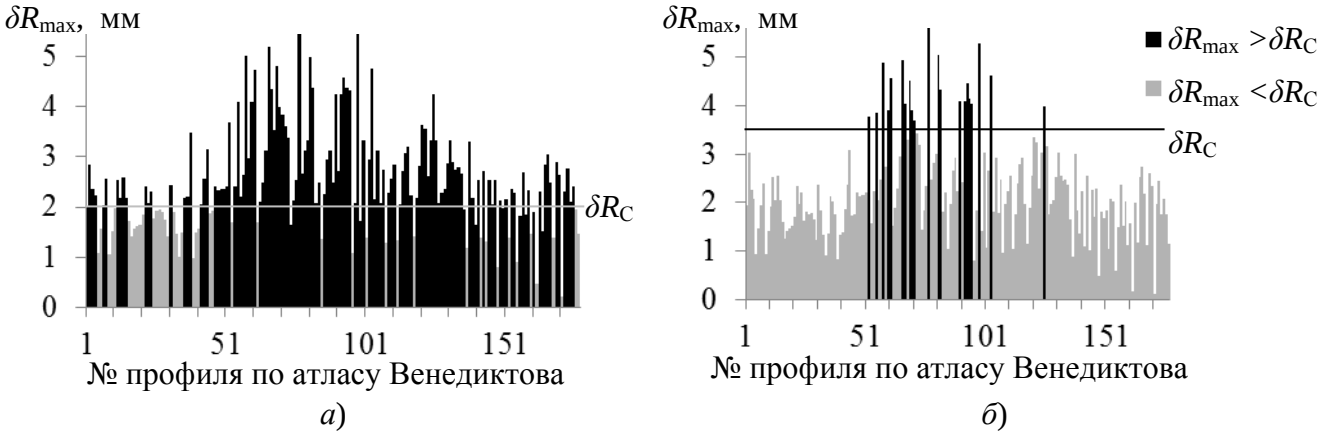
где $[x_1; y_1]$ и $[x_2; y_2]$ – координаты центров скруглений входной и выходной кромок (рис. 1,б) мм; $[x_j; y_j]$ – координаты средней точки профиля спинки, мм.

Рассчитанная ширина режущей части кольцевого инструмента должна быть не меньше, чем регламентированная по параметрам прочности и жесткости, например, в ГОСТ 26339-84 «Сверла алмазные кольцевые. Технические условия».

3. Ограничение высоты внутренней полости корпуса кольцевого инструмента. Глубина внутренней полости B кольцевого инструмента должна быть больше высоты лопатки осевого моноколеса (см. рис. 3):

$$B \geq D_{\text{н}} \frac{\bar{h}\cos(\beta)}{\sqrt{\sin^2(\beta) + \left(\bar{h}\sqrt{\theta+1} + 0{,}5\cdot\operatorname{tg}(\beta)\sin(\beta)\right)^2}}. \quad (4)$$

С целью оценки области применения кольцевого инструмента для обработки различных осевых моноколес были определены значения $\delta R_{\max}$ по формуле (2), при этом наружный диаметр кольцевого инструмента был найден по формуле (1). Полученные значения $\delta R_{\max}$ сравнивали с регламентируемой ГОСТ 26339-84 шириной режущей части кольцевого инструмента δR_{C} (рис. 4).



а) *б*)

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

В диапазоне анализируемых относительных высот (от $\bar{h}$ = 1,9 до $\bar{h}$ = 7) и веерности (от θ = 5 до θ = 4) установлено, что область применения кольцевого инструмента для полной (до дна межлопаточного канала) обработки различных

моноколес увеличивается от 11% при обработке моноколес с $\bar{h}$ = 7 и θ = 4 до 76% при обработке моноколес с $\bar{h}$ = 1,9 и θ = 5. Для моноколес, у которых расчетное значение ширины режущей части δR_{max} меньше, чем регламентированная стандартом δR_C, допускается частичная обработка межлопаточного канала ближайшим меньшим по ширине стандартизованным кольцевым инструментом.

В третьей главе рассмотрены кинематические схемы многокоординатного формообразования межлопаточных каналов кольцевым инструментом с числом управляемых координат от одной до шести.

При однокоординатной обработке (рис. 5) кольцевой инструмент *1* устанавливают в исходное положение таким образом, чтобы торцевая часть инструмента *3* была параллельна дну межлопаточного канала *4* заготовки моноколеса *2*. Инструменту сообщают поступательное движение вдоль оси *Z* по направлению ко дну межлопаточного канала *4* от z_{max} до z_{min}. Для обработки следующего межлопаточного канала заготовке с помощью делительного устройства *5* сообщается движение $\omega_{дел}$ на угол α=360/*N*.

