

УДК 621.452.3

Канд. техн. наук В. Ф. Мозговой¹, Е. К. Березовский², В. А. Панасенко¹

¹АО «Мотор Сич», ²Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ШИРОКОХОРДНОЙ ВЕНТИЛЯТОРНОЙ ЛОПАТКИ ТРДД НА ФРЕЗЕРНЫХ СТАНКАХ С ЧПУ

Представлен практический опыт решения технологической задачи обработки вентиляторной широкохордной лопатки на фрезерных станках с ЧПУ с обеспечением требуемых конструкторских параметров. Рассмотрен опыт применения цельнотвердосплавных фрез и фрез с механическим креплением твердосплавных пластин для достижения максимальной производительности.

Ключевые слова: авиационный двигатель, титановый сплав, лопатка, хвостовик, станок с ЧПУ, фреза, деформирование, скорость резания, шероховатость, подача.

Постановка проблемы и ее связь с практическими задачами

Создание современных турбореактивных двухконтурных двигателей невозможно без совершенствования конструкции лопаток вентилятора. Двигателестроительные фирмы заняты поисками оптимальной конструкции лопатки вентилятора для перспективных ТРДД. Достижение высоких технических параметров двигателей — повышение удельной тяги и аэродинамических характеристик, снижение удельного расхода топлива и повышение КПД обуславливает отказ от применения традиционных antivибрационных полок в конструкциях рабочих вентиляторных лопаток. Для обеспечения условий прочности и устойчивости бесполочные лопатки вентилятора выполняют широкохордными с высокой степенью закрутки пера. И хотя широкохордных лопаток в колесе вентилятора меньше, чем лопаток с полкой, общая масса колеса увеличивается. Соответственно, растет уровень контактных напряжений на рабочих поверхностях хвостовика лопатки и пазов диска вентилятора. Эта проблема решается путем увеличения площади контактной поверхности хвостовика лопатки с круговым пазом диска.

Заготовки вентиляторных лопаток, выполненные методом штамповки из титановых сплавов, в большинстве случаев, обрабатываются на обрабатывающих центрах с числовым программным управлением, что является традиционным в условиях современного производства. Существенное влияние на обрабатываемость деталей имеют физико-механические свойства современных титановых сплавов, из которых выполнены лопатки.

Цель работы

Представить приобретенный опыт технологии обработки широкохордных вентиляторных лопа-

ток из титановых сплавов на фрезерных станках с ЧПУ и пути решения технологических задач для достижения требуемого качества и точности обработанных поверхностей. После механической обработки на станках сравнить полученные величины отклонений точек поверхности хвостовика лопатки и точек профиля пера лопатки с требуемыми конструкторскими параметрами, заданными в чертеже.

Содержание и результаты работ

Широкохордная вентиляторная лопатка выполнена из титанового сплава ВТ6 и характеризуется большой степенью кривизны и закрутки пера (рис. 1). Лопатка устанавливается в колесо вентилятора (рис. 2) по круговому пазу. Техническая характеристика лопатки представлена в табл. 1. Заготовка лопатки выполнена методом штамповки (рис. 3). На поверхности штамповки вследствие высокой активности титана к атмосферным газам при высоких температурах металлургических процессов, образуется штамповочная корка, состоящая из окислов и нитридов [1].

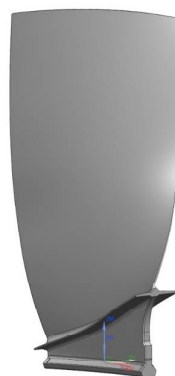


Рис. 1. Модель широкохордной вентиляторной лопатки

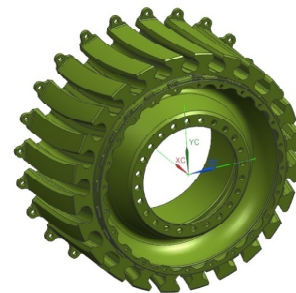


Рис. 2. Модель диска вентилятора с круговым пазом

В результате этого, происходит значительное изменение физико-механических свойств поверхностного слоя заготовки, а именно: возрастает твердость, снижается пластичность и резко повышается хрупкость сплава. Возникают внутренние структурные превращения, приводящие к образованию «альфированного» слоя, который удаляют последующей механической обработкой.

