

УДК 621.452.3

П.Д. ЖЕМАНЮК¹, А.В. БОГУСЛАЕВ¹, С.В. МОЗГОВОЙ¹, Г.В. КАРАСЬ²,
А.Я. КАЧАН¹

¹ОАО «Мотор Сич», Запорожье, Украина,

²Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ОБРАБОТКА ПРОТОЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МОНОКОЛЕС ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ФРЕЗЕРОВАНИЕМ

Рассмотрена обработка проточных поверхностей осевых и центробежных моноколес высокоскоростным финишным фрезерованием. Определены точность и шероховатость обрабатываемых поверхностей, а также технологические условия и режимы обработки.

осевых и центробежных моноколес, высокоскоростное финишное фрезерованием

Введение

Формообразование проточных поверхностей осевых и центробежных моноколес является одной из самых сложных проблем современного авиадвигателестроения, обусловленной как трудностью обработки материалов, сложностью формы, так и высокими требованиями к их точности и шероховатости.

Обзор публикаций и анализ нерешенных проблем. Одним из методов обработки, который позволяет решить проблемы, возникающие при формообразовании проточных поверхностей осевых и центробежных моноколес, является высокоскоростное фрезерование.

На ОАО "Мотор-Сич" для обработки проточных поверхностей моноколес наибольшее распространение получило финишное высокоскоростное фрезерование [1, 2].

Однако в литературных источниках в достаточной мере нет информации о результатах данной обработки различных поверхностей моноколес, что несколько сдерживает дальнейшее ее распространение.

Цель работы. Экспериментальное определение параметров точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей осевых и центробежных моноколес высокоскоростным финишным фрезерованием.

Содержание и результаты исследований. Формообразование лопаток осевых и центробежных моноколес осуществляется методом спирального

высокоскоростного фрезерования, в соответствии с которым профиль лопатки образуется путем многопроходного огибания фрезой с постоянным перемещением по высоте лопатки (рис. 1). При этом в процессе фрезерования осуществляется точечный контакт инструмента и обрабатываемой поверхности. Количество проходов устанавливают, исходя из требуемой шероховатости обработанной поверхности лопатки.

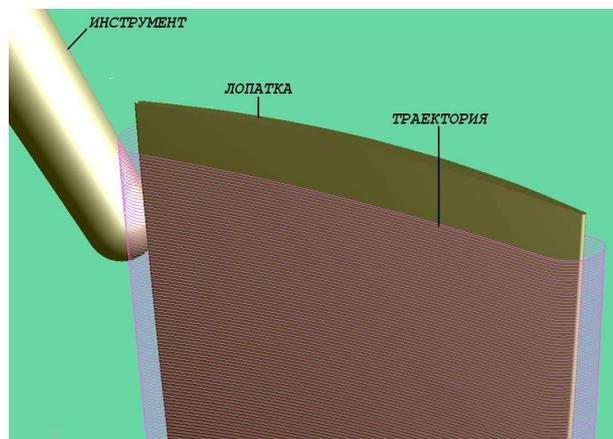


Рис. 1. Формообразование пера лопатки моноколеса спиральным высокоскоростным фрезерованием

При финишном фрезеровании ступицы осевого моноколеса (рис. 2) и ступицы центробежного моноколеса (рис. 3) траекторию перемещения фрезы задают таким образом, чтобы исключить зарезание профиля пера смежных лопаток. При этом также осуществляется многопроходная обработка. Коли-

чество проходов также устанавливают, исходя из требуемой шероховатости поверхности ступицы.

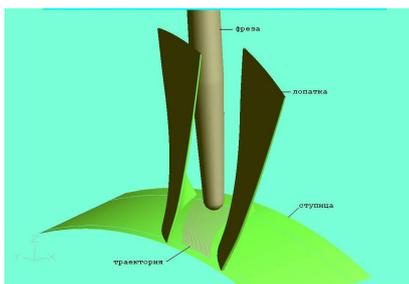


Рис. 2. Финишное высокоскоростное фрезерование ступицы осевого моноколеса

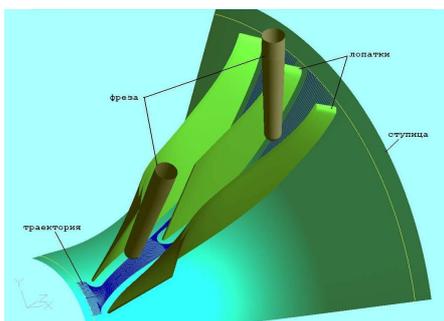


Рис. 3. Финишное высокоскоростное фрезерование ступицы центробежного моноколеса

В процессе обработки, с целью исключения соударения инструмента с рядом расположенными лопатками и с элементами конструкции фиксирующего деталь приспособления, управляют вектором инструмента, что достигается одновременной работой всех пяти координат станка.