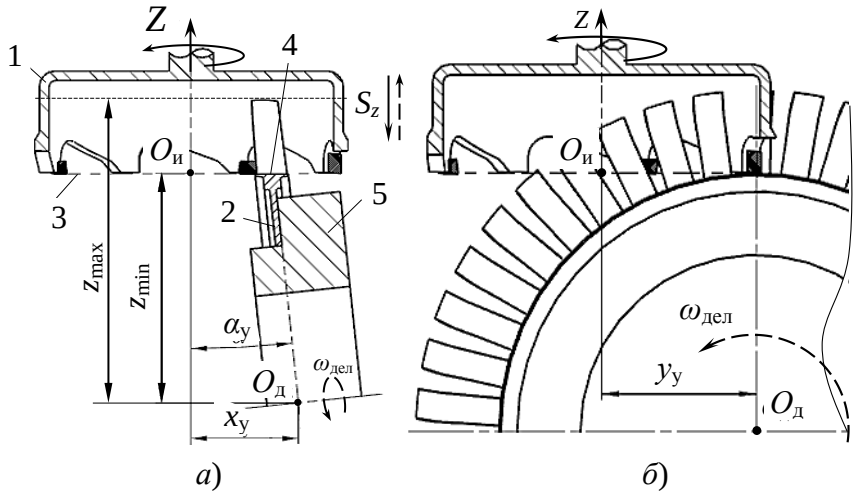


Рис. 5. Кинематическая схема однокоординатного формообразования межлопаточного канала с использованием делительного устройства: а – вид сбоку; б – вид спереди

Значение угла установки $\alpha_у$ можно определить как:

$$\alpha_у = \mathrm{arctg}\left(\frac{D_{вт}^{вх} - D_{вт}^{вых}}{2 \cdot S_к}\right), \quad (5)$$

где $D_{вт}^{вх}$ и $D_{вт}^{вых}$ – диаметр втулки моноколеса во входном и выходном сечениях (см. рис. 1,а), мм; $S_к$ - ширина моноколеса, мм.

Расстояние z_{min} (см. рис. 5): $$z_{min} = 0{,}5D_{вт}^{вх}\cos(\alpha_у) + S_о \sin(\alpha_у) + \Delta, \quad (6)$$

где Δ – номинальный припуск на последующую обработку, мм.

Расстояние z_{max}: $$z_{max} \geq 0{,}5D_к^{вх}\cos(\alpha_у) - S_о \sin(\alpha_у). \quad (7)$$

Значения размеров $x_у$ и $y_у$ находим из системы уравнений:

$$\begin{cases} (x_у - x_к(0))^2 + (y_у - y_к(0))^2 = (D_н/2 + \Delta + \delta_{вх})^2; \\ (x_у - x_с(0))^2 + (y_у - y_с(0))^2 = (D_{вн}/2 - \Delta - \delta_{вх})^2; \\ (x_у - x_к(1))^2 + (y_у - y_к(1))^2 = (D_н/2 + \Delta + \delta_{вых})^2; \\ (x_у - x_с(1))^2 + (y_у - y_с(1))^2 = (D_{вн}/2 - \Delta - \delta_{вых})^2, \end{cases} \quad (8)$$

где [$x_к(u)$; $y_к(u)$] и [$x_с(u)$; $y_с(u)$] – параметрические уравнения кривых пересечения поверхности спинки и корыта с плоскостью резания, которые в свою очередь нашли из следующих выражений:

$$x(u) = X(u, f(u))\cos(\omega_{\text{у}}) - \sin(\omega_{\text{у}})\left(Y(u, f(u))\sin(\alpha_{\text{у}}) + Z(u, f(u))\cos(\alpha_{\text{у}})\right);$$
$$y(u) = Y(u, f(u))\cos(\alpha_{\text{у}}) + Z(u, f(u))\sin(\alpha_{\text{у}}), \quad (9)$$

где [$X(u,v)$; $Y(u,v)$; $Z(u,v)$] – параметрические уравнения трехмерной поверхности; u = [0;1] и v = [0;1] – оси параметрического пространства; $f(u)$ – зависимость значения v от параметра u:

$$Y(u,v)\sin(\omega_{\text{у}}) + X(u,v)\sin(\alpha_{\text{у}})\cos(\omega_{\text{у}}) + Z(u,v)\cos(\alpha_{\text{у}})\cos(\omega_{\text{у}}) = z_{\min}; \quad (10)$$

$$\omega_{\text{у}} = \operatorname{arctg}\left|\frac{\left(Z_{\text{к}}(0,0) - Z_{\text{с}}(1,0)\right)\cdot\cos(\alpha_{\text{у}}) - \left(X_{\text{к}}(0,0) - X_{\text{с}}(1,0)\right)\cdot\sin(\alpha_{\text{у}})}{Y_{\text{к}}(0,0) - Y_{\text{с}}(1,0)}\right|. \quad (11)$$

При однокоординатной обработке реализуется метод копирования и в заготовке образуется межлопаточный канал в виде кольцевой впадины. Добавив в управляемые координаты поворот заготовки ω, град.; можно увеличить объем удаляемого из межлопаточного канала материала. При этом формообразование происходит в два этапа. Сначала ведут обработку поверхности корыта до дна межлопаточного канала. При этом съем металла происходит с участием всех режущих кромок. После этого инструмент выводят из канала и затем производят обработку спинки соседней лопатки в этом же канале внутренними и торцевыми режущими кромками инструмента.