Штамповка лопатки выполнена с припуском на сторону от 22 до 25 мм. Технологический процесс обработки лопатки состоит из двух взаимосвязанных этапов. Первый – это подготовка технологических баз лопатки. Схема базирования и вид технологических баз обусловлены габаритами и конструкцией лопатки (рис. 4).

Размеры технологических баз соответствуют размерам обрабатываемой лопатки, ее массе и жесткости. В качестве базы принят хвостовик лопатки. Цилиндрическая цапфа на периферии пера лопатки дает возможность дополнительно зафиксировать заготовку в двух направлениях и создать дополнительную жесткость при обработке.

Второй этап – это обработка непосредственно проточной части лопатки относительно подготовленной технологической базы. Обработка лопатки ведется за несколько операций на разных фрезерных станках с ЧПУ. При этом важным является принцип постоянства технологических баз, что положительно сказывается на точности обработки.

Круговой хвостовик лопатки (рис. 5) формируется на операциях, где снимается основной измененный слой материала. Для обработки хвостовой части лопатки последовательно с двух сторон за одну установку было разработано приспособление на 5-координатный станок с ЧПУ ИС-800. Обработка осуществляется в позиционном режиме.

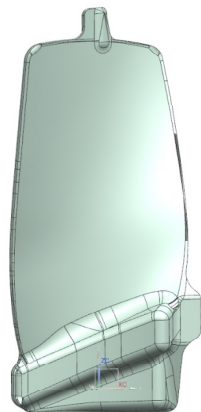


Рис. 3. Заготовка вентиляторной лопатки

Таблица 1 – Геометрические характеристики широкохордной вентиляторной лопатки

Параметры лопатки	Значение параметра
Высота лопатки H_{max} , мм	476,3
Толщина S_{max} верхнего сечения нижнего сечения, мм	5,05 15,65
Хорда L_{max} верхнего сечения нижнего сечения, мм	235,2 213,7
R_{min} входной кромки выходной кромки	0,35 0,44
R_{max} входной кромки выходной кромки, мм	1,72 1,05
Шероховатость, R_a , мкм	1,6
Точность, мм	не > 0,16

Требования к точности и шероховатости поверхностей хвостовика лопатки (рис. 6) обусловили выбор технологии и стратегию обработки детали на станке. Благодаря выбранной схеме крепления заготовки в приспособлении и используя технические характеристики модернизированного фрезерного станка с ЧПУ удалось свести к минимуму погрешности установки и перекрепления детали, при этом, обеспечив полный объем необходимой обработки (рис. 7).

При обработке использовались фрезы компании ISCAR с механическим креплением трехугольных твердосплавных пластин. Черновая обработка проводилась фрезой диаметром 20 мм при $n = 1035$ об/мин, $V = 65$ м/мин, подачей на зуб $F_z = 0,5$ мм/зуб, с числом зубьев $Z = 3$, $a_p = 0,6$ мм. Чистовая обработка осуществлялась фрезой диаметром 6мм, $R = 3$ мм попутным фрезерованием на режимах: $n = 8900$ об/мин, $V = 169$ м/мин, $F_z = 0,27$ мм/зуб, $F = 1000$ мм/мин.

