

УДК 621.452.3

Панасенко В.А., Богуслаев А.В., Мозговой С.В.
ОАО "Мотор Сич". Украина, Запорожье

ОСОБЕННОСТИ ЧЕРНОВОЙ ОБРАБОТКИ ШИРОКОХОРДНЫХ ВЕНТИЛЯТОРНЫХ ЛОПАТОК НА СТАНКАХ С ЧПУ

Анотація

Представлені результати досліджень чернового фрезерування титанових широкохордних вентиляційних лопаток ГТД на фрезерних верстатах з ЧПК інструментом з механічним кріпленням твердосплавних пластин. Проведені дослідження виявили значне підвищення ефективності обробки при застосуванні спеціально запроєктованих фрез.

Abstract

The results of studies of draft-quality milling titanium blades of a turbine engine on milling machines from the numerical control by the instrument with mechanical fixing of hard-alloy laminas are introduced. The held studies have shown a considerable heightening of performance of treating at usage of the specially projected milling cutters.

Введение

Современное развитие конструкций авиационных двигателей и дальнейшее совершенствование их характеристик обуславливает поиск новых методов в решении технологических задач при обработке авиационных деталей. Примером деталей такого класса могут служить широкохордные вентиляторные лопатки авиационных двигателей пятого поколения, выполненные без антивибрационных полок. Широкохордная титановая лопатка имеет нежесткую конструкцию, удлиненную профильную поверхность с относительно тонким сечением, что предопределяет поиск и применение новых методов обработки и режущих инструментов.

Выполненные методом штамповки из титановых сплавов, вентиляторные лопатки ГТД в большинстве случаев обрабатываются на фрезерных станках с числовым программным управлением, что является традиционным в условиях современного производства. Однако физико-механические свойства современных титановых сплавов оказывают существенное влияние на снижение его обрабатываемости. Особенно актуален этот вопрос при необходимости съема больших объемов металла при черновой и получистовой обработке.

Цель работы

Определить пути сокращения трудоёмкости механической обработки деталей из титановых сплавов на примере широкохордной вентилятор-

ной лопатки при большом объёме снимаемого припуска.

Экспериментальная часть

Применение современного режущего инструмента позволяет существенно повысить производительность обработки и стойкость при повышенных нагрузках. В результате чего обеспечивается устойчивый процесс резания, требуемые шероховатость и качество обработанной детали.

На основании опыта при обработке титановых сплавов придерживаются следующих рекомендаций:

- 1) достаточно жесткое крепление заготовки на столе станка;
- 2) обработку следует проводить по схеме несимметричного попутного фрезерования;
- 3) условием применения попутного фрезерования является высокая жесткость системы СПИД, отсутствие люфтов в механизме подачи станка и минимальное расстояние от режущей кромки до торца шпинделя для исключения вибраций;
- 4) отсутствие биения зубьев фрезы;
- 5) применение смазочно-охлаждающих жидкостей при условии обеспечения обильного подвода жидкости в зону резания. В некоторых случаях рекомендовано охлаждение минеральными маслами;
- 6) использование положительной геометрии режущей части и острой режущей кромки.

Эти рекомендации нашли своё отражение на ОАО "Мотор Сич" при обработке заготовки широкохордной вентиляторной лопатки. Широкохордная вентиляторная лопатка (рис. 1) выполнена из титанового сплава ВТ6.



Рис. 1. Модель широкохордной вентиляторной лопатки

Лопатка характеризуется большой степенью кривизны и закрутки пера. Параметры лопатки приведены в табл. 1.

Таблица 1
Геометрические характеристики широкохордной вентиляторной лопатки

Параметры лопатки	Значение параметра
Высота лопатки H_{\max} , мм	497
Толщина S_{\max} , мм	
верхнего сечения	6.8
нижнего сечения	17.958
Хорда L_{\max} , мм	
верхнего сечения	345
нижнего сечения	190
R_{\min} , мм	
входной кромки	0.412
выходной кромки	0.39
R_{\max} , мм	
входной кромки	0.66
выходной кромки	0.58
Шероховатость, R_a , мкм	3.2
Точность, мм	не > 0.06

Заготовка лопатки (рис. 2) выполнена методом штамповки. Поверхностная штамповочная корка образуется вследствие высокой активности титана к атмосферным газам при высоких температурах металлургических процессов и состоит в основном из окислов и нитридов.