Закон управления поворотом заготовки ω в процессе движения инструмента по оси Z при обработке корыта можно найти, решив следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} X_{\text{к}}(0,v)\sin(\omega) + Y_{\text{к}}(0,v)\sin(\alpha_{\text{у}})\cos(\omega) + Z_{\text{к}}(0,v)\cos(\alpha_{\text{у}})\cos(\omega) = z; \\ \left(x_{\text{у}} - x_{\text{вх}}\right)^2 + \left(y_{\text{у}} - y_{\text{вх}}\right)^2 = \left(D_{\text{н}}/2 + \Delta\right)^2, \end{cases} \quad (12)$$

где z – положение кольцевого инструмента по координате Z.

Аналогично определили закон управления поворотом заготовки ω при обработке спинки:

$$\begin{cases} X_{\text{с}}(0,v)\sin(\omega) + Y_{\text{с}}(0,v)\sin(\alpha_{\text{у}})\cos(\omega) + Z_{\text{с}}(0,v)\cos(\alpha_{\text{у}})\cos(\omega) = z; \\ \left(x_{\text{у}} - x_{\text{вх}}\right)^2 + \left(y_{\text{у}} - y_{\text{вх}}\right)^2 = \left(D_{\text{вн}}/2 - \Delta\right)^2, \end{cases} \quad (13)$$

В отличие от формообразования моноколес концевой фрезой, когда весь инструмент находится внутри межлопаточного канала, при формообразовании моноколес кольцевым инструментом большая его часть находится за пределами зоны резания. Осуществление формообразующих движений инструмента может привести к столкновению или зарезу обрабатываемой заготовки. Для исключения подобных случаев в кинематику формообразования ввели следующие ограничения:

1. Ограничение положения кольцевого инструмента поверхностью корыта межлопаточного канала и прилегающих к ней входной и выходной кромок, которое для двухосевой обработки можно определить из следующей системы неравенств:

$$\begin{cases} \left(x_{\text{у}} - x_{\text{вх}}\right)^2 + \left(y_{\text{у}} - y_{\text{вх}}\right)^2 \geq \left(D_{\text{н}}/2 + \Delta\right)^2; \\ X_{\text{к}}(0,v)\sin(\omega) + Y_{\text{к}}(0,v)\sin(\alpha_{\text{у}})\cos(\omega) + Z_{\text{к}}(0,v)\cos(\alpha_{\text{у}})\cos(\omega) = z + h_{\text{н}}, \end{cases} \quad (14)$$

где $h_н$ – высота наружной режущей кромки (см. рис. 2,б), мм.

2. Ограничение положения кольцевого инструмента поверхностью спинки пера обрабатываемой лопатки и прилегающих к ней входной и выходной кромок:

$$\begin{cases}(x_у - x_{вх})^2 + (y_у - y_{вх})^2 \geq (D_{вн}/2 - \Delta)^2; \\ X_с(0,v)\sin(\omega) + Y_с(0,v)\sin(\alpha_у)\cos(\omega) + Z_с(0,v)\cos(\alpha_у)\cos(\omega) = z + h_{вн},\end{cases} \quad (15)$$

где $h_{вн}$ – высота внутренней режущей кромки (см. рис. 2,б), мм.

При двухкоординатной обработке образуется межлопаточный канал переменного по высоте профиля. Введение третьей управляемой координаты S_x (движение инструмента вдоль оси вращения заготовки) позволяет получить переменный по длине профиля межлопаточный канал.

Закон управления значением поворота заготовки ω и линейной координаты x от координаты z при обработке корыта:

$$\begin{cases}X_к(0,v_{вх})\sin(\omega) + Y_к(0,v_{вх})\sin(\alpha_у)\cos(\omega) + Z_к(0,v_{вх})\cos(\alpha_у)\cos(\omega) = z; \\ (x - x_{вх})^2 + (y_у - y_{вх})^2 = (D_н/2 + \Delta)^2; \\ X_к(1,v_{вых})\sin(\omega) + Y_к(1,v_{вых})\sin(\alpha_у)\cos(\omega) + Z_к(1,v_{вых})\cos(\alpha_у)\cos(\omega) = z; \\ (x - x_{вых})^2 + (y_у - y_{вых})^2 = (D_н/2 + \Delta)^2,\end{cases} \quad (16)$$

где $x_{вых} = \cos(\omega)X_к(1,v_{вых}) + \sin(\omega)(\sin(\alpha_у)Y_к(1,v_{вых}) + \cos(\alpha_у)Z_к(1,v_{вых}))$;

$y_{вых} = \cos(\alpha_у)Y_к(1,v_{вых}) - \sin(\alpha_у)X_к(1,v_{вых})$;

