

УДК 621.452.3

В.А. ПАНАСЕНКО<sup>1</sup>, А.Я. КАЧАН<sup>2</sup>, В.Ф. МОЗГОВОЙ<sup>1</sup><sup>1</sup>ОАО «Мотор Сич», Запорожье, Украина<sup>2</sup>Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

## ЧЕРНОВОЕ ФРЕЗЕРОВАНИЕ ШИРОКОХОРДНЫХ ВЕНТИЛЯТОРНЫХ ЛОПАТОК ТВЕРДОСПЛАВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ НА СТАНКАХ С ЧПУ

Представлены результаты исследований чернового фрезерования титановых широкохордных вентиляторных лопаток ГТД на фрезерных станках с ЧПУ инструментом с механическим креплением твердосплавных пластин, обеспечивающими высокую производительность и стойкость режущего инструмента. Проведенные исследования показали значительное повышение эффективности обработки при использовании специально запроектированных фрез с механическим креплением твердосплавных пластин. Рекомендуемые режимы обработки обеспечили устойчивый процесс резания, необходимые шероховатость и качество обработанной поверхности.

**Ключевые слова:** авиационный двигатель, лопатка, инструмент, станок с ЧПУ, твердосплавная пластина, инструментальный блок, корпус фрезы.

### 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 antivибрационных полок. Широкохордная титановая лопатка имеет нежёсткую 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 съёма больших объёмов металла при черновой и получистовой обработке.

**Цель работы:** определить пути сокращения трудоёмкости механической обработки деталей из титановых сплавов на примере широкохордной вентиляторной 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 жёсткое крепление заготовки на столе станка;

2) обработку следует проводить по схеме несимметричного попутного фрезерования;

3) условием применения попутного фрезерования является высокая жёсткость 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, а) выполнена из титанового сплава ВТ6. Лопатка характеризуется большой степенью кривизны и закрутки пера.

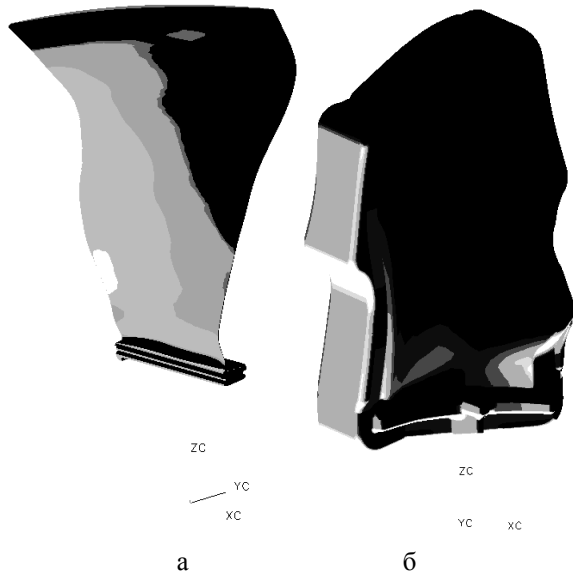


Рис. 1. Модель широкохордной вентиляторной лопатки (а) и ее заготовки (б)

Параметры лопатки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Геометрические характеристики широкохордной вентиляторной лопатки

Параметры лопатки	Значение параметра
Высота лопатки $H_{max}$ , мм	497
Толщина $S_{max}$ верхнего сечения нижнего сечения, мм	6,8 17,958
Хорда $L_{max}$ верхнего сечения нижнего сечения, мм	345 190
$R_{min}$ входной кромки выходной кромки	0,412 0,39
$R_{max}$ входной кромки выходной кромки, мм	0,66 0,58
Шероховатость, $R_a$ , мкм	3,2
Точность, мм	не > 0,06

Заготовка лопатки (рис. 1, б) 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.

В результате этого происходит значительное изменение физико-механических свойств поверхностного слоя, а именно: возрастает твердость, снижа-

ется 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. 2).

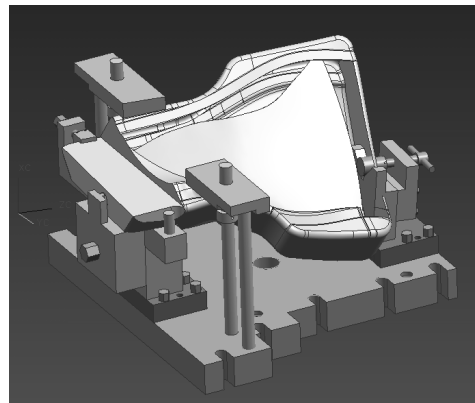


Рис. 2. Установка заготовки в приспособлении

Объем тела заготовки намного превышает объем готовой лопатки (рис. 3). 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:  $V=15\div30$  м/мин,  $S_z=0,05\text{-}0,08$  мм/зуб,  $t=1,5\div3$  мм. Однако, указанные режимы не обеспечили необходимой производительности обработки. Также фак-

