

УДК 621.452.3

В. Ф. МОЗГОВОЙ¹, А. Я. КАЧАН², В. А. ПАНАСЕНКО¹¹АО “Мотор Сич”, Запорожье, Украина² Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

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. После механической обработки лопаток на станках с ЧПУ выполнено сравнение полученных величин отклонений точек профиля хвостовика лопатки и точек профиля пера лопатки с требуемыми конструкторскими параметрами, заданными в чертеже.

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

Введение

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 антивибрационных 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, растёт уровень контактных напряжений на рабочих поверхностях хвостовика лопатки и пазов диска вентилятора. Эта проблема решается путём увеличения площади контактной поверхности хвостовика лопатки с круговым пазом диска.

Существенное влияние на обрабатываемость деталей имеет физико-механические свойства современных титановых сплавов, из которых выполнены лопатки.

1. Цель работы

Представить приобретённый опыт технологии обработки широкохордных вентиляторных лопаток

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, заданные в чертеже.

2. Содержание и результаты работ

Широкохордная вентиляторная лопатка выполнена из титанового сплава ВТ6 и характеризуется большой степенью кривизны и закрутки пера (рис. 1).

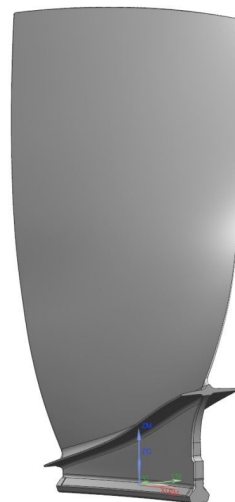


Рис. 1. Модель широкохордной вентиляторной лопатки

Лопатка устанавливается в колесо вентилятора (рис. 2) по круговому пазу. Техническая характеристика лопатки представлена в табл. 1.



Рис. 2. Модель диска вентилятора с круговыми пазами

ные превращения, приводящие к образованию “альфированного” слоя, который удаляют последующей механической обработкой.

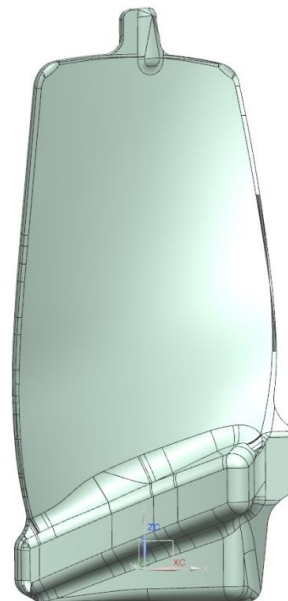


Рис. 3. Заготовка вентиляторной лопатки

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 R_{max} входной кромки выходной кромки, мм	0,35 0,44 1,72 1,05
Шероховатость, R_a , мкм	1,6
Точность, мм	не > 0,16

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 $\sphericalangle 1 \searrow$.

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 структур-

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 обусловлен габаритами и конструкцией лопатки.

Размеры технологических баз соответствуют размерам обрабатываемой лопатки, её массе и жёсткости. В качестве баз принят хвостовик лопатки. Цилиндрическая цапфа на периферии пера лопатки даёт возможность дополнительно зафиксировать заготовку в двух направлениях и создать дополнительную жёсткость при обработке.

Второй этап - это обработка непосредственно проточной части лопатки относительно подготовленной технологической базы. Обработка лопатки ведётся 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. 4) формируется на операциях, где снимается основной изменённый слой материала. Для обработки хвостовой части лопатки последовательно с двух сторон за одну установку было разработано приспособление на 5-ти координатный станок с ЧПУ ИС-800. Обработка осуществляется в позиционном режиме.

Требования к точности и шероховатости поверхностей хвостовика лопатки (рис. 5) обусловили

выбор технологии и стратегию обработки детали на станке.