при обработке спинки:

$$\begin{cases}X_с(0,v_{вх})\sin(\omega) + Y_с(0,v_{вх})\sin(\alpha_у)\cos(\omega) + Z_с(0,v_{вх})\cos(\alpha_у)\cos(\omega) = z; \\ (x - x_{вх})^2 + (y_у - y_{вх})^2 = (D_{вн}/2 - \Delta)^2; \\ X_с(1,v_{вых})\sin(\omega) + Y_с(1,v_{вых})\sin(\alpha_у)\cos(\omega) + Z_с(1,v_{вых})\cos(\alpha_у)\cos(\omega) = z; \\ (x - x_{вых})^2 + (y_у - y_{вых})^2 = (D_{вн}/2 - \Delta)^2,\end{cases} \quad (17)$$

где $x_{вых} = \cos(\omega)X_с(1,v_{вых}) + \sin(\omega)(\sin(\alpha_у)Y_с(1,v_{вых}) + \cos(\alpha_у)Z_с(1,v_{вых}))$;

$y_{вых} = \cos(\alpha_у)Y_с(1,v_{вых}) - \sin(\alpha_у)X_с(1,v_{вых})$.

Ограничения положения кольцевого инструмента при трехкоординатной обработке имеют следующий вид:

$$\begin{cases}(x - x_{вх})^2 + (y_у - y_{вх})^2 \geq (D_н/2 + \Delta)^2; \\ X_к(0,v_{вх})\sin(\omega) + Y_к(0,v_{вх})\sin(\alpha_у)\cos(\omega) + Z_к(0,v_{вх})\cos(\alpha_у)\cos(\omega) = z + h_н; \\ (x - x_{вых})^2 + (y_у - y_{вых})^2 \geq (D_н/2 + \Delta)^2; \\ X_к(1,v_{вых})\sin(\omega) + Y_к(1,v_{вых})\sin(\alpha_у)\cos(\omega) + Z_к(1,v_{вых})\cos(\alpha_у)\cos(\omega) = z + h_н,\end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases}(x - x_{вх})^2 + (y_у - y_{вх})^2 \geq (D_{вн}/2 - \Delta)^2; \\ X_с(0,v_{вх})\sin(\omega) + Y_с(0,v_{вх})\sin(\alpha_у)\cos(\omega) + Z_с(0,v_{вх})\cos(\alpha_у)\cos(\omega) = z + h_{вн}; \\ (x - x_{вых})^2 + (y_у - y_{вых})^2 \geq (D_{вн}/2 - \Delta)^2; \\ X_с(1,v_{вых})\sin(\omega) + Y_с(1,v_{вых})\sin(\alpha_у)\cos(\omega) + Z_с(1,v_{вых})\cos(\alpha_у)\cos(\omega) = z + h_{вн},\end{cases} \quad (19)$$

С увеличением количества управляемых координат приближаемся к теоретической форме межлопаточного канала. И в итоге обработку межлопаточного канала можно производить с управлением до шести координат:

линейные перемещения инструмента вдоль трех осей S_x, S_y и S_z, вращение заготовки вокруг двух осей S_α и S_ω, а также изменение диаметра режущей части $S_д$ в процессе обработки. На инструмент с изменяемым диаметром режущей части получен патент на полезную модель № 162205

В четвертой главе приведена методика выбора рационального варианта схемы формообразования межлопаточных каналов кольцевым инструментом и результаты численного и натурного экспериментов.

Сначала определяем размеры кольцевого инструмента по геометрическим параметрам моноколеса. Используя аналитические зависимости (1), (2) и (4), рассчитываем значения минимального наружного диаметра, максимальной ширины режущей части и глубины внутренней полости кольцевого инструмента.

Далее по выражению (5) определяем значение установочного угла α_y (см. рис. 5) и предельные значения хода кольцевого инструмента z_{min} и z_{max} по зависимостям (6) и (7). Значения размеров x_y и y_y нашли из системы уравнений (8).

Далее для двухкоординатной обработки по зависимостям (12) и (13) рассчитывали изменение поворота заготовки ω от перемещения инструмента по оси Z от z_{min} до z_{max} при обработке корыта *1* и спинки *2*. Кроме этого, из систем неравенств (14) и (15) определили допустимую область перемещения *3* (рис. 6, которая ограничена двумя кривыми. Нижняя кривая *4* характеризует ограничение положения инструмента для предотвращения зареза корыта наружными режущими кромками, а верхняя кривая *5* – для предотвращения зареза спинки внутренними кромками.

Изменение углового положения заготовки ω в зависимости от перемещения инструмента по координате z будет совокупностью зависимостей и ограничений. При обработке корыта это будет нижнее ограничение допустимой области *4*, а при обработке спинки – верхнее ограничение *5*, а после точки *A* изменение поворота заготовки ω *2* найденное из зависимости (13).