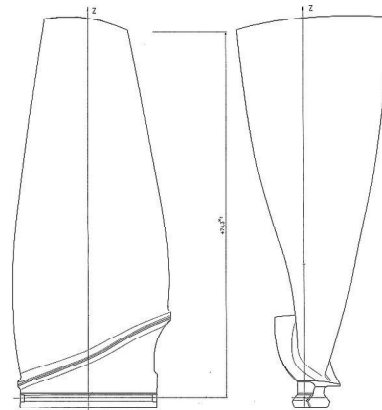


Рис. 4. Широкохордная вентиляторная лопатка

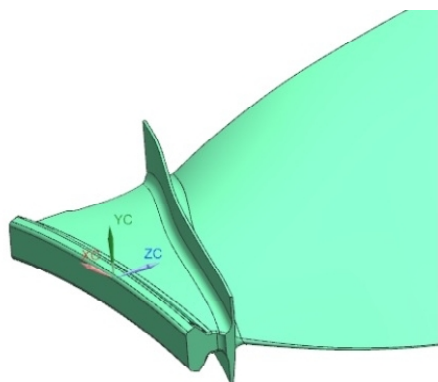


Рис. 5. Хвостовик ширококордной вентиляторной лопадки

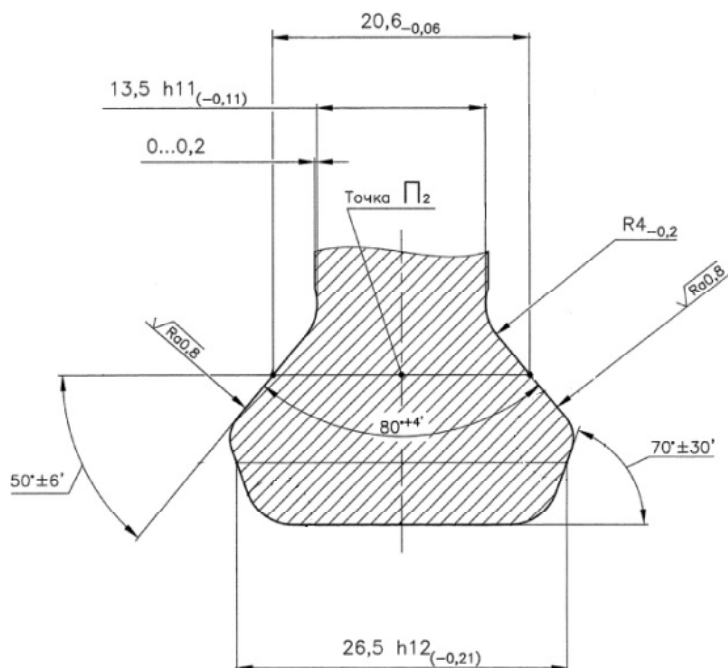


Рис. 6. Поперечное сечение хвостовика лопадки

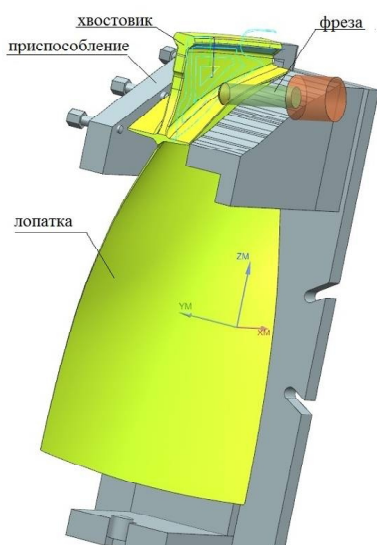
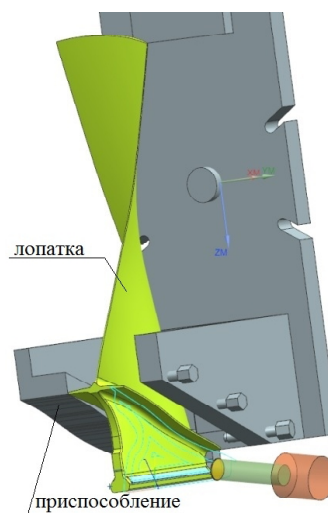


Рис. 7. Обработка хвостовика лопадки на фрезерном станке с ЧПУ ИС-800



В результате были получены результаты по шероховатости поверхностей хвостовика — $Ra = 0,38...0,47$ мкм. Для контроля геометрических размеров хвостовика лопадку измеряли на контрольно-измерительной машине, где подтвердились заявленные конструкторские параметры (рис. 8).

После обработки хвостовика лопадки, являющегося технологической базой, последующая обработка выполнялась по проточной части на двухстоечном модернизированном станке с ЧПУ модели 4ФСЛ-8П, оснащенный системой Sinumerik-840D (рис. 9).