На ОАО «Мотор-Сич» для обработки осевых и центробежных моноколес применяют современные высокоскоростные пятикоординатные станки швейцарской фирмы «LIECHTI» - «TURBOBLISK 1005» с ЧПУ «SINUMERIK-840D» (рис. 4).

Конструктивной особенностью данного станка является использование моментных электромоторов в качестве приводов поворотных столов, что позволяет существенно улучшить его динамические характеристики.

Максимальная частота вращения шпинделя станка – 18 000 об/мин. Максимальный диаметр заготовки – 1 000 мм. Скорость приводов: «X», «Y», «Z» – 30 000 мм/мин. «A» – 25 200 град/мин; «B» – 18000 град/мин. Ускорение – 0,5 g.

Требования к фрезам для высокоскоростного фрезерования моноколес:

- максимальное отклонение формы радиуса 0,01 мм;
- торцевое и радиальное биения – 0,01 мм;
- радиальное биение инструмента, установленного на оправку и в шпиндель, на длине 250 – 0,02 мм;
- фреза должна быть динамически отбалансирована (частота вращения шпинделя – 18 000 об/мин).

Фрезы изготавливают из мелкозернистого твердого сплава: H10F SANDVIK, HB30F и HB44F BOLERIT, твердые сплавы SGS и PROTOTYPE, PX10 и PX12UF CARDURO.



Рис. 4. Общий вид станка «TURBOBLISK 1005»

Для обеспечения требуемых показателей по биению инструмента на чистовых операциях применяют специальные гидрооправки (рис. 5).



Рис. 5. Инструмент и оправки

Модель моноколеса 2 ступени КНД изд. Д27 представлена на рис. 6. Моноколесо изготавливают из титанового сплава BT8-1 ОСТ 1 90197-89.

Основные параметры моноколеса:

- высота лопатки H_{max} – 102 мм;
- толщина лопатки S_{max} от 2,361 до 4,684 мм;
- хорда лопатки L_{max} от 70,44 до 64,838 мм;
- радиус входной кромки $R1_{min} = 0,363$ мм;
- $R1_{max} = 0,78$ мм;
- радиус выходной кромки $R2_{min} = 0,373$ мм;
- $R2_{max} = 0,762$ мм.

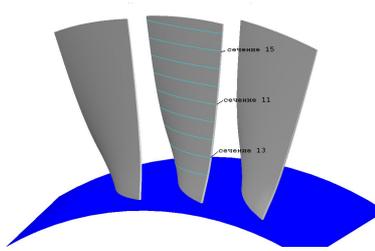


Рис. 6. Модель осевого моноколеса компрессора

Формообразование поверхностей лопаток и ступицы моноколеса 2 ступени КНД выполнялось на станке «TURBOBLISK 1005» в указанной последовательности.

Черновое фрезерование:

23 уровня по 10 проходов на каждом уровне; фреза цилиндрическая с зубом за центр; диаметр фрезы – 16 мм; радиус $R = 0,5$ мм; число зубьев – 4; $V_p = 70$ м/мин; подача на зуб – 0,06 мм.

Получистовое фрезерование:

250 спиральных проходов по лопатке и 70 проходов по ступице; фреза угловая $R = 5$ мм; угол конуса – 5° ; число зубьев – 4; $V_p = 70$ м/мин; подача на зуб – 0,06 мм.

Чистовое фрезерование:

527 спиральных проходов по лопатке и 150 проходов по ступице; фреза угловая $R = 5$ мм; угол конуса – 5° ; число зубьев – 4; $V_p = 300$ м/мин; подача на зуб – 0,06 мм.

При фрезеровании поверхностей лопаток осевых и центробежных моноколес на пятикоординатном станке «TURBOBLISK 1005» обеспечивается плавность обработки поверхностей спинки и корыта, входных и выходных кромок, поверхностей перехода пера к ступице и поверхностей самих ступиц.