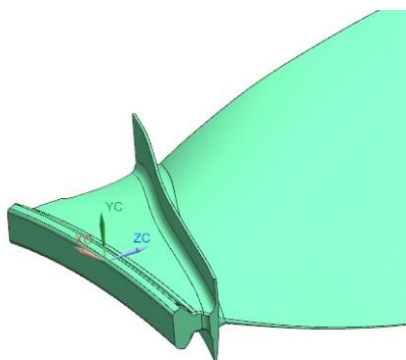


Рис. 4. Хвостовик широкохордной вентиляторной лопатки

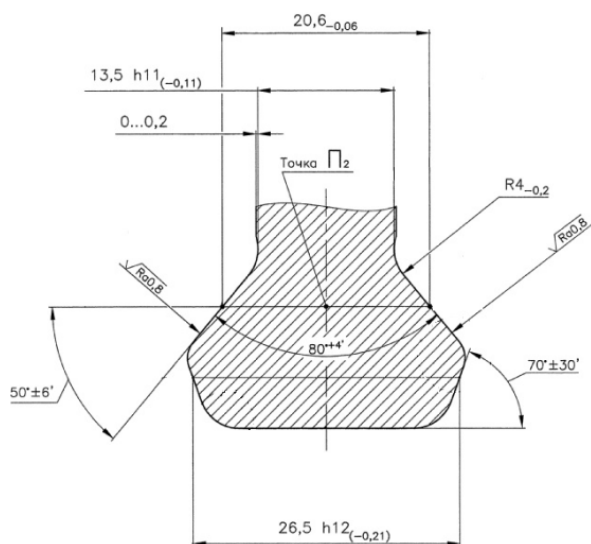


Рис. 5. Поперечное сечение хвостовика лопатки

Благодаря выбранной схеме крепления заготовки в приспособлении и используя технические характеристики модернизированного фрезерного станка с ЧПУ удалось свести к минимуму погрешности установки и перезакрепления детали, при этом, обеспечив полный объём необходимой обработки (рис. 6).

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

В результате были получены результаты по шероховатости поверхностей хвостовика –

$Ra = 0,38 \div 0,47$ мкм. Для контроля геометрических размеров хвостовика лопатку измерили на контрольно-измерительной машине, где подтвердились заявленные конструкторские параметры (рис. 7).

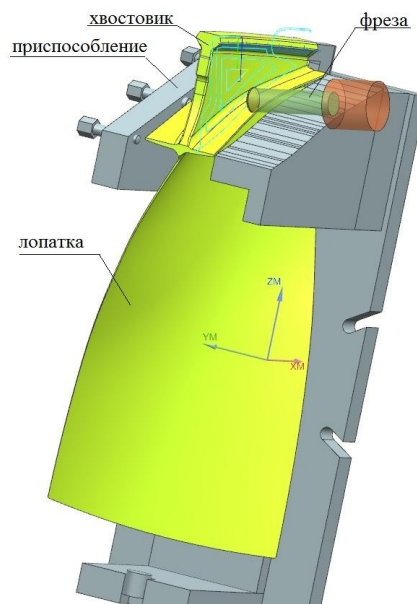


Рис. 6. Моделирование обработки хвостовика лопатки на фрезерном станке с ЧПУ ИС-800

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

Черновое фрезерование проточной части лопатки по штамповочной корке представляет наибольшие трудности из-за высокой твёрдости и неоднородности структуры поверхностного слоя титанового сплава. Поэтому, для обдирочного фрезерования по корке быстрорежущие фрезы непригодны $\surd 1 \searrow$. В производственных условиях для предварительной обработки штамповок применялись фрезы с пластинами из твёрдого сплава ВК8.

Особенностью станка 4ФСЛ-8П является возможность одновременной обработки лопатки с двух сторон за счёт двух независимых суппортов с раздельными 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. 9).