Черновое фрезерование проточной части лопадки по штамповочной корке представляет наибольшие трудности из-за высокой твердости и неоднородности структуры поверхностного слоя титанового сплава. Поэтому, для обдирочного фрезерования по корке быстрорежущие фрезы непригодны [1]. В производственных условиях для предварительной обработки штамповок применялись фрезы с пластинами из твердого сплава ВК8.

Особенностью станка 4ФСЛ-8П является возможность одновременной обработки лопадки с двух сторон за счет двух независимых суппортов

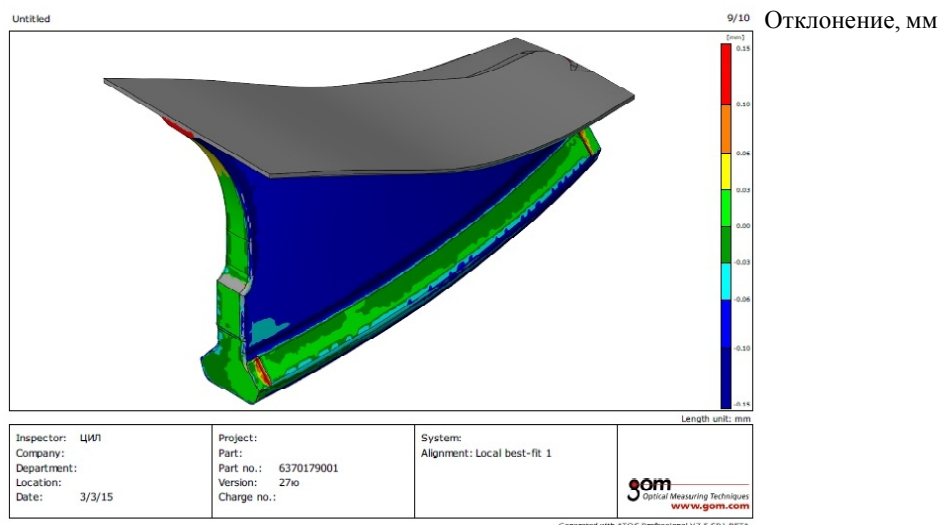


Рис. 8. Результаты измерения хвостовика лопатки на контрольно-измерительной машине

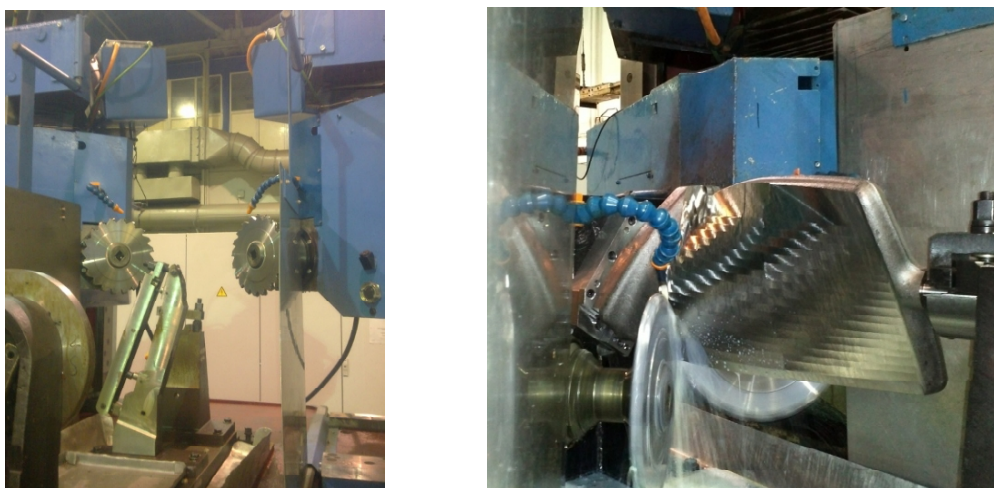


Рис. 9. Фрезерование пера лопатки на станке 4ФСЛ-8П

с отдельными приводами главного движения. Управление суппортами осуществляется системой ЧПУ по двухканальному принципу с независимым управлением. Для создания благоприятных условий резания и минимизации упругих деформаций лопатки в процессе обработки движения фрез были программно синхронизированы таким образом, чтобы точки приложения сил резания с двух сторон лопатки были взаимно симметричны относительно пера лопатки (рис. 10, рис. 11).