Измерение геометрических размеров профиля пера лопаток моноколес производится без снятия детали со станка с применением щупа RENISHAW, что исключает погрешности, возникающие при переустановке детали (рис. 7, 8).

Точность и шероховатость обработанных поверхностей лопаток и ступицы определяли после финишного высокоскоростного фрезерования.

Шероховатость обработанных поверхностей лопаток моноколеса после финишного высокоскоростного фрезерования находится в диапазоне $R_{a,ср} = 0,346 \dots 0,410$ мкм (табл. 1).



Рис. 7. Измерение профиля лопатки



Рис. 8. Измерительный щуп «RENISHAW»

Шероховатость обработанных поверхностей ступицы – $R_a = 0,25$ мкм при требуемом значении шероховатостей поверхностей $R_a = 0,4$ мкм (табл. 1).

Точность соответствует техническим условиям на изготовление (рис. 9, табл. 2).

Величина смещения входной кромки в направлении оси X находится в диапазоне $-0,006 \dots 0,061$ мм при ее допустимом значении – 0,1 мм.

Смещение действительного профиля поперечного сечения в направлении оси Y: $0,014 \dots -0,069$ мм при допустимом значении $\pm 0,1 \dots \pm 0,3$ мм.

Отклонение профиля от теоретического на сторону:

– максимальное: $-0,004 \dots -0,017$ мм;

– минимальное: $-0,018 \dots -0,040$ мм при допуском – 0,06 мм у входной и выходной кромок и – 0,1 мм на отдельных участках.

Угловой разворот профиля пера относительно оси Z составляет $0,000 \dots -0,001^\circ$ при допустимом $0,33^\circ$ (табл. 2).

Осевое моноколесо в зоне обработки станка и отдельные его лопатки, обработанные финишным высокоскоростным фрезерованием, представлены на рис. 10.

Осевое моноколесо с широкохордными лопатками, обработанное высокоскоростным финишным фрезерованием, представлено на рис. 11.

Таблица 1

Шероховатость поверхностей осевого моноколеса
после высокоскоростного фрезерования

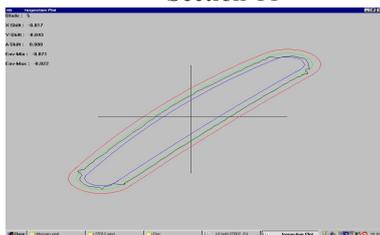
Условный номер лопатки	Значение шероховатости R_{a2} , мкм				Среднее значение R_{a2} , мкм
	Черт.	Измерения			
		1	2	3	
1	0,4	0,36	0,43	0,38	0,390
2		0,55	0,54	0,54	0,543
3		0,42	0,41	0,41	0,413
4		0,46	0,50	0,48	0,480
5		0,36	0,34	0,35	0,350
6	0,4	0,30	0,35	0,39	0,343
7		0,43	0,41	0,42	0,420
8		0,45	0,40	0,38	0,410
9		0,35	0,40	0,45	0,40
10		0,37	0,36	0,36	0,363
Ступица		0,25	0,25	0,25	0,25