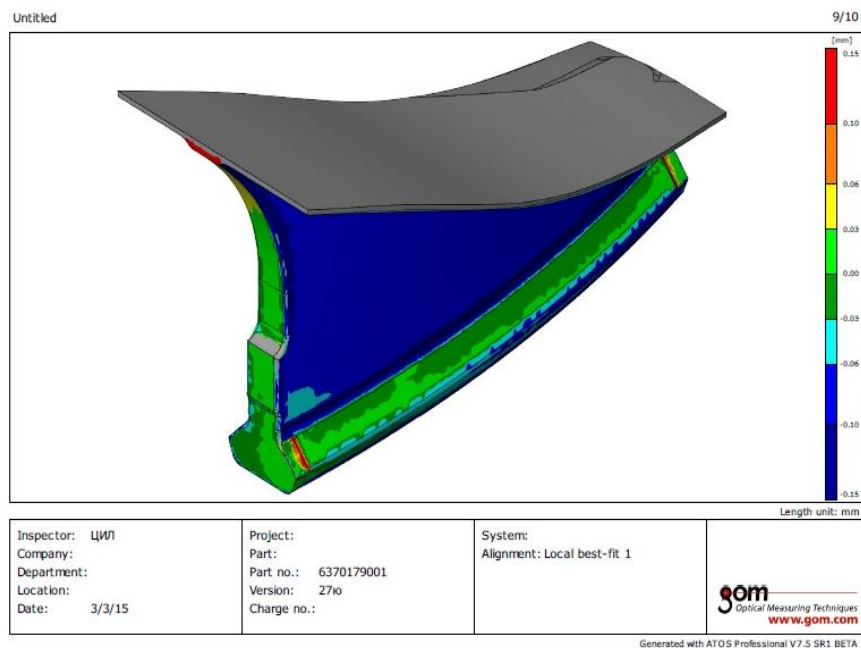


Рис. 7. Результаты измерения хвостовика лопатки на контрольно-измерительной машине



Рис. 8. Подготовка обработки пера лопатки на станке 4ФСЛ-8П



Рис. 9. Фрезерование пера лопатки одновременно с двух сторон на станке 4ФСЛ-8П

Черновая обработка осуществлялась дисковыми фрезами диаметром 270 мм компании ISCAR с механическим креплением круглых твердосплавных пластин $R = 8$ мм (рис. 10). Количество пластин – 21 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.

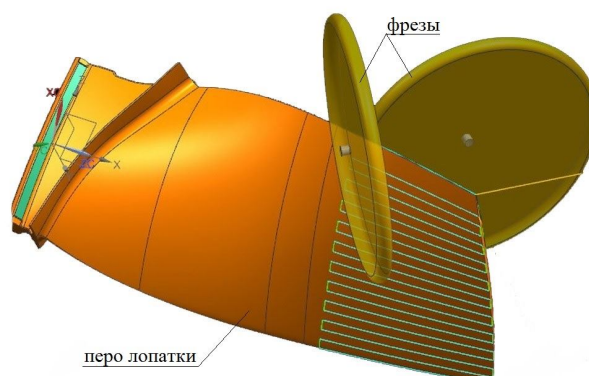


Рис. 10. Моделирование чернового фрезерования периферии пера лопатки

Однако, после черновой обдирки проточной части лопатки прикорневой участок остался необработанным по причине "теневого" зоны для дисковых фрез. Доработка теневых зон осуществляется за несколько переходов цельнотвердосплавными фрезами на модернизированном станке ФП-17, оснащённом системой ЧПУ WL-4М (рис. 11).



Рис. 11. Модернизированный станок с ЧПУ ФП-17, оснащённый системой ЧПУ WL-4M

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. 12). Обработка проводится цельнотвердосплавным коническим инструментом из сплава H10F на режимах $n = 200$ об/мин, $V = 16 \div 20$ м/мин, $F = 100 \div 140$ мм/мин. Основной задачей данной операции является выравнивание припуска с основным припуском до 3 мм в области прикорневого участка лопатки и предварительная обработка бандажной полки хвостовика лопатки со стороны профиля пера (рис. 13).

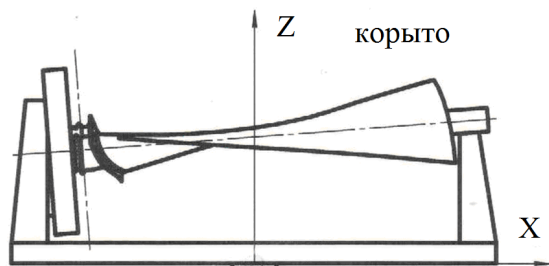


Рис. 12. Установка в приспособлении заготовки на станке с ЧПУ ФП-17

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. 14). Для расчёта управляющей программы применялся специализированный программный продукт компании LIECHTI - TURBOSOFT plus. Для сравнения полученных результатов был подготовлен проект обработки лопатки