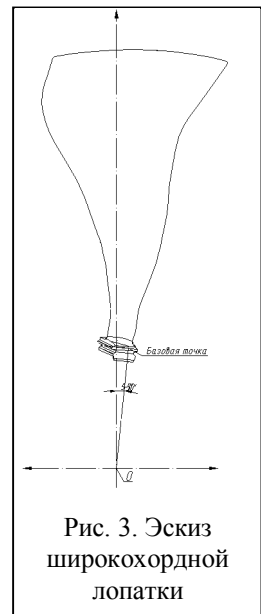


Рис. 3. Эскиз широкохордной лопатки

техническая стойкость фрез оказалась недостаточной. Для решения задачи были проведены производственные испытания торцевой фрезы диаметром 100мм МТ290-В100R07ВО12-ИК (рис. 4) фирмы СКИФ, специально спроектированной для обработки титановых сплавов.

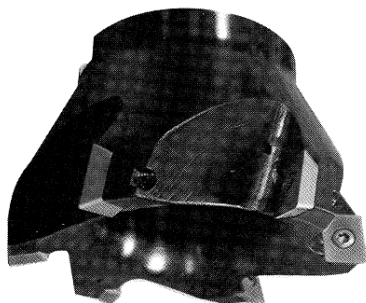


Рис. 4. Фреза МТ290-В100R07ВО12-ИК

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 ВОНW12Т308ER из твёрдого сплава HCS35. Фрезерование выполнялось с обильным применением СОЖ. В качестве СОЖ применялось машинное масло.

Для оценки по производительности, сравнили результаты работы фрезой ВК8 и испытуемой фрезой фирмы СКИФ. Объём снятия металла при черновом фрезеровании [ $\text{см}^3/\text{мин}$ ] 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-В100R07ВО12-ИК составил  $Q=18$   $\text{см}^3/\text{мин}$ , что в 4,5 раза выше (рис. 5, а), чем при обработке фрезой с пластинками ВК8 ( $Q=4$   $\text{см}^3/\text{мин}$ ).

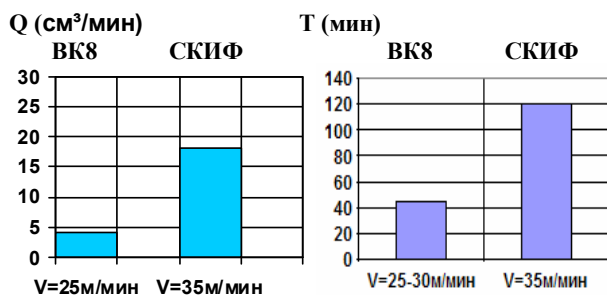


Рис. 5. Результаты экспериментов:  
а – объём снимаемого металла  $Q$  ( $\text{см}^3/\text{мин}$ ) в единицу времени; б – стойкость твердосплавных пластин при обработке сплава ВТ6

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 – 0,3мм.

Стойкость режущей кромки режущих пластин по результатам испытаний составила  $T = 120$  мин (рис. 5, б).

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 K2X20 французской фирмы HURON с системой ЧПУ Sinumerik-840D (рис. 6). Станок имеет порталную жёсткую конструкцию, вертикальную фрезерную головку и прямоугольный стол размерами 1400×1000 мм.



Рис. 6. Высокоскоростной 3-х координатный фрезерный центр K2X20

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

Таблица 2

Технические характеристики станка K2X20

Рабочие перемещения		
• ось X	мм	1200
• ось Y	мм	1000
• ось Z	мм	550
Рабочий стол		
• длина x ширина	мм	1400 x 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 <sup>2</sup>	3
Z	м/с <sup>2</sup>	5

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.

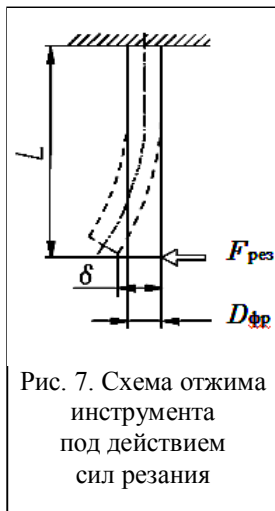


Рис. 7. Схема отжима инструмента под действием сил резания

Имеет значение правильный выбор инструмента с возможно большим диаметром и инструментальной оснастки. Величину отжима инструмента (рис. 7) 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;  $F$  – радиальная сила, Н;  $\delta$  – отжим, мм;