Черновая обработка осуществлялась дисковыми фрезами диаметром 270 мм компании ISCAR с механическим креплением круглых твердосплавных пластин $R = 8$ мм. Количество пластин – 26 шт. Обработка осуществлялась на режимах: $n = 48$ об/мин, $F_{мин} = 40$ мм/мин для первого врезания и $F_{мин} = 180$ мм/мин для установившихся режимов резания. Оставляемый припуск по поверхности лопатки составил 3 мм.

Однако после черновой обдирки проточной части лопатки прикорневой участок остался необработанным по причине «теневой» зоны для дисковых фрез. Доработка теневых зон осуществляется за несколько переходов цельнотвердосплавными фрезами на модернизированном станке ФП-17, оснащенного системой ЧПУ WL-4М (рис. 12).

Обработка лопатки осуществляется последовательно с двух сторон в специальном приспособлении, в котором лопатка после установки и закрепления принимает наклонное положение относительно горизонтали, позволяющее «открыть» теневые зоны прикорневых участков (рис. 13).

Обработка проводится цельнотвердосплавным коническим инструментом из сплава H10F на режимах $n = 200$ об/мин, $V = 16...20$ м/мин, $F = 100...140$ мм/мин. Основной задачей данной операции является выравнивание припуска с ос-

новным припуском до 3 мм в области прикорневого участка лопатки и предварительная обработка бандажной полки хвостовика лопатки со стороны профиля пера (рис. 14).

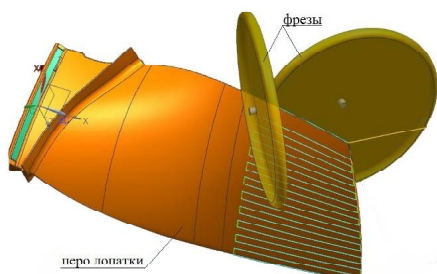


Рис. 10. Моделирование черного фрезерования периферии пера лопатки

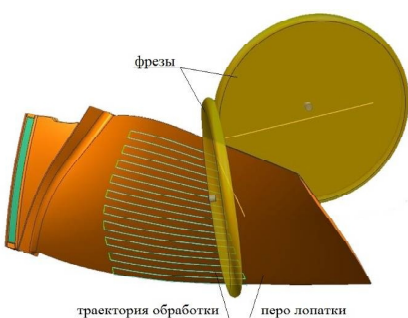


Рис. 11. Моделирование черного фрезерования в средней части пера лопатки



Рис. 12. Станок с ЧПУ ФП-17, оснащенный системой ЧПУ WL-4M

Предварительно обработанная лопатка проходит термическую обработку, после которой проводится чистовая обработка проточной части профиля и бандажной полки пера лопатки на обрабатывающем центре Turbomill-1200g (рис. 15). Для расчета управляющей программы применялся специализированный программный продукт компании LIECHTI-TURBOSOFT plus. Для сравнения полученных результатов был подготовлен про-