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

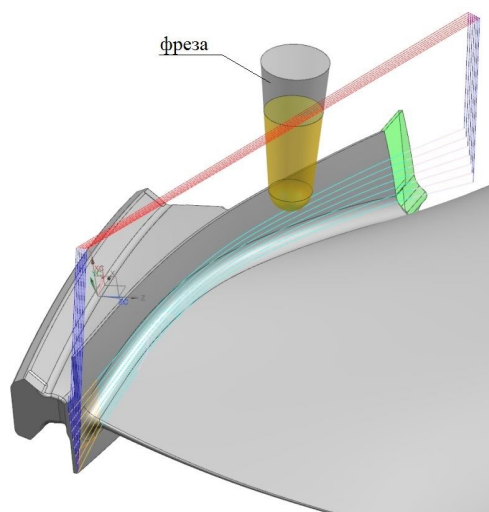


Рис. 13. Фрезерование бандажной полки со стороны пера лопатки на станке с ЧПУ ФП-17



Рис. 14. Обрабатывающий центр Turbomill-1200g

Кинематика и техническая характеристика станка позволила применить особый вид механической обработки - токарное фрезерование, при котором лопатка, закреплённая в синхронизированных шпинделях, вращается с переменной окружной скоростью вокруг своей оси, а качающийся шпиндель станка повторяет заданное технологом угловое положение оси инструмента относительно оси лопатки для обеспечения постоянства скорости резания и одновременно поступательно перемещается вдоль оси лопатки $\sphericalangle 2 \setminus$.

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.

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 её жёсткость изменяется с изменением припуска равномерно как со стороны спинки, так и со стороны корыта $\sphericalangle 2 \setminus$.

Для поддержания оптимальных значений эффективного рабочего диаметра инструмента, угол наклона фрезы при движении по поперечной строке должен постоянно меняться (рис. 15).

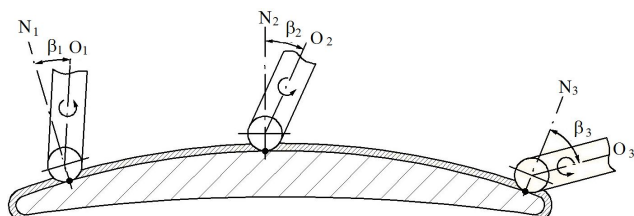


Рис. 15. Положение инструмента на поверхности лопатки при токарном фрезеровании:

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

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, устанавливают, исходя из условия величины деформации пера лопатки не превышающей допуск на размеры обрабатываемой поверхности $\sphericalangle 2 \setminus$.

Для фрезерования применяется фреза диаметром 30 мм с механическим креплением твердосплавных пластин. Применяемые пластины имеют радиус 6 мм. 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.

Скорость резания составляла $V = 80 \div 85$ м/мин, подача на зуб $S_z = 0,07 \div 0,3$ мм/зуб, число зубьев

фрезы $z = 4$. Число зубьев фрезы, её диаметр и число оборотов шпинделя принимается с учётом геометрии проточной части лопатки, значений радиусов и участков двойной кривизны. Эти параметры определяют частоту колебаний сил резания, деформирующих деталь $\sphericalangle 2 \setminus$. Частота этих колебаний должна быть не менее чем на два порядка выше частоты собственных колебаний заготовки. В этом случае деталь из-за своей инертности не успевает деформироваться под действием сил резания $\sphericalangle 2 \setminus$. Обработку лопатки проводили на частоте вращения шпинделя $n = 890 \div 900$ об/мин.

Прикорневой участок лопатки обрабатывался концевой фрезой диаметром 10 мм, $R = 5$ мм с коническим телом режущей части на режимах: $V = 95 \div 100$ м/мин, подача $S_z = 0,08 \div 0,1$ мм/зуб, $z = 4$ (рис. 16).

