

УДК 621.452.3

В.Ф. СОРОКИН*ГП «Институт машин и систем», Харьков, Украина***ФОРМООБРАЗОВАНИЕ НЕРАЗВЕРТЫВАЮЩИХСЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ЛОПАТОК МОНОКОЛЕС БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ИНСТРУМЕНТА**

Разработан метод расчета управляющих программ для битангенциальной обработки неразвертывающихся поверхностей на пятикоординатных станках с ЧПУ. При этом контакт боковой поверхности фрезы с обрабатываемой поверхностью осуществляется по кривой линии. Приведен пример траектории инструмента для фрезерования пера лопатки турбины, подтверждающий возможность такой обработки с высокой точностью. Применение битангенциальной обработки лопаток моноколес обеспечивает значительное повышение производительности формообразования.

осевые и центробежные моноколеса, пятикоординатная обработка на станках с ЧПУ, точечное спиральное фрезерование, битангенциальная обработка, развертывающиеся и неразвертывающиеся поверхности, линия контакта фрезы с обрабатываемой поверхностью.

Введение

Одним из актуальных направлений развития наукоемкого машиностроения сегодня называют разработку новых технологических процессов формообразования сложнофасонных деталей. Характерная группа таких деталей в газотурбинном двигателе – моноколеса [1, 2].

В настоящее время проточные поверхности моноколес в основном изготавливаются методом *высокоскоростного спирального фрезерования*, при котором профиль лопатки образуется в результате многопроходного огибания фрезой с постоянным ее перемещением по высоте лопатки. При этом осуществляется *точечный* контакт инструмента и обрабатываемой поверхности, а количество проходов устанавливаются, исходя из требуемой шероховатости обработанной поверхности [3, 4].

Для метода точечного спирального фрезерования имеется математическое обеспечение расчета управляющих программ обработки моноколес, приобретаемое вместе с высокоскоростными станками у ведущих западноевропейских фирм.

Однако известно, что обработка, при которой деталь фрезеруется не торцом инструмента, а его боковой поверхностью обеспечивает более высокие производительность обработки и качество обраба-

тываемой поверхности. Метод, при котором боковая поверхность инструмента отслеживает и фрезерует один элемент детали (поверхность лопатки), а торец инструмента движется по другому элементу (поверхности ступицы моноколеса) называется битангенциальной обработкой [5].

В работе [6] показано, что применение битангенциальной обработки для изготовления лопаток моноколес при прочих равных условиях обеспечивает сокращение времени фрезерования в 12 – 15 раз по сравнению с точечным спиральным фрезерованием.

Если поверхность лопатки моноколеса развертывающаяся, а значит линейчатая, то обеспечивается точный контакт боковой поверхности фрезы с поверхностью лопатки по прямой линии, являющейся образующей развертывающейся поверхности.

Если же поверхность лопатки неразвертывающаяся (неразвертывающейся может быть как нелинейчатая, так и линейчатая поверхность), то точный контакт боковой поверхности фрезы с обрабатываемой поверхностью *по прямой линии невозможен*.

Этот факт, по видимому, является причиной того, что задача формообразования неразвертывающихся поверхностей лопаток моноколес боковой поверхностью инструмента в научно-технической литературе до настоящего времени не рассматрива-

лась. Однако, контакт боковой поверхности фрезы с обрабатываемой поверхностью может происходить не только по прямой, но и по *кривой линии*.

Поэтому **целью** данной статьи является разработка и экспериментальная проверка метода расчета траектории движения концевой конической фрезы при битангенциальной обработке неразвертывающихся поверхностей.

Постановка задачи. Если обрабатываемая поверхность неразвертывающаяся, то точное решение задачи определения линии контакта с боковой поверхностью фрезы отсутствует. Поэтому будем искать приближенное решение этой задачи в следующей постановке.

Пусть заданной обрабатываемой поверхности S_0 принадлежит некоторое множество пространственных кривых ℓ_i , $i = \overline{1, ks}$, и пусть одной из этих кривых, выбранной нами в качестве базовой, принадлежит точка T_0 (рис. 1).