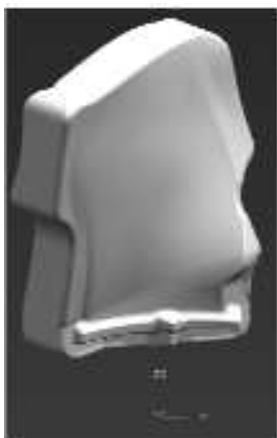


Рис. 2. Модель заготовки широкохордной вентиляторной лопатки

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

Для механической обработки чаще всего применяют фрезерование. Черновое фрезерование

представляет наибольшие трудности из-за высокой твердости и неоднородности структуры поверхностного слоя. Поэтому, для обдирочного фрезерования по корке быстрорежущие фрезы непригодны. В производственных условиях для предварительной обработки штамповок применялись фрезы с пластинами из твердого сплава ВК8. Фрезерование лопатки выполнялось в специальном приспособлении последовательно по корыту и по спинке (рис. 3).

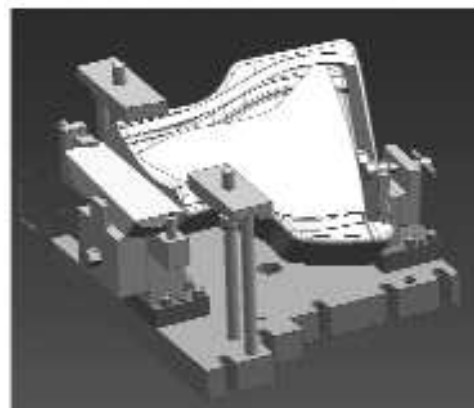


Рис. 3. Установка заготовки в приспособлении

Объем тела заготовки намного превышает объем готовой лопатки (рис. 4).



Рис. 4. Эскиз широкохордной лопатки

Поэтому, важной технологической задачей является применение рациональной схемы фрезерования с учетом особенностей обработки титановых сплавов. Задача чернового фрезерования, как известно, состоит в обеспечении максимально большего объема металла, снимаемого за единицу времени, что снижает трудоемкость обработки на чистовых операциях и делает его более экономичным.

При фрезеровании дисковыми твердосплавными фрезами ВК8 для работы по корке применяют

следующие режимы: $V = 15 \div 30$ м/мин, $S_z = 0,05 - 0,08$ мм/зуб, $t = 1,5 \div 3$ мм. Однако, указанные режимы не обеспечили необходимой производительности обработки. Также фактическая стойкость фрез оказалась недостаточной.

Для решения задачи были проведены производственные испытания торцевой фрезы диаметром 100 мм МТ290-В100R07В012-ИК (рис. 5) фирмы СКИФ, специально спроектированной для обработки титановых сплавов.



Рис. 5. Фреза МТ290-В100R07В012-ИК

Параметры фрезы: $D = 100$ мм, $z = 7$, $H = 50$ мм, $d = 32$ мм. Обработка проводилась на станке с ЧПУ 2254ПМФ3. Обработывался базовый торец лопатки для использования его в дальнейшем в качестве черновой базы. Фреза оснащена твердосплавными пластинками ВОНW12Т308ЕR из твёрдого сплава НСS35. Фрезерование выполнялось с обильным применением СОЖ. В качестве СОЖ применялось машинное масло.

Для оценки по производительности, сравнили результаты работы фрезой ВК8 и испытываемой фрезой фирмы СКИФ. Объём снятия металла при черновом фрезеровании [см³/мин] определялся по формуле [4]:

$$Q = \frac{a_p \times a_e \times V_f}{1000},$$

где a_p – глубина резания, мм;

a_e – ширина фрезерования, мм;

V_f – скорость подачи, мм/мин.

Съём металла при работе фрезой МТ290-В100R07В012-ИК составил $Q = 18$ см³/мин, что в 4,5 раза выше (рис. 6), чем при обработке фрезой с пластинками ВК8 ($Q = 4$ см³/мин). Режимы резания при обработке новой фрезой: скорость резания $V = 25 - 35$ м/мин, подача на зуб $F_z = 0,1 - 0,13$ мм/зуб.

Критерием износа пластин послужил максимально допустимый износ по задней поверхности пластины – 0,3 мм.

