

УДК 621.452.3

А.Я. КАЧАН², С.А. ПЕТРОВ¹, В.А. ПАНАСЕНКО¹, С.В. МОЗГОВОЙ¹, Г.В. КАРАСЬ¹¹ОАО «Мотор Сич», Запорожье, Украина²Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ОСЕВЫХ МОНОКОЛЕС ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ФРЕЗЕРОВАНИЕМ

Рассмотрены активно внедряемые на «Мотор Сич» новейшие технологии обработки осевых моноколес с применением высокоскоростного фрезерования.

осевое моноколесо, высокоскоростное фрезерование

Введение

Современное авиадвигателестроение является одной из наукоемких отраслей машиностроения. Сложность проблем современного авиадвигателестроения обусловлена как трудностью обработки материалов деталей ГТД, сложностью их формы, так и высокими требованиями к точности и шероховатости поверхностей деталей. Для реализации поставленных задач на предприятии «Мотор Сич» активно внедряются новейшие технологии формообразования поверхностей и контроля изготавливаемых деталей, а также применяется современное оборудование, в том числе высокоскоростные пятикоординатные станки швейцарской фирмы «LIECHTI» TURBOBLISK-1500 с ЧПУ Sinumerik-840D.

Цель работы Практическое решение технологических задач при обработке моноколес ГТД с применением современного оборудования, прогрессивных методов обработки, эффективных методов резания высокопроизводительным инструментом.

Содержание и результаты исследований Формообразование сложнопрофильных поверхностей осевых моноколес, выполненных как единое целое, является одной из самых сложных проблем современного авиадвигателестроения. Сложность обусловлена высокими техническими требованиями к обрабатываемым поверхностям, сложностью гео-

метрических форм и, конечно, труднообрабатываемостью жаропрочных сталей и сплавов, из которых выполнены моноколеса. Обрабатываемые моноколеса изготавливают из жаропрочных и титановых сплавов. Конструкция колес (рис.1, 2), требуемая точность, геометрические характеристики и необходимая шероховатость моноколес (табл. 1) вызвали необходимость поиска принципиально новых методов их обработки, а также решения сложных технологических задач.



Рис. 1. Осевое моноколесо КНД

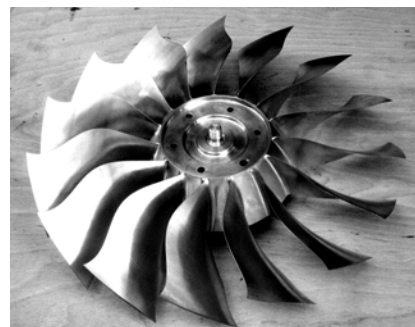


Рис. 2. Широкохордное моноколесо КНД

Таблица 1
Геометрическая характеристика моноколес

Параметры колес	Колесо широкохордное	Колесо второй ступени КНД
Высота лопатки H_{\max} , мм	139,864	101,858
Толщина S_{\max} верхнего сечения нижнего сечения, мм	2,626 4,531	2,361 4,684
Хорда L_{\max} верхнего сечения нижнего сечения, мм	102,634 48,859	70,444 64,838
R_{\min} входной кромки выходной кромки	0,151 0,15	0,363 0,373
R_{\max} входной кромки выходной кромки, мм	0,155 0,187	0,78 0,762
Шероховатость, Ra мкм	$0,4\sqrt{\quad}$	$0,4\sqrt{\quad}$
Точность, мм	не > 0,15	не > 0,06

Технологический процесс изготовления моноколес сложен и представляет собой цепочку технологических операций постепенного приближения контура заготовки к профилю готового колеса. Формообразование осевых моноколес с заданной точностью и качеством осуществляли поэтапно, выполняя последовательно черновую, получистовую и чистовую обработки. Черновые операции выполняли на 3-х координатном станке модели MA-655 с пультом НЗЗ. Для обработки моноколес на получистовых и чистовых операциях применяли современные высокоскоростные пяти-координатные станки швейцарской фирмы «LIECHTI»-TURBOBLISK 1500 с ЧПУ Sinumerik 840D.

При подготовке производственного процесса выполнялись компьютерные модели моноколес для их дальнейшей проработки в имеющихся программах САПР (рис. 3 и 4).

Заготовка широкохордного моноколеса (рис. 5) представляет собой предварительно обработанный на токарном станке диск с профильными торцовыми поверхностями, которые повторяют профиль входной и выходной кромок лопатки с гарантированным припуском 1,2 – 1,5 мм.

При черновом фрезеровании межлопаточного пространства широкохордного моноколеса за счет

оптимизации режимов резания и расположения заготовки обеспечивалась максимальная производительность обработки.