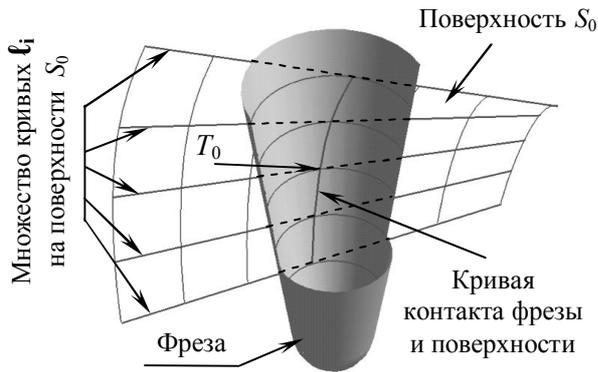


Рис. 1. Схема касания фрезы множества кривых, на неразвертывающейся поверхности

Тогда, варьируя значениями направляющих косинусов вектора оси конуса касательного кривой ℓ_b в точке T_0 , можно отыскать такое положение, при котором среднеквадратичное отклонение поверхности конуса от остальных кривых множества ℓ_i будет минимальным. Это положение найдем, решив задачу минимизации функции

$$F = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq b}}^{ks} w_i [\pm \delta_i - R0_i]^2, \quad (1)$$

где δ_i – минимальное расстояние от оси фрезы до кривой ℓ_i , измеряемое перпендикулярно оси фрезы;

$R0_i$ – радиус конуса фрезы в плоскости, в которой измеряется δ_i ; $w_i > 0$ – весовой коэффициент, показывающий важность данной кривой в конечном результате. Знак \pm определяется знаком скалярного произведения вектора, соединяющего текущую точку на кривой ℓ_i с осью фрезы и проекции нормали к поверхности S_0 в данной точке на плоскость, перпендикулярную оси фрезы.

1. Алгоритм

Для однозначного решения задачи позиционирования конической фрезы нам необходим второй элемент битангенциальной обработки, а именно: контрольная поверхность S , по которой движется торец инструмента (рис. 2). Как правило, это поверхность ступицы моноколеса (в случае окончательной чистовой обработки) или эквидистантная ей поверхность (в случае предварительной обработки).

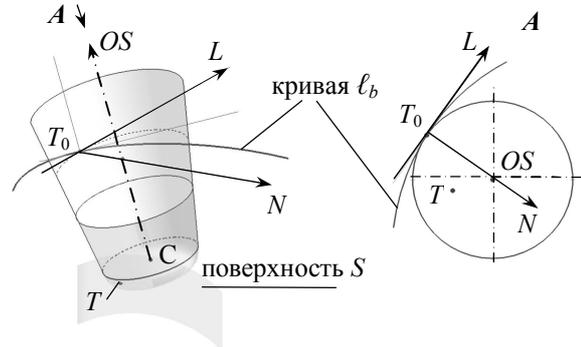


Рис. 2. Схема касания фрезой поверхности S и кривой ℓ_b . (L, T_0, N – плоскость измерения δ_i)

После выбора поверхности S , общий алгоритм определения искомого положения фрезы можно описать следующим образом:

1. Устанавливаем какое-то начальное значение направляющих косинусов оси фрезы.
2. Решаем задачу определения точки C при заданном положении оси фрезы. Это центр тора фрезы, касающейся поверхности S в некоторой точке T и кривой ℓ_b , принадлежащей обрабатываемой поверхности S_0 , в заданной точке T_0 (рис. 2).
3. По формуле (1) определяем значение суммы

квадратов отклонений фрезы от множества кривых ℓ_i , принадлежащих поверхности S_0 .

4. Изменяя значения направляющих косинусов оси фрезы и решая после каждого изменения задачи п.п. 2 и 3, находим такое положение фрезы, при котором значение функции (1) будет минимальным.

Для определения δ_i возьмем на кривой ℓ_i произвольную точку t . Расстояние от этой точки до оси фрезы рассчитывается по формуле

$$\rho_i(t) = \sqrt{\left| \begin{matrix} OS_Y & OS_Z \\ \Delta Y_i & \Delta Z_i \end{matrix} \right|^2 + \left| \begin{matrix} OS_Z & OS_X \\ \Delta Z_i & \Delta X_i \end{matrix} \right|^2 + \left| \begin{matrix} OS_X & OS_Y \\ \Delta X_i & \Delta Y_i \end{matrix} \right|^2},$$

где OS_X, OS_Y, OS_Z – направляющие косинусы вектора оси фрезы; $\Delta X_i = X_C - X_i(t)$; $\Delta Y_i = Y_C - Y_i(t)$; $\Delta Z_i = Z_C - Z_i(t)$; X_C, Y_C, Z_C – координаты точки C .