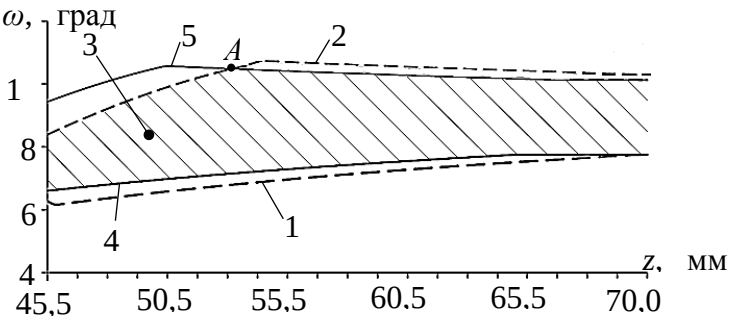


Рис. 6. Определение зависимости поворота заготовки от линейного перемещения кольцевого инструмента при двухкоординатной обработке

Анализ трехкоординатной обработки межлопаточных каналов производится аналогично. По зависимостям (16) и (17) нашли законы управления координатами, а из систем уравнений (18) и (19) определяем допустимую область перемещения кольцевого инструмента.

Расчет траектории движения кольцевого инструмента при четырех- и пятикоординатной обработке межлопаточных каналов был выполнен в CAD/CAM-системе Siemens NX с использованием имитационного моделирования.

Погрешность формообразования определили как разницу между теоретическим профилем (*3* и *4*) и обработанными поверхностями (*1* и *2*) (рис. 7,а), в четырех равноудаленных сечениях (рис. 7,б). Численные эксперименты по определению погрешности проводили в CAD/CAM-системе Siemens NX на примере моноколеса осевого компрессора высокого давления вертолетного двигателя, у которого наружный диаметр $D_к$ равен 140 мм, ширина колеса $S_к$ – 20 мм и число лопаток N – 20.

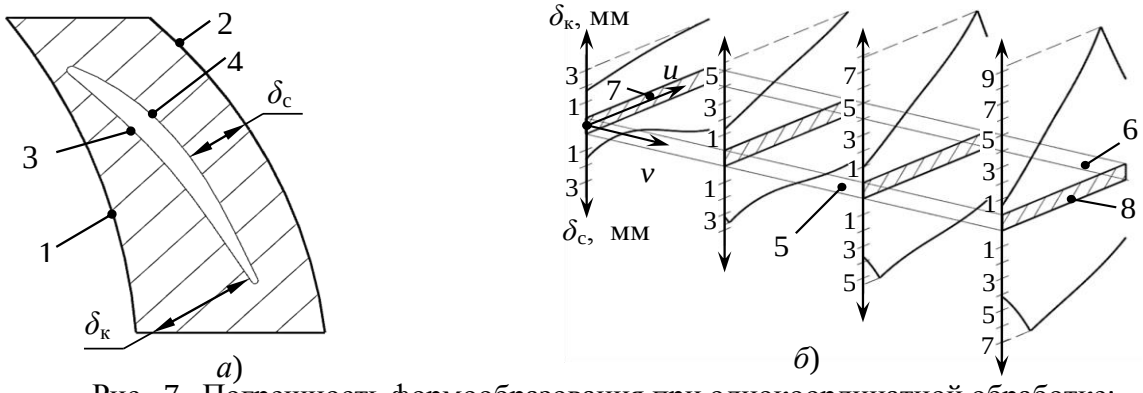


Рис. 7. Погрешность формообразования при однокоординатной обработке:
а – сечение лопатки; б – графики изменения погрешности формообразования;
1 и 2 – профили со стороны корыта и спинки после обработки; 3 и 4 –профиль корыта и спинки;
5 и 6 – входная и выходная кромки; 7 и 8 – корневая и концевая части пера лопатки

Результаты численного эксперимента однокоординатной обработки показывают, что погрешность формообразования на спинке $\delta_с$ и корыте $\delta_к$ растет от корневой части пера лопатки *7* к концевой *8*. На корыте $\delta_к$ растет от входной кромки *5* к выходной *6*, а на спинке наоборот – от выходной кромки *6* к входной *5*. Максимальная погрешность формообразования при однокоординатной обработке со стороны спинки $\delta_с$ составила 7,02 мм, а со стороны корыта $\delta_к$ – 9,25 мм.

Далее нашли погрешность формообразования при двух-, трех-, четырех- и пятикоординатной обработке (рис. 8).