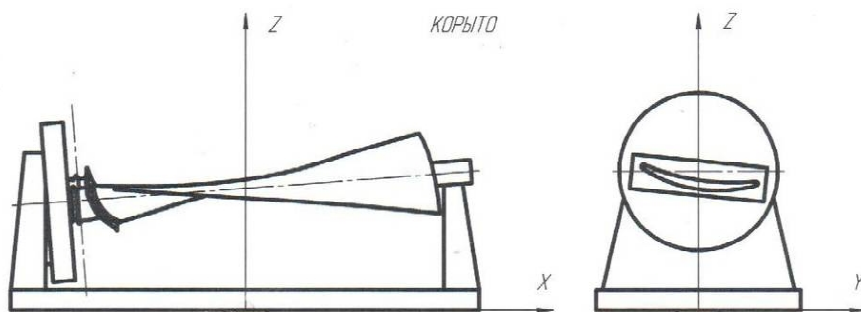


Рис. 13. Установка заготовки на станок с ЧПУ ФП-17

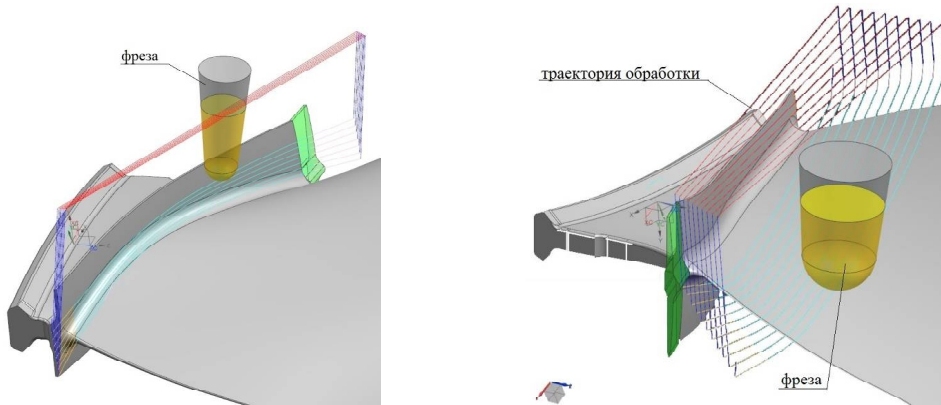


Рис. 14. Фрезерование прикорневого участка пера лопатки на станке с ЧПУ ФП-17

ект обработки лопатки в CAD/CAM системе UG/NX. При сравнении двух вариантов результаты обработки были сопоставимы по чистоте обработанной поверхности и отклонениям точек профиля пера лопатки.

Кинематика и техническая характеристика станка позволила применить особый вид механической обработки – токарное фрезерование, при котором лопатка, закрепленная в синхронизированных шпинделях, вращается с переменной окружной скоростью вокруг своей оси, а качающийся шпиндель станка повторяет заданное технологическое угловое положение оси инструмента относительно оси лопатки для обеспечения постоянства скорости резания [2]. При установке лопатки на станок в качестве технологической базы используется хвостовик лопатки. С торца лопатки в качестве дополнительного поддерживающего элемента используется бобышка с двумя точечными упорами, дополнительно передающими крутящий момент шпинделя приводного стола.



Рис. 15. Обрабатывающий центр TURBOMILL-1200g

Схема фрезерования представляет собой спиральную кривую с продольным шагом, обеспечивающим требования по шероховатости обработанной поверхности. Схема чистового фрезерования лопатки поперечными строками обусловлена тем, что при обработке деталей с помощью поперечной подачи при вращающейся заготовке ее жесткость изменяется с изменением припуска равномерно как со стороны спинки, так и со стороны корыта.

Для поддержания оптимальных значений эффективного рабочего диаметра инструмента, угол наклона фрезы при движении по поперечной строке должен постоянно меняться (рис. 16). Данный механизм исключает процессы пластического деформирования и подмятия металла вершиной инструмента при нулевом значении угла. Значение угла наклона оси фрезы, определяющее окружную скорость резания в каждой точке контакта, устанавливаются, исходя из условия величины деформации пера лопатки, не превышающей допуск на размеры обрабатываемой поверхности [2].

Для фрезерования применяется фреза диаметром 30 мм с механическим креплением твердосплавных пластин. Применяемые пластины имеют радиус 6мм. Наклон оси инструмента исключает точки с нулевой скоростью резания, что положительно сказывается на качестве обработки. При задании параметров обработки в системе UG/NX угол опережения оси инструмента (угол β) изменялся от 5 до 15 градусов относительно нормали к поверхности в точке касания инструмента и обрабатываемой детали. Боковой наклон фрезы отсутствовал (рис. 17).