Тогда $\delta_i = \min \rho_i(t)$, $R0_i$ – рассчитывается по формуле

$$R0_i = D/2 + R \cdot \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \beta} + h_i \cdot \operatorname{tg} \beta,$$

где h_i – расстояние от точки C до плоскости, в которой измеряется δ_i ; D, R – диаметр и радиус тора фрезы; β – угол конуса фрезы;

$$h_i = OS_X \cdot (X_C - X_k) + OS_Y \cdot (Y_C - Y_k) + OS_Z \cdot (Z_C - Z_k).$$

Решение задач 2 и 3 было рассмотрено в [5].

2. Расчет траектории фрезы

Для экспериментальной проверки представленного метода расчета траектории фрезы рассмотрим перо лопатки турбины с неразвертывающейся поверхностью, сечения которой показаны на рис. 3.

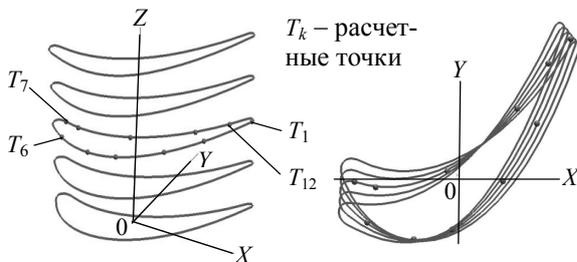


Рис. 3. Схема сечений поверхности пера лопатки

В качестве базового сечения выберем среднее из пяти заданных, т.е. $b = 3$.

Возьмем на базовом сечении двенадцать произвольных точек (по шесть на «спинке» и «корыте»), расположенных как на кромках лопатки, так и в районе максимальной толщины профиля C_{\max} (рис. 3). Координаты этих точек приведены в табл. 1.

Очевидно, что достижение положительного результата в решении поставленной задачи затрудняется при увеличении диаметра фрезы.

С другой стороны с увеличением диаметра повышается прочность инструмента и производительность обработки. Поэтому для чистоты эксперимента используем цилиндрическую фрезу с максимально возможным при обработке межлопаточного пространства этого моноколеса диаметром, а именно, $D = 12$ мм. При этом нетрудно заметить (табл. 1), что заданный диаметр фрезы соизмерим с шириной лопатки.

Таблица 1

Координаты расчетных точек на базовом сечении

Спинка			Корыто		
Номер точки	X	Y	Номер точки	X	Y
1	14,596	16,706	7	-13,291	-0,892
2	10,223	6,334	8	-10,544	-1,468
3	5,851	-0,725	9	-1,302	0,511
4	-0,707	-6,655	10	3,693	4,032
5	-5,626	-7,847	11	7,690	8,172
6	-11,638	-5,792	12	11,686	13,712

Результаты расчета содержатся в табл. 2 и 3. Табл. 2 содержит геометрические характеристики оптимального позиционирования фрезы при обработке каждой расчетной точки, а именно: значения OS_X, OS_Y, OS_Z в системе координат лопатки и углы поворота, на которые необходимо повернуть лопатку в процессе пятикоординатной обработки для обеспечения параллельности оси Z лопатки с вектором оси фрезы. Здесь $A > 0$ – вращение по часовой стрелке вокруг оси X ; $B > 0$ – вращение по часовой стрелке вокруг повернутой на угол A оси Y .

Очевидна закономерность (плавность) изменения

параметров позиционирования фрезы в различных точках траектории, что доказывает возможность использования этих данных в реальной программе.