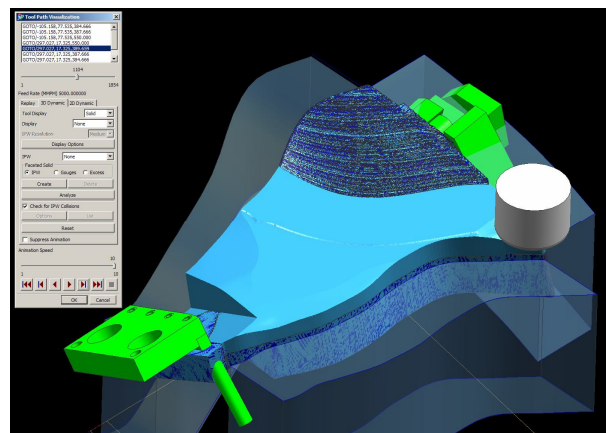
$E$  – модуль Юнга материала инструментальной оправки (фрезы), МПа.

Выбранная конструкция крепления катушечной фрезы диаметром 100мм в инструментальном модуле (рис. 8) позволила полностью устранить вынужденные колебания фрезы под действием сил резания. Результаты обработки подтвердили правильность технологических решений.

Черновая обработка со стороны спинки и корыта проводилась на режимах, обеспечивающих постоянство нагрузки и равномерность снятия припуска (рис. 9).



Рис. 8. Крепление катушечной фрезы в инструментальном модуле HSK-63A

Рис. 9. Черновая послойная обработка фрезой  $D = 100$  мм

Черновая обработка выполнялась катушечной фрезой, оснащённой твердосплавными пластинами, на режимах:  $V_{\text{рез}} = 50$  м/мин,  $F_z = 0,12-0,14$  мм/зуб,  $n = 1280$  об/мин,  $a_p = 3$  мм,  $a_e = 40$  мм.

После черновой обработки заготовка лопатки приняла конфигурацию приближённую к форме готовой лопатки (рис. 10). Фреза в процессе обработки показала хорошие результаты – высокую стойкость (более 90 мин) при достаточной производительности (16см<sup>3</sup>/мин). При работе на скорости резания  $V_{\text{рез}} = 40$  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 100мм – MT200-100B32R07RP16 (рис. 11), оснащённая круглыми твердосплавными пластинками RPHX1605SN-Ti из твёрдого сплава HCS35 (рис. 12).

Работа фрезы отличалась плавностью резания и лучшим качеством обработанной поверхности по сравнению с MT290-B100R07BO12-ИК. Обработка фрезой с круглыми пластинами проводилась на режимах:  $V_{\text{рез}} = 50$  м/мин,  $F_z = 0,12-0,14$  мм/зуб,  $n = 160$  об/мин,  $a_p = 2$  мм,  $a_e = 40$  мм.

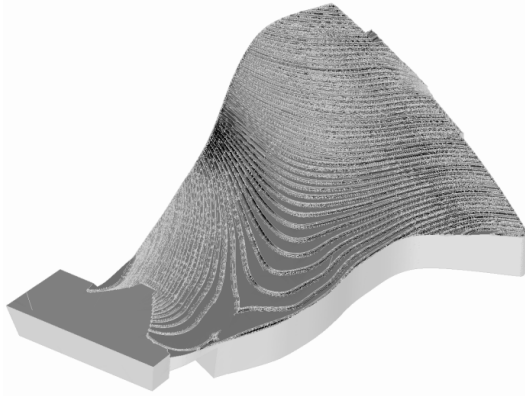


Рис. 10. Лопатка после черновой обработки



Рис. 11. Катушечная фреза фирмы СКИФ MT200- 100B32R07RP16

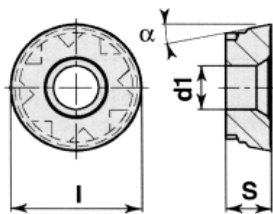


Рис. 12. Твердосплавная пластина RPHX1605SN-T

При этом объём снимаемого материала составил 10,7-12,5см<sup>3</sup>/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 торцевой фрезой MT290-B100R07BO12-1K оснащённой твердосплавными пластинами B0HW12T308ER из материала HCS35 выработаны следующие рекомендации по режимам обработки: (табл. 3).

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.

Таблица 3

Режимы обработки торцевой фрезой MT290-B100R07BO12-1K

V <sub>c</sub> , м/мин	F <sub>z</sub> , мм/зуб	Глубина фрезеров. а <sub>р</sub> , мм	Ширина фрезеров. а <sub>с</sub> , мм
40-50	0,08-0,12	3	40

Обработка прикорневой зоны и чистовое фрезерование лопатки (рис. 13) осуществлялось целнотвердосплавными сферическими фрезами диаметром 16 мм из твёрдого сплава H10F (SANDVIK) на режимах рекомендуемых технической литературой. Чистовая обработка проводилась в тех же приспособлениях, что и черновая.