Скорость резания составляла $V = 80...85$ м/мин, подача на зуб $S_z = 0,07...0,3$ мм/зуб, число зубьев фрезы $z = 4$. Число оборотов шпинделя принимается с учетом геометрии проточной части лопатки, значений

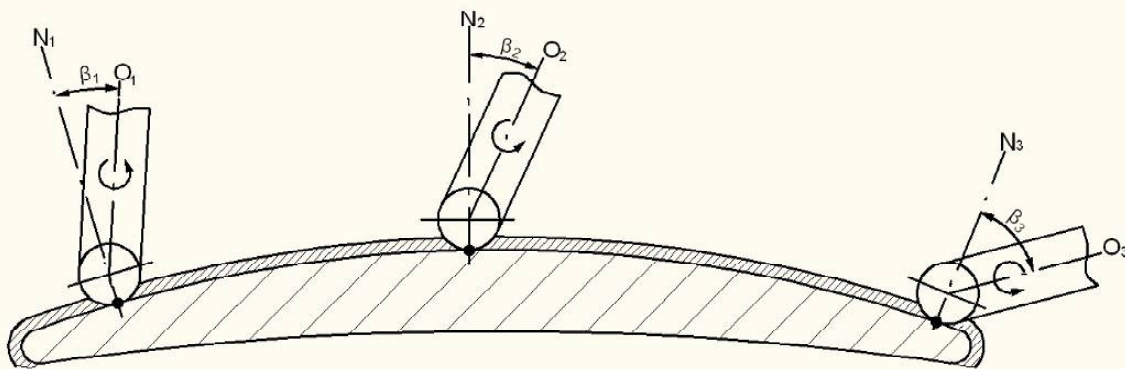


Рис. 16. Схема положения инструмента на поверхности заготовки:

N_i – нормаль к поверхности в точке контакта инструмента с деталью; O_i – вектор оси инструмента; β_i – угол опережения инструмента

Таблица 2 – Шероховатость поверхностей после финишного высокоскоростного фрезерования

Условный номер лопатки	Значение шероховатости, R_a , мкм			Среднее значение, R_a , мкм	
	Черт.	Измерения			
		1	2		3
1	1,6	1,45	1,58	1,9	1,64
2		1,18	1,75	1,59	1,51
3		1,78	1,71	1,58	1,69
4		1,55	1,5	1,62	1,57

Выводы

Представленная технология формообразования вентиляторной лопатки является результатом проведенных экспериментальных работ по определению рациональной стратегии фрезерной обработки сложнопрофильных деталей, которыми являются рабочие вентиляторные лопатки. Применение производственного опыта в решении практических задач по обработке родственных деталей позволит повысить качество обработки поверхностей и стабильность получаемых размеров.

Список литературы

1. Панасенко В. А. Черновое фрезерование широкохордных вентиляторных лопаток твердосплавным инструментом на станках с ЧПУ / Панасенко В. А., Качан А. Я., Мозговой В. Ф. // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – №10 (67). – С. 21–26.
2. Полетаев В. А. Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей / Полетаев В. А. – М. : Машиностроение, 2006. – 257 с.

Поступила в редакцию 14.03.2016

Мозговой В.Ф., Березовський Є.К., Панасенко В.О. Формоутворення широкохордної вентиляторної лопатки ТРДД на фрезерних верстатах з ЧПК

Представлено практичний досвід рішення технологічної задачі обробки вентиляторної широкохордної лопатки на фрезерних верстатах з ЧПК із забезпеченням необхідних конструкторських параметрів. Розглянуто досвід застосування суцільнотвердосплавних фрез та фрез з механічним кріпленням твердосплавних пластин для досягнення максимальної продуктивності.

Ключові слова: авіаційний двигун, титановий сплав, лопатка, хвостовик, верстат з ЧПК, фреза, деформування, швидкість різання, шорсткість, подача.

Mozgovoi V., Berezovskii E., Panasenko V. Fabrication extensive fan-driven blade of aircraft engines on milling CNC machine

Practical experience of the decision of a technological problem processing blade on milling machines CNC with maintenance of demanded design parameters is presented. Considered application experience mills tools with mechanical fastening plates for achievement of the maximum productivity.

Key words: aviation engine, titanium alloy, shovel, shaft, CNC machine, milling, deformation, speed of cutting, a roughness, giving.