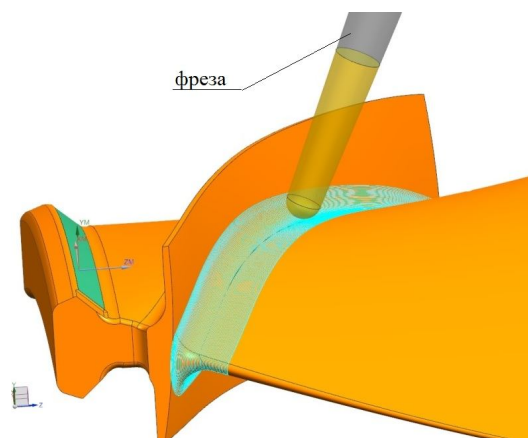


Рис. 16. Визуализация управляющей программы при обработке лопатки на станке Turbomill-1200g

Стратегия обработки в этой зоне отличалась от стратегии обработки проточной части лопатки. Характер конструкторского построения сопряжения проточной части и бандажной полки лопатки предопределил стратегию обработки и выполнялся с программно "зажатой" 5-ой осью. Таким образом, обработка проводилась в 4-х координатах с углом опережения оси инструмента от 15 до 25 градусов.

Результаты измерений обработанной лопатки на измерительной машине показали соответствие заявленным параметрам фактически полученным на станке с учётом оставленного припуска под финишную обработку (рис. 17). После фрезерования технологическую бобышку удаляют и лопатку направляют на финишную обработку. В результате чистовой обработки вентиляторной лопатки на станке Turbomill-1200g были достигнуты требуемые точностные параметры и шероховатость обработанных поверхностей.

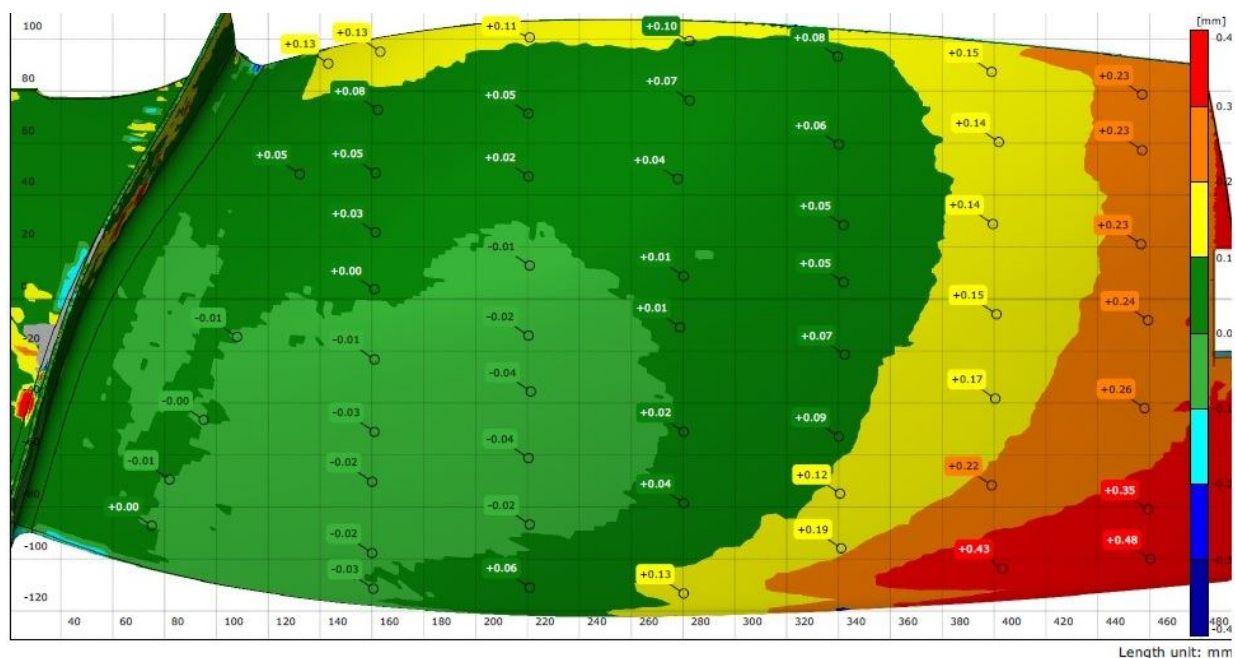


Рис. 17. Результаты контроля профиля вентиляторной лопадки на контрольно-измерительной машине

Практика показала, что применение высокоскоростного фрезерования на обрабатывающих центрах с одновременным управлением инструмента в 4-х и 5-ти координатах обеспечивает при обработке проточной части и прикорневого участка вентиляторной лопадки получение требуемых геометрических размеров в пределах припуска на финишную обработку.