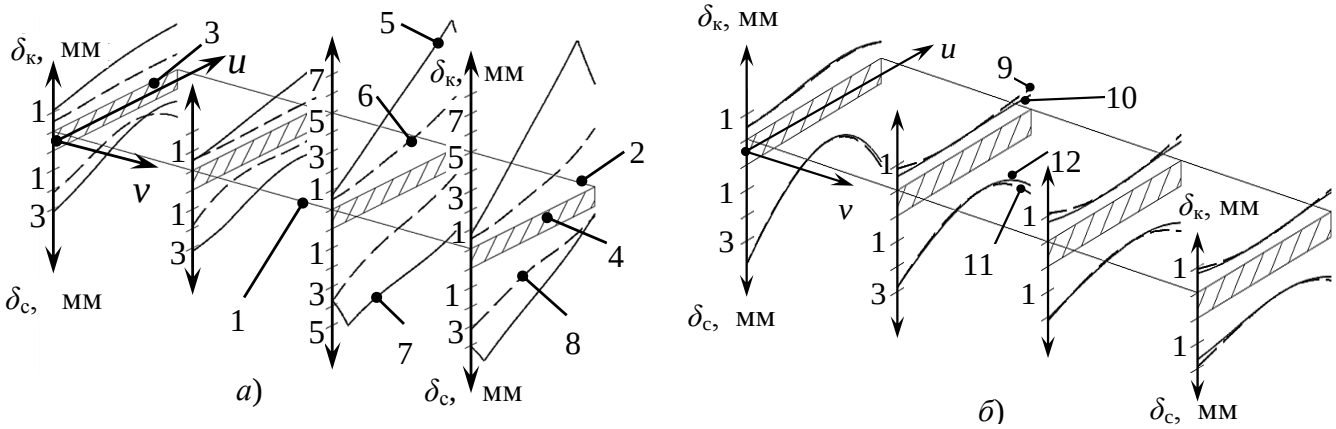


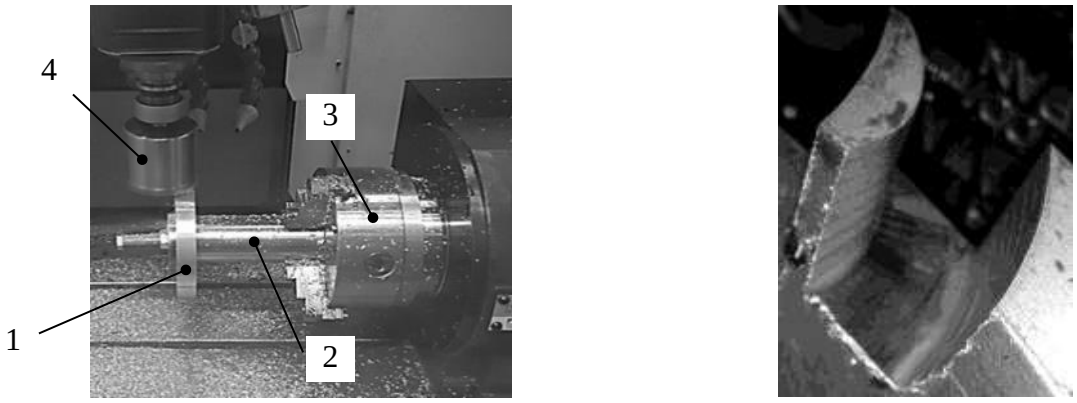
Рис. 8. Погрешность формообразования пера лопатки моноколеса:
а – 2-х и 3-х координатная обработка; б – 4-х и 5-ти координатная обработка кольцевым инструментом
1, 2 – входная и выходная кромки; 3, 4 – корневая и концевая части пера лопатки;
5, 6, 9 и 10 – графики погрешности формообразования на корыте при 2,3, 4 и 5-ти координатной обработке; 7, 8, 11 и 12 – графики погрешности на спинке при 2, 3, 4 и 5-ти координатной обработке

При двухкоординатной обработке, как и при однокоординатной,

погрешность формообразования на спинке и корыте растет от корневой части пера *3* к концевой *4*. Поворот заготовки S_ω позволяет уменьшить максимальную погрешность формообразования на спинке с 7,02 до 5,12 мм, а на корыте с 9,25 до 8,03 мм. Введение третьей координаты "линейное перемещение инструмента S_x" позволяет уменьшить максимальную погрешность формообразования на спинке с 5,12 до 4,17 мм, а на корыте с 8,03 до 3,06 мм.

Введение четвертой управляемой координаты S_y приводит к снижению максимальной погрешности на спинке с 4,17 до 3,88 мм, а на корыте – с 3,06 до 1,2 мм. Введение пятой координаты S_α привело к незначительному уменьшению погрешности на спинке с 3,88 до 3,86 мм, а на корыте – с 1,2 до 1,02 мм. Изменение диаметра режущей части $S_д$ позволило снизить погрешность на спинке до 3,67 мм, на корыте – до 0,99 мм.

В рамках натурного эксперимента проводили одно-, двух-, трех- и четырехкоординатную обработку осевого моноколеса, используемого в численном эксперименте. Обработку непрофилированной заготовки из материала Д16Т (алюминиевый сплав) производили в автоматическом режиме на четырехкоординатном фрезерном станке Fanuc Robodrill α21-FI (рис. 9).