Стойкость режущей кромки режущих пластин по результатам испытаний составила $T = 120$ мин (рис. 7).

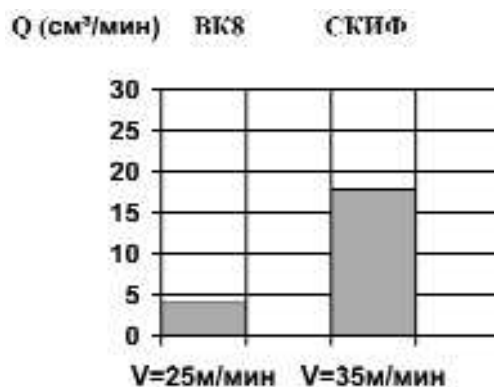


Рис. 6. Объём снимаемого металла Q (см³/мин) в единицу времени

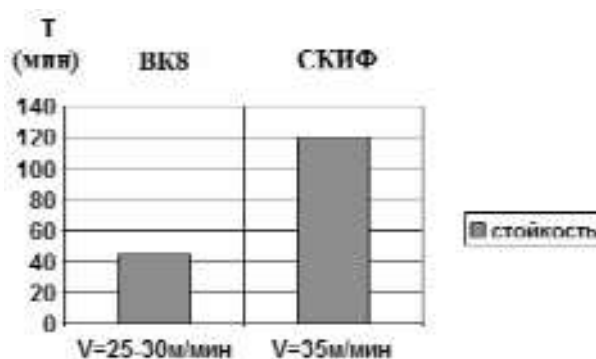


Рис. 7. Стойкость твердосплавных пластин при обработке сплава ВТ6

Одной из особенностей обработки титановых сплавов является необходимость непрерывного контакта твердосплавных пластин с металлом и постоянная погружённость режущей кромки в сплошном металле под штамповочной коркой. Проведенные исследования показали заметное увеличение стойкости твердосплавных пластин при соблюдении этих условий.

Полученные положительные результаты испытаний дали основание для продолжения работ. С учётом приобретённого опыта, обработка была продолжена на высокоскоростном обрабатывающем фрезерном центре К2Х20 французской фирмы HURON с системой ЧПУ Sinumerik-840D (рис. 8). Станок имеет порталную жёсткую конструкцию, вертикальную фрезерную головку и прямоугольный стол размерами 1400×1000 мм.

Благодаря жёсткой конструкции, станок позволяет вести обработку на повышенных режимах резания. На станке установлен контроль максимальной нагрузки на шпиндель. При превышении максимальной нагрузки станок автоматически отключается. Техническая характеристика станка представлена в табл. 2.

Большое значение для обеспечения максимальной производительности, по нашему мнению,



Рис. 8. Высокоскоростной 3-х координатный фрезерный центр K2X20

Таблица 2

Технические характеристики станка K2X20

Рабочие перемещения		
ось X	мм	1200
ось Y	мм	1000
ось Z	мм	550
Рабочий стол		
длина × ширина	мм	1400 × 1000
Шпиндель		
Приемный конус		HSK 63-A
Макс. мощность	кВт	10/15
Макс число об.	об/мин	18000
Момент	Нм	86/130
Подача по X–Y–Z		
ускоренная подача X–Y		
ускоренная подача	мм/мин	30000
ускорение век. X	м/с ²	3
Z	м/с ²	5

имеет инструментальное оснащение станка. На черновых переходах использовался жёсткий инструмент с минимальным вылетом фрезы, что минимизировало отжим.

Неконтролируемый отжим инструмента вызывает непостоянство сил резания, что делает процесс нестабильным, с неравномерной нагрузкой на зубья фрезы. Это влечёт снижение стойкости инструмента, особенно, при обработке титановых сплавов. Для оптимизации процесса назначили малую глубину радиального врезания чтобы избежать излишнего отжима инструмента и сохранить геометрическую точность обработки.