Таблица 2
Результаты расчета траектории фрезы

Номер точки	Направляющие косинусы оси фрезы			Углы поворота	
	OS_x	OS_y	OS_z	A	B
1	-0,07381	0,12576	0,98931	7°15'	-4°14'
2	-0,05003	0,12978	0,99028	7°28'	-2°52'
3	-0,00737	0,12754	0,99181	7°19'	-0°25'
4	0,09065	0,08067	0,99261	4°39'	5°12'
5	0,13819	-0,00809	0,99037	-0°28'	7°57'
6	0,11265	-0,16854	0,97924	-9°46'	6°28'
7	-0,07645	-0,19213	0,97839	-11°07'	-4°23'
8	-0,07347	-0,17909	0,98109	-10°21'	-4°13'
9	-0,05419	-0,10160	0,99335	-5°50'	-3°06'
10	-0,05778	-0,04285	0,99741	-2°28'	-3°19'
11	-0,07305	0,00405	0,99732	0°14'	-4°11'
12	-0,08672	0,05598	0,99466	3°13'	-4°58'

Таблица 3
Отклонение фрезы от линий сечений лопатки

Номер точки	$\Delta_i = (\delta_i - R0_i)$ мм				
	Δ_1	Δ_2	$\Delta_3 = \Delta_b$	Δ_4	Δ_5
1	0	-0,0012	0	-0,0052	0,0019
2	0,0029	0,0044	0	0,0024	0,0044
3	-0,0026	0,0057	0	-0,0014	0,0009
4	0,0003	0,0012	0	0,0065	-0,0024
5	0,0015	-0,0027	0	0,0030	-0,0014
6	-0,0004	0,0034	0	0,0068	-0,0021
7	0,0007	-0,0009	0	0,0019	-0,0007
8	-0,0008	0,0021	0	0	0,0003
9	-0,0002	0,0001	0	-0,0019	0,0008
10	-0,0011	0,0046	0	0,0024	0
11	0,0023	-0,0031	0	-0,0010	0,0016
12	0,0022	0,0040	0	0,0006	0,0048

Табл. 3 содержит значения отклонений поверхности фрезы, имеющей рассчитанные параметры вектора оси вращения и касающейся линии базового (третьего) сечения лопатки в заданных точках, от линий всех пяти заданных сечений лопатки. При этом $\Delta_i < 0$ означает «зарез» поверхности лопатки, а $\Delta_i > 0$ – соответственно «припуск».

Максимальное отклонение поверхности, формируемой фрезой, от теоретической не превышает 0.007 мм, что в 20 раз меньше допуска на изготовление пера лопатки.

Таким образом, анализ численных результатов расчета траектории фрезы подтверждает утверждение о возможности битангенциального фрезерования неразвертывающихся поверхностей лопаток с высокой точностью.

Рис. 4, 5, 6 содержат графическую иллюстрацию процесса битангенциального фрезерования неразвертывающейся поверхности и подтверждают достоверность теоретического расчета.

На рис. 4, а четко видно, что линия контакта боковой поверхности фрезы с поверхностью пера лопатки, представляет собой кривую линию. Максимальное отклонение этой кривой от прямой, соединяющей точки контакта фрезы с линиями первого и пятого сечений равно 0.25 мм.

На рис. 4, б в проекции на плоскость XOY показано взаимное положение сечений лопатки и фрезы в позициях обработки точек 2, 4, 6, 8, 11.

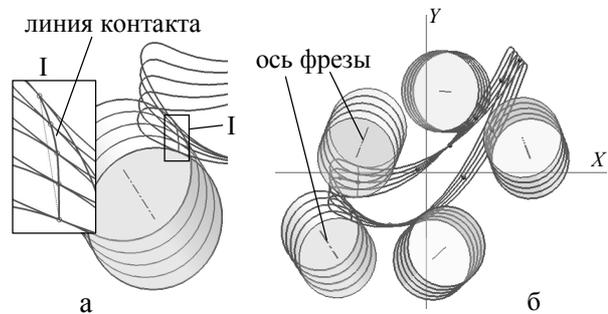


Рис. 4. Графическое отображение положения фрезы в различных точках траектории (проекция на XOY)

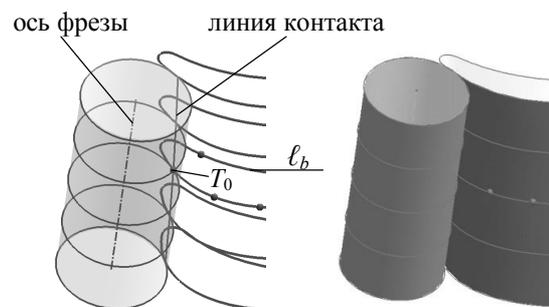


Рис. 5. Иллюстрация контакта фрезы с лопаткой в точке на входной кромке (аксонометрия)

Рис. 6 косвенно подтверждает утверждение о высокой производительности битангенциальной обработки, так как фреза в пяти статических положениях заполняет более половины объема межлопаточного пространства моноколеса.