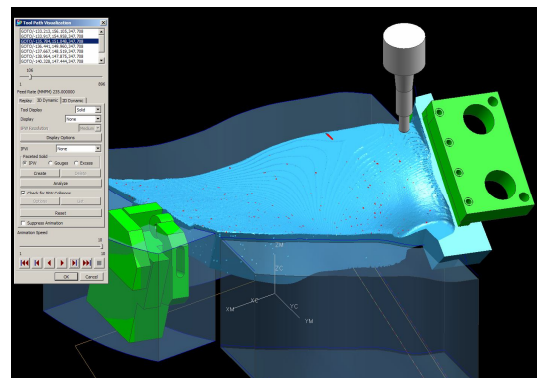
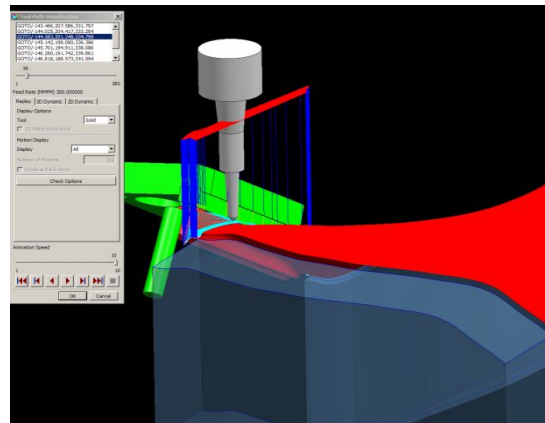


Рис. 13. Обработка прикорневой зоны и чистовая обработка лопатки фрезой D = 16мм

## Заключение

Проведенные исследования работы режущего инструмента с применением твердосплавных пластин, адаптированных для черновой обработки широкохордовых вентиляторных лопаток из титановых сплавов в тяжелонагруженных 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. Богуслаев В.А. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД / В.А. Богуслаев, В.К. Яценко, В.Ф. Притченко. – К.: Манускрипт, 1993. – 334 с.
2. Кривоухов В.А. Обработка резанием титановых сплавов / В.А. Кривоухов, А.Д. Чубаров. – М.: Машиностроение, 1970. – 184 с.
3. Левин М.Ю. Прочность твердосплавных пластин для черновой обработки жаропрочных и титановых сплавов / М.Ю. Левин, В.М. Лобанов, П.Б. Гринберг // Станки и инструмент. – 1990. – № 12. – С. 30-31.
4. Справочник “Фрезы Скиф-М”. – Белгород: ООО «СКИФ-М», 2008. – 215 с.

Поступила в редакцию 6.05.2009

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

### ЧОРНОВЕ ФРЕЗЕРУВАННЯ ШИРОКОХОРДОВИХ ВЕНТИЛЯТОРНИХ ЛОПАТОК ТВЕРДОСПЛАВНИМ ІНСТРУМЕНТОМ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК

*В.А. Панасенко, А.Я. Качан, В.Ф. Мозговой*

Надані результати досліджень чорнового фрезерування титанових широкохордових вентиляційних лопаток ГТД на фрезерних верстатах з ЧПК інструментом з механічним кріпленням твердосплавних пластин, забезпечуючими високу продуктивність та стійкість ріжучого інструмента. Проведені дослідження показали значне підвищення ефективності обробки з застосуванням спеціально запроєктованих фрез з механічним кріпленням твердосплавних пластин. Рекомендовані умови обробки забезпечили стійкий процес різання, потрібні шорсткість та якість обробленої поверхні.

**Ключові слова:** авіаційний двигун, лопатка, інструмент, верстат з ЧПК, твердосплавна пластина, інструментальна оснастка.

### DRAFT-QUALITY MILLING BLADES OF VANES HARD-ALLOY OF TOOLS CARBIDE ON THE MACHINE THE NUMERICAL CONTROL

*V.A. Panasenko, A.Y. Kasha, V.F. Mozgovoj*

The results of studies of draft-quality milling titanium blades of vanes of a turbine engine on milling machines from the numerical control by the instrument with mechanical attachment of hard-alloy laminas supplying high efficiency and stability of a cutting tool are introduced. The held studies have shown a considerable heightening of performance of treating at usage of the specially projected milling cutters with mechanical toolins of hard-alloy laminas. The recommended conditions of treating have provided stable process of cuttings indispensable unevenness and surface quality.

**Key words:** aero-engines, blade, tools, machines from the numerical control, carbide, tooling.

**Панасенко Валерий Александрович** – нач. бюро УГТ, ОАО “Мотор Сич”, Запорожье, Украина, e-mail: ospu.ugt@motorsich.com.

**Качан Алексей Яковлевич** – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина, e-mail: ugt@motorsich.com.

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