а) *б*)

Рис. 9. Обработка межлопаточных каналов кольцевым инструментом на фрезерном станке:
а – положение инструмента и заготовки; б – полученные межлопаточные каналы;
1 – непрофилированная заготовка; 2 – приспособление; 3 – трехкулачковый патрон поворотного стола; 4 – кольцевой инструмент

Затем, для сравнения, измеряли профили 20 лопаток изготовленного осевого моноколеса, полученного путем четырехкоординатной обработки кольцевым инструментом. Измерения проводили на автоматизированном томографе X-ray X5000 CT с максимальной погрешностью измерения 0,1 мм. Результатом измерения являлась 3D-модель изготовленного осевого моноколеса. Используя полученную 3D-модель, определили погрешность формообразования как разницу между теоретическим профилем и обработанными поверхностями (см. рис. 7,а), в корневом и в концевой частях пера. Максимальная погрешность формообразования на спинке составила 3,44 мм, а на корыте – 1,35 мм. Поскольку при таких больших значениях погрешности формообразования невозможно провести окончательную

обработку пера лопатки, то приходится в технологический процесс изготовления моноколеса после прорезания межлопаточных каналов кольцевым инструментом ввести дополнительную операцию "выравнивания припуска" концевой фрезой.

Выбранная стратегия обработки межлопаточных каналов кольцевым инструментом определяет величину и равномерность припуска под окончательную обработку. С увеличением числа управляемых координат уменьшается погрешность формообразования и увеличивается объем удаленной части канала. При этом увеличивается машинное время обработки. С другой стороны, увеличив объем удаленного материала при прорезании межлопаточных каналов кольцевым инструментом, уменьшается машинное время последующей операции "выравнивание припуска". В таблице представлены значения машинного времени для различных стратегий обработки межлопаточных каналов осевого моноколеса.

Сравнение стратегий предварительной обработки межлопаточных каналов

Стратегия обработки		Этапы предварительной обработки			Машинное время обработки моноколеса, мин
		Прорезка канала		Выравнивание припуска	
Число управляемых координат	Режущий инструмент	Объем удаленного металла, %	Машинное время, мин	Машинное время, мин	
5	концевая фреза	100	14,3	–	286,1
1	кольцевой	71,1	**2,1**	9,2	226,9
2	тот же	80,3	4,9	5,3	**204,5**
3	тот же	86,4	9,8	3,5	266,3
4	тот же	94,1	15,6	**2,5**	352,1

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. Из-за сложной траектории формообразования итоговое машинное время оказалось даже больше, чем при прорезании канала концевой фрезой. Меньшее итоговое машинное время отмечаем при использовании предварительной двухкоординатной обработки межлопаточных каналов кольцевым инструментом. Таким образом, в заводских условиях, исходя из наличного станочного парка, программы выпуска моноколес, затрат на производство и других факторов, после анализа возможных схем формообразования межлопаточных каналов кольцевым инструментом технолог должен решить какая схема позволяет изготовить моноколесо с требуемыми технико-экономическими показателями. И уже с учетом выбранной схемы разработать технологический процесс изготовления осевого моноколеса.

Приведённые выше результаты относятся к рассмотренному моноколесу осевого компрессора высокого давления вертолетного двигателя, для осевых моноколес другой конструкции и размеров возможны другие соотношения

машинного времени предварительной обработки среди рассмотренных кинематических схем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Аналитическим путем получены математические зависимости размеров кольцевого инструмента учитывающих геометрические параметры межлопаточных каналов моноколеса осевых компрессоров и турбин. При этом установлено, что увеличение основных геометрических параметров (наружного диаметра осевого моноколеса $D_к$; угла установки профиля лопатки β; относительной высоты лопатки $\bar{h}$) кроме веерности θ приводит к необходимости увеличения 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 область применения кольцевого режущего инструмента для прорезания межлопаточных каналов моноколес различной конфигурации. В диапазоне анализируемых относительных высот (от $\bar{h}$ = 1,9 до $\bar{h}$ = 7) и веерности (от θ = 5 до θ = 4) установлено, что область применения кольцевого инструмента для полной (до дна межлопаточного канала) обработки различных моноколес увеличивается от 11% при обработке моноколес с $\bar{h}$ = 7 и θ = 4 до 76% при обработке моноколес с $\bar{h}$ = 1,9 и θ = 5. Для моноколес, у которых расчетное значение ширины режущей части δR_{max} меньше, чем регламентированная стандартом δR_C, допускается частичная обработка межлопаточного канала ближайшим меньшим по ширине стандартизованным кольцевым инструментом.

3. Получены кинематические схемы многокоординатного формообразования межлопаточных каналов кольцевым инструментом с числом 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

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 числа управляемых координат уменьшается погрешность формообразования и увеличивается объем удаленного материала из заготовки моноколеса. При этом увеличение числа управляемых координат до 5 и 6 способствует незначительному уменьшению погрешности, как со стороны корыта, так и со стороны спинки.

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

6. Установлено, что прорезание межлопаточных каналов осевых моноколес кольцевым режущим инструментом позволяет сократить машинное время обработки изделия, по сравнению с обработкой межлопаточных каналов концевой фрезой. При этом увеличение числа управляемых координат во время обработки кольцевым инструментом не всегда приводят к уменьшению машинного времени обработки изделия.