После выполненного фрезерования по профилю пера лопадки на последующие операции оставлялся припуск, величина которого необходима для устранения следов от строчек фрезы при стыковке разных переходов в зоне сопряжения радиусов, входных и выходных кромок. Этот припуск достаточно быстро удаляется ручной доводкой с проверкой геометрических размеров и размера пера по хорде.

Шероховатость обработанной поверхности измерялась профилометром. Результаты измерений показаны в табл. 2.

Таблица 2

Шероховатость поверхностей после финишного высокоскоростного фрезерования

Номер лопадки	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

Заключение

Представленная технология формообразования вентиляторной лопадки является результатом проведенных экспериментальных работ по определению рациональной стратегии фрезерной обработки сложнопрофильных деталей, которыми являются рабочие вентиляторные лопадки.

Применение производственного опыта в решении практических задач по обработке родственных деталей позволит повысить качество обработки поверхностей и стабильность получаемых размеров.

Литература

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

References

1. Panasenko, V. A., Kachan, A. Y., Mozgovoy, V. F. Chernovoe frezerovanie shirokokhordnykh ventilyatornykh lopatok tverdosplavnyim instrumentom na stankakh s ChPU [Raufing milling shovels of tools on CNC machines]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2009, no. 10 (67), pp. 21-26.

2. Poletaev, V. A. *Tekhnologiya avtomatizirovanogo proizvodstva lopatok gazoturbinnnykh dvigatelei* [Technology of the automated manufacture of shovels

gas-turbine aircraft engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006. 257 p.

Поступила в редакцию 5.06.2016, рассмотрена на редколлегии 16.06.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф., директор Л. И. Ивченко, Машиностроительный институт Запорожского национального технического университета, Запорожье.

ФОРМОУТВОРЕННЯ ШИРОКОХОРДНОЇ ВЕНТИЛЯТОРНОЇ ЛОПАТКИ ТРДД НА ФРЕЗЕРНИХ ВЕРСТАТАХ З ЧПК

В. Ф. Мозговой, О. Я. Качан, В. О. Панасенко

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. Після механічної обробки лопаток на верстатах з ЧПК, виконано зрівнювання отриманих величин відхилень точок профілю хвостовика лопатки та точок профілю пера лопатки з необхідними конструкторськими параметрами, заданими в кресленні.

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

FABRICATION EXTANSIVE FAN-DRIVEN BLADE OF AIRCRAFT ENGINES ON MILLING CNC MACHINES

V. F. Mozgovej, A. Y. Kashan, V. A. Panasenko

Practical experience of the decision of 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. After machining of shovels on CNC machines comparison of the received sizes deviations of points profile a shaft shovel and points of a profile feather of a shovel with the demanded design parameters set in the drawing is executed.

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

Мозговой Владимир Фёдорович – канд. техн. наук, главный технолог АО “Мотор Сич”, Запорожье, Украина, e-mail: ugt@motorsich.com.

Качан Алексей Яковлевич – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой, ЗНТУ, Запорожье, Украина, e-mail: ugt@motorsich.com.

Панасенко Валерий Александрович – начальник отдела программирования станков с ЧПУ УГТ АО “Мотор Сич”, Запорожье, Украина, e-mail: ugt@motorsich.com.

Mozgovoy Vladimir Fedorovich – Candidate of Technical Science, Chief Process Tehnology JSC "Motor Sich", Zaporozhie, Ukraine, e-mail: ugt@motorsich.com.

Kachan Alexey Yakovlevich – Doctor of Technical Science, professor of Dept., ZNTU, Zaporozhie, Ukraine, e-mail: ugt@motorsich.com.

Panasenko Valerij Aleksandrovich – Chief of Department CNC Machines JSC "Motor Sich", Zaporozhie, Ukraine, e-mail: ugt@motorsich.com.