Имеет значение правильный выбор инструмента с возможно большим диаметром и инструментальной оснастки. Величину отжима инструмента (рис. 9) определяли по следующей формуле [4]:

$$\delta = \frac{F_{\text{рез}} \times L^3}{E \times (\pi \times D_{\text{фр}}^4)}$$

где L – вылет инструмента, мм;

D – диаметр фрезы, мм;

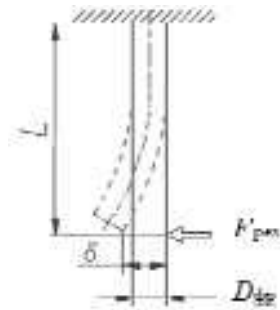


Рис. 9. Схема отжима инструмента под действием сил резания

F – радиальная сила, Н

δ – отжим, мм

E – модуль Юнга материала инструментальной оправки (фрезы), МПа

Выбранная конструкция крепления катушечной фрезы диаметром 100 мм в инструментальном модуле (рис. 10) позволила полностью устранить вынужденные колебания фрезы под действием сил резания. Результаты обработки подтвердили правильность технологических решений.



Рис. 10. Крепление катушечной фрезы в инструментальном модуле HSK-63A

Черновая обработка со стороны спинки и корыта проводилась на режимах, обеспечивающих постоянство нагрузки и равномерность снятия припуска (рис. 11).

Черновая обработка выполнялась катушечной фрезой, оснащённой твердосплавными пластинами, на режимах: $V_{\text{рез}} = 50$ м/мин, $F_z = 0,12–0,14$ мм/зуб, $n = 128$ об/мин, $a_p = 3$ мм, $a_e = 40$ мм.

После черновой обработки заготовка лопатки приняла конфигурацию приближённую к форме готовой лопатки (рис. 12). Фреза в процессе обработки показала хорошие результаты – высокую стойкость (более 90 мин) при достаточной производительности (16 см³/мин). При работе на

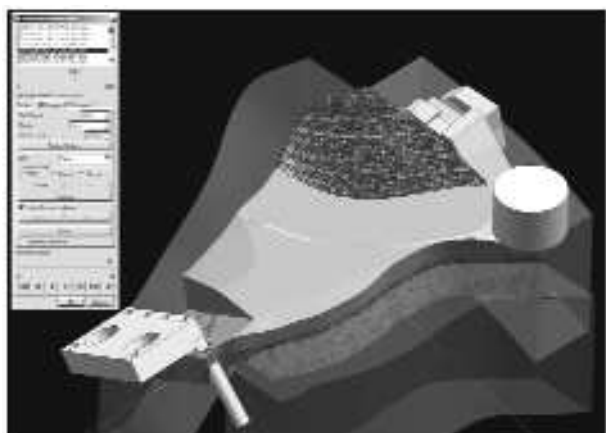


Рис. 11. Черновая послойная обработка фрезой $D = 100$ мм

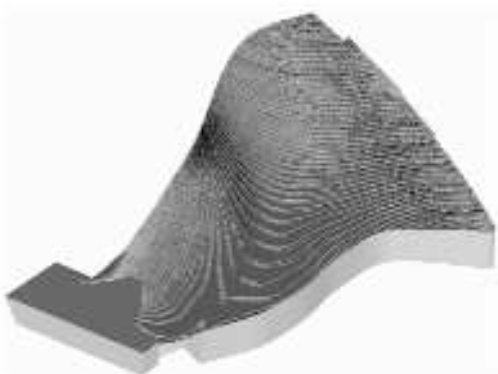


Рис. 12. Лопатка после черновой обработки

скорости резания $V_{рез} = 40$ м/мин и подаче $F_z = 0,12$ мм/зуб фреза проработала 60 мин. Критический износ не был достигнут.

При черновой обработке была испытана и применена другая катушечная фреза диаметром 100 мм – МТ200-100В32R07RP16 (рис. 13), оснащённая круглыми твердосплавными пластинками RPHX1605SN-Ti из твёрдого сплава HCS35 (рис. 14).



Рис. 13. Катушечная фреза фирмы СКИФ МТ200-100В32R07RP16

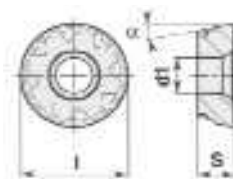


Рис. 14. Твердосплавная пластина RPHX1605SN-T

Работа фрезы отличалась плавностью резания и лучшим качеством обработанной поверхности по сравнению с МТ290-В100R07В012-ИК. Обработка фрезой с круглыми пластинами проводилась на режимах: $V_{рез} = 50$ м/мин, $F_z = 0,12-0,14$ мм/зуб, $n = 160$ об/мин, $a_p = 2$ мм, $a_e = 40$ мм.