Таблица 2

Точность поверхностей лопаток моноколес после высокоскоростного фрезерования

Номер лопатки	Наименование и значение отклонений											
	№ сечений		Смещение входной кромки в направлении оси X, мм		Смещение действит. профиля в направлении оси Y, мм		Угловой разворот профиля пера относительно оси Z, °		Отклонение профиля от теоретического на сторону, мм			
	Черт.	Схема	Черт.	Действ.	Черт.	Действ.	Черт.	Действ.	Чертеж		Действит.	
									кромки	спинка корыта	min	max
1	A ₃ -A ₃	A15	0,1	-0,034	±0,1	-0,033	0,33 (20°)	-0,001	-0,06	-0,1	-0,018	-0,004
	A ₆ -A ₆	A11		-0,006		-0,014		0,000			-0,027	-0,007
	A ₉ -A ₉	A13		-0,018	±0,3	-0,018		0,000			-0,022	-0,009
2	A ₃ -A ₃	A15	0,1	-0,037	±0,1	-0,069	0,33 (20°)	-0,001	-0,06	-0,1	-0,032	-0,008
	A ₆ -A ₆	A11		-0,025		-0,054		0,000			-0,035	-0,011
	A ₉ -A ₉	A13		-0,041	±0,3	-0,043		-0,001			-0,036	-0,010
3	A ₃ -A ₃	A15	0,1	-0,059	±0,1	-0,060	0,33 (20°)	-0,001	-0,06	-0,1	-0,035	-0,006
	A ₆ -A ₆	A11		-0,028		-0,047		0,000			-0,040	-0,009
	A ₉ -A ₉	A13		-0,061	±0,3	-0,036		-0,001			-0,027	-0,006
4	A ₃ -A ₃	A15	0,1	-0,020	±0,1	-0,063	0,33 (20°)	-0,001	-0,06	-0,1	-0,030	-0,012
	A ₆ -A ₆	A11		-0,022		-0,051		-0,001			-0,040	-0,013
	A ₉ -A ₉	A13		-0,026	±0,3	-0,023		0,000			-0,031	-0,012
5	A ₃ -A ₃	A15	0,1	-0,014	±0,1	-0,035	0,33 (20°)	-0,001	-0,06	-0,1	-0,028	-0,017
	A ₆ -A ₆	A11		-0,013		-0,029		0,000			-0,030	-0,014
	A ₉ -A ₉	A13		-0,017	±0,3	-0,027		0,000			-0,022	-0,011

Section 11



Section 15

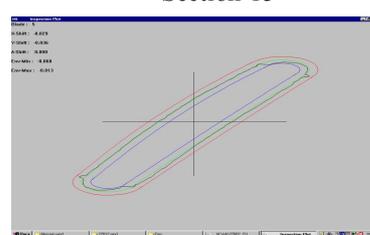


Рис. 9. Профилограммы поперечного сечения лопатки моноколеса после финишного высокоскоростного фрезерования

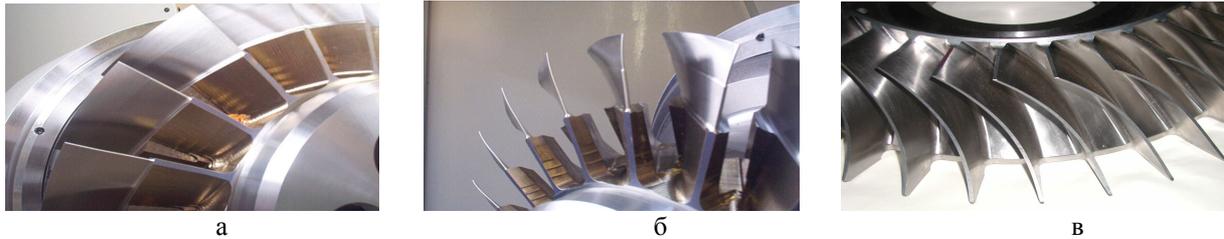


Рис. 10. Лопатки осевого моноколеса компрессора после финишного высокоскоростного фрезерования:
 а – лопатки со стороны спинки;
 б – лопатки со стороны выходных кромок;
 в – окончательно обработанное осевое колесо



Рис. 11. Осевое моноколесо с широкохордными лопатками после чистового фрезерования:
 а – вид с торца моноколеса;
 б – вид на ступицу моноколеса в межлопаточном пространстве со стороны торцов широкохордных лопаток

Перспективы дальнейших исследований.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на изучение влияния технологической наследственности комплексной обработки, включающей высокоскоростное фрезерование и ППД, на несущую способность моноколес.

Заключение

Полученные результаты позволяют более целенаправленно применять высокоскоростное финишное фрезерование при обработке проточных поверхностей моноколес, а также более рационально устанавливать технологические условия и режимы обработки, обеспечивающие высокую точность и низкую шероховатость при изготовлении данных деталей.

Литература

1. Богуслаев А.В., Качан А.Я., Карась В.П. Высокоскоростное финишное фрезерование лопаток моноколес // Вестник двигателестроения, 2002. – № 1. – С. 110 – 111.
2. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора. Ч. 1. Монография / В.А. Богуслаев, Ф.М. Муравченко, П.Д. Жеманюк и др. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2003. – 396 с.

Поступила в редакцию 12.04.2004

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. А.И. Долматов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков; канд. техн. наук, ст. науч. сотр., В.М. Мигунов, ОАО «Мотор Сич», Запорожье.