7. Научные и практические результаты работы приняты для использования при освоении изготовления моноколес осевого компрессора нового вертолетного газотурбинного двигателя в АО «КМПО», а также рекомендуется для применения на предприятиях производящих осевые моноколеса из непрофилированной заготовки. Разработки соискателя использованы в учебном процессе при подготовке инженерно-технических и научно-педагогических специалистов по направлению «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» в лекционных и практических занятиях по дисциплине «Автоматизация подготовки механосборочных производств»

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК:

1. Моисеева Л.Т. Оптимизация набора инструментов для механической обработки методами теории графов / Л.Т. Моисеева, Д.В. Курылев // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2011. – № 4. – С. 67-69.
2. Лунев А.Н. Моделирование глубинного фрезерования пространственно-сложных поверхностей деталей из условия обеспечения заданной высоты межстрочечных гребешков в CAD/CAM системе Siemens NX / А.Н. Лунев, Л.Т. Моисеева, Д.В. Курылев // Вестник Казан. гос. техн. ун-та им. А.Н. Туполева. - 2014. - № 2. - С. 108-111.
3. Курылев Д.В. Исследование стратегий формообразования межлопаточных каналов моноколес кольцевым инструментом / Д.В. Курылев // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2016. – № 2. – С. 123-127.
4. Курылев Д.В. Обзор прогрессивных методов изготовления осевых моноколес авиационных газотурбинных двигателей / Д.В. Курылев, А.Н. Лунев // Фундаментальные исследования. -

2016. - № 6 (часть 1) [Электронный журнал], URL: http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=40375.

Патент на полезную модель:

5. Пат. на пол. модель № 162205 РФ, МПК U1 B23C5/14. Инструмент для обработки сложнопрофильных межлопаточных каналов моноколеса газотурбинного двигателя [Текст]/ Лунев А.Н., Курылев Д.В. заявитель и патентообладатель Казан. нац. ислед. техн. ун-та. им. А.Н. Туполева-КАИ – № 2015120192/02; заявл. 27.05.15 ; опубл. 27.05.16, Бюл. № 13. – 3 с.: ил.

Публикации в других изданиях:

6. Моисеева Л.Т. Применение методов структурной и параметрической оптимизации при разработке технологии обработки сложных деталей авиационной техники / Л.Т. Моисеева, Д.В. Курылев, А.В. Егорова // Сборник докладов Международной научно-практической конференции АКТО-2010. – Казань 2010: Изд-во Казан. нац. иссл. техн. ун-та им. А.Н. Туполева. – 2010. – Том II. – С. 165-172.
7. Курылев Д.В. Структурная оптимизация технологии изготовления детали авиационной техники / Д.В. Курылев // Сборник докладов Международной научно-практической конференции Гагаринские чтения - 2010. – М. 2010: МАТИ. – 2010. –Том 2. – С. 13-15.
8. Курылев Д.В. Математическая модель прогнозирования пути резания режущего инструмента при фрезеровании сложного профиля на примере обработки пера лопатки / Д.В. Курылев // Сборник докладов Международной научно-практической конференции Гагаринские чтения - 2013. - М. 2013: МАТИ. – 2013. –Том 2. – С. 23-24.
9. Курылев Д.В. Снижение кинематической погрешности при механической обработке межлопаточных каналов моноколеса кольцевым режущим инструментом / Д.В. Курылев, А.Н. Лунев // Сборник докладов Международной научно-практической конференции АКТО-2014. – Казань 2014: Изд-во Казан. нац. иссл. техн. ун-та им. А.Н. Туполева. – 2014. – Том I. – С. 393-395.
10. Курылев Д.В. Исследование технологических особенностей процесса лезвийной обработки деталей и заготовок, полученных различными методами аддитивной технологии / Д.В. Курылев, А.Н. Лунев, Р.М. Янбаев // Сборник докладов Международной научно-практической конференции ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ. – М.2016: ВИАМ. – 2016. – С. 28.
11. Курылев Д.В. Определение геометрических параметров кольцевой фрезы для предварительной обработки межлопаточных каналов осевых моноколес / Д.В. Курылев Д.В. // Сборник докладов Международной научно-практической конференции АКТО-2016. – Казань 2016: Казан. нац. иссл. техн. ун-та им. А.Н. Туполева. – 2016. – Том I, –С. 483-488.

Автореферат

Курылев Дмитрий Валерьевич

ОСНОВЫ МНОГОКООРДИНАТНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ
МЕЖЛОПАТОЧНЫХ КАНАЛОВ ОСЕВЫХ МОНОКОЛЕС
ПРИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОМ ПРОРЕЗАНИИ
КОЛЬЦЕВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Подписано в печать ___.___.2016.Формат 60x84 1/16.
Усл. Печ. Л. ___. Тираж 100 экз. Заказ _____.

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева - КАИ
420111, Республика Татарстан, г. Казань, ул. К. Маркса, 10