При этом объём снимаемого материала составил 10,7–12,5 см³/мин. Фреза проработала более 120 мин. Критический износ не был достигнут. Повысить глубину резания и подачу фрезерования не позволили технические возможности станка. При увеличении нагрузки срабатывала защита шпинделя по мощности.

В результате проведенных исследований при черновой обработке широкохордной лопатки были получены положительные результаты. При обработке торцовой фрезой МТ290-В100R07В012-ИК оснащённой твердосплавными пластинами ВОНW12Т308ER из материала HCS35 выработаны следующие рекомендации по режимам обработки: (см. табл. 3).

Таблица 3

Режимы обработки торцовой фрезой МТ290-В100R07В012-ИК

V_c , м/мин	F_z , мм/зуб	Глубина фрезеров. a_p , мм	Ширина фрезеров. a_e , мм
40–50	0,08–0,12	3	40

При обработке применили метод попутного фрезерования. При врезании фрезы в заготовку подача снижалась на 30–50% от заданной. При фрезеровании по штамповочной корке для увеличения стойкости инструмента скорость резания снижали до 25 м/мин. При данных режимах стойкость инструмента составила не менее 80–100 мин.

Обработка прикорневой зоны и чистовое фрезерование лопатки (рис. 15) осуществлялось цельнотвердосплавными сферическими фрезами диаметром 16 мм из твёрдого сплава Н10F (SANDVIK) на режимах рекомендуемых технической литературой. Чистовая обработка проводилась в тех же приспособлениях, что и черновая.

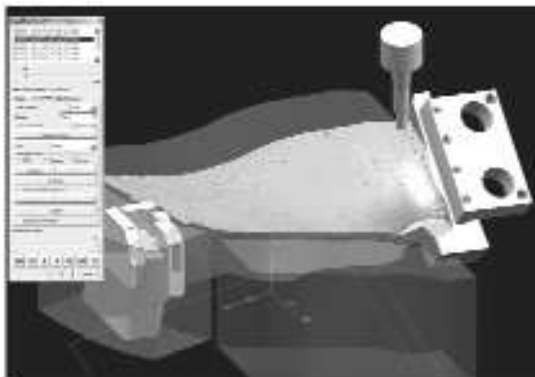
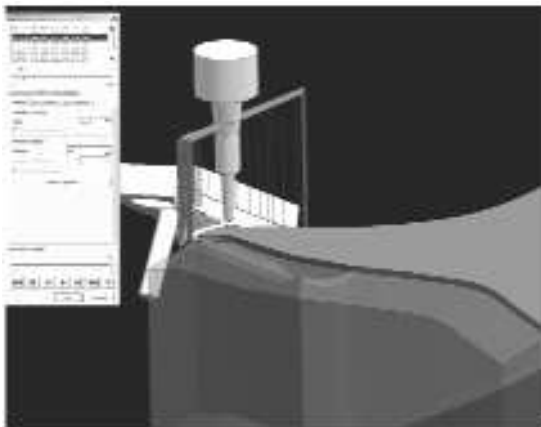


Рис. 15. Обработка прикорневой зоны и чистовая обработка лопатки фрезой $D = 16$ мм

Заключение

Проведенные исследования работы режущего инструмента с применением твердосплавных пластин, адаптированных для черновой обработки широкохордных вентиляторных лопаток из титановых сплавов в тяжело нагруженных условиях, показали перспективность его использования для осуществления производительной обработки заготовок деталей с необходимостью съема большого количества материала в условиях серийного производства. Применение данных разработок позволит существенно снизить трудоёмкость предварительных операций и повысить качество обрабатываемых деталей.

Литература

1. Богуслав В.А., Яценко В.К., Притченко В.Ф. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД. — К.: Манускрипт, 1993. — 334 с.
2. Кривоухов В.А., Чубаров А.Д. Обработка резанием титановых сплавов. — М: Машиностроение, 1970. — 184 с.
3. Левин М.Ю., Лобанов В.М., Гринберг П.Б. Прочность твердосплавных пластин для черновой обработки жаропрочных и титановых сплавов // Станки и инструмент, 1990. — № 12. — С. 30–31.
4. Справочник "Фрезы СКИФ-М", 2008. — 215 с.