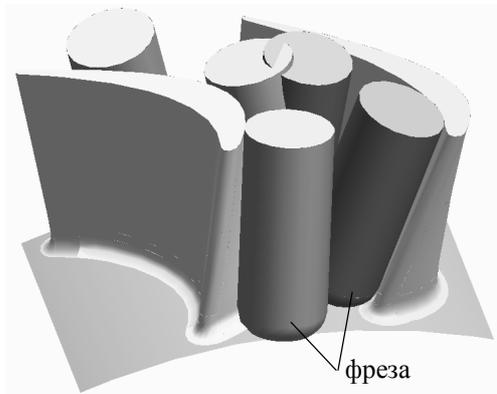


Рис. 6. Иллюстрация битангенциального фрезерования межлопаточного пространства моноколеса

Выводы и перспективы дальнейших исследований

Представленные технология формообразования и метод расчета управляющих программ для обработки неразвертывающихся поверхностей использовались в ОАО «Мотор Сич» для фрезерования проточных поверхностей осевых моноколес на пятикоординатных станках с ЧПУ MC-32, работающих с традиционными скоростями резания. Программы обеспечили высокую точность, чистоту и производительность фрезерования лопаток по всей высоте.

Внедрение этой технологии подтвердило теоретические выводы об эффективности битангенциальной обработки лопаток моноколес. Поэтому рекомендуется там, где возможно, заменять точечное спиральное фрезерование битангенциальным.

Для разгрузки дорогостоящего высокоскоростного оборудования необходимо операции чернового и получистового фрезерования моноколес выполнять на существующих, станках старого поколения, работающих с традиционными скоростями резания.

Перспектива дальнейшей работы связана с проведением исследований по битангенциальной обработке моноколес на новом высокоскоростном обо-

рудовании и созданием специализированной системы автоматизированного проектирования УП для битангенциальной обработки, как развертывающихся, так и неразвертывающихся поверхностей.

Литература

1. Богуслаев В.А. К новейшим технологиям создания, производства, эксплуатации и восстановления газотурбинных двигателей // Вестник двигателестроения. – 2002. – № 1. – С. 6-10.
2. Прогрессивные технологии изготовления центробежных колес ГТД / Г.И. Пейчев, Э.В. Кондратюк, С.Д. Зиличихис и др. // Новые технологии, методы обработки и упрочнения деталей энергетических установок: Тез. докл. второй Межд. науч.-тех. конф. – Запорожье: ЗНТУ, 2002. – С. 107-109.
3. Богуслаев А.В., Качан А.Я., Карась В.П. Высокоскоростное финишное фрезерование лопаток моноколес // Вестник двигателестроения: Науч.-тех. журн. – 2002. – № 1. – С. 110-111.
4. Обработка проточных поверхностей моноколес высокоскоростным фрезерованием / П.Д. Жеманюк, А.В. Богуслаев, С.В. Мозговой, Г.В. Карась, А.Я. Качан // Авиационно-космическая техника и технология: Науч.-тех. журн. – 2004. – № 7 (15). – С. 215-219.
5. Битангенциальная обработка фасонных поверхностей на пятикоординатных станках с ЧПУ / В.Ф. Сорокин, В.А. Леховицер, В.Ф. Мозговой и др. // Технологические системы. – 2001. – № 3 (9). – С. 30-36.
6. Сорокин В.Ф., Мозговой В.Ф. Повышение производительности и качества формообразования лопаточных моноколес при фрезеровании на станках с ЧПУ // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Х.: НАКУ «ХАИ», 2004. – Вып. 21. – С. 27-34.

Поступила в редакцию 26.05.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.И. Долматов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.