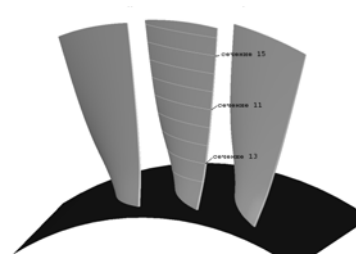


Рис. 3. Модель сектора осевого моноколеса

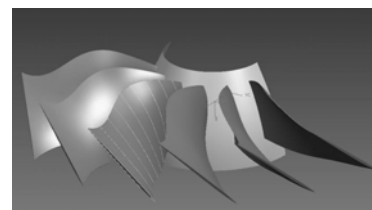


Рис. 4. Модель сектора широкохордного моноколеса

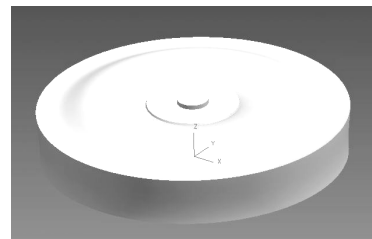


Рис. 5. Заготовка широкохордного моноколеса

Скорость резания при этом $V_{рез.} = 9 - 17,5$ м/мин.; подача на зуб $S_z = 0,013 - 0,016$ мм. При выполнении данной операции важным является обеспечение равномерного припуска как по поверхности пера лопатки, так и по ступице для последующего получистового и чистового фрезерования.

Черновое фрезерование межлопаточного пространства осуществлялось за две операции. На первой операции производилась выборка металла заготовки между лопатками сначала с одной стороны по схеме послойного фрезерования с оставлением припуска по профилю пера лопатки 1,2 мм и 1 мм по ступице (рис. 6).

На второй черновой операции заготовка переворачивалась в том же приспособлении и производилась выборка металла межлопаточного пространства с другой стороны по предыдущей схеме (рис. 7).

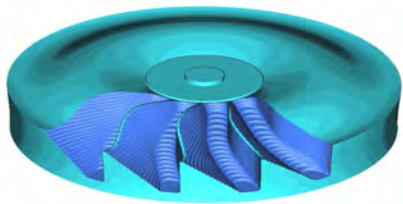


Рис. 6. Черновая обработка моноколеса на первой операции

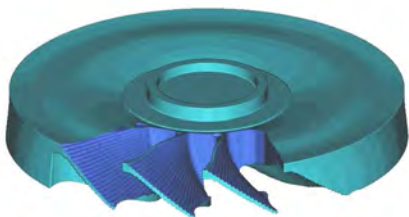


Рис. 7. Черновая обработка моноколеса на второй операции

После послойного фрезерования с двух сторон для окончательного выравнивания припуска по профилю пера лопатки применяли построчную обработку концевой сферической фрезой, материал P18. Режимы резания: $V_{рез.} = 12,5$ м/мин, подача на зуб $S_z = 0,03$ мм.

Черновая обработка осевого моноколеса проводилась по аналогичной схеме за две установки. Ступица колеса представляет собой усеченный конус. На первой операции заготовку устанавливали на поворотное приспособление вершиной конуса ступицы вниз. Выборку металла заготовки между лопатками производили с одной стороны по схеме послойного фрезерования с оставлением припуска по профилю пера лопатки 1,2 и 1 мм по ступице (рис. 8).

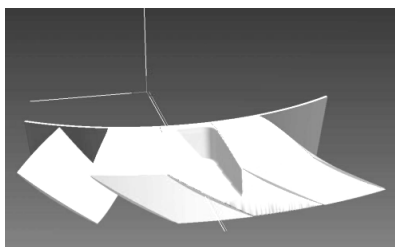


Рис. 8. Черновая обработка моноколеса с одной стороны

Черновая обработка с каждой стороны включала схему послойной обработки с расстоянием между слоями 3 мм:

- первый переход: фреза диаметром 25 мм, R4, $Z = 6$, $V = 22$ м/мин, $F_z = 0,023$ мм/зуб, P12Ф4К5;
- второй переход: фреза диаметром 20 мм, R3, $Z = 6$, $V = 21$ м/мин, $F_z = 0,025$ мм/зуб, P12Ф4К5;
- третий переход: фреза диаметром 16 мм, R2, $Z = 4$, $V = 12$ м/мин, $F_z = 0,031$ мм/зуб, P12Ф4К5;
- четвертый переход: фреза диаметром 12 мм, R2, $Z = 4$, $V = 12$ м/мин, $F_z = 0,031$ мм/зуб, P12Ф4К5;
- пятый переход: фреза диаметром 20 мм, R10, $Z = 6$, $V = 20$ м/мин, $F_z = 0,031$ мм/зуб, P12Ф4К5.

Обработка осуществлялась методом «зигзаг» с оставлением необходимого припуска по профилю спинки лопатки для его выравнивания. После завершения цикла обработки одного межлопаточного пространства делительный диск приспособления вместе с заготовкой поворачивался на шаг следующей лопатки и цикл обработки повторялся снова (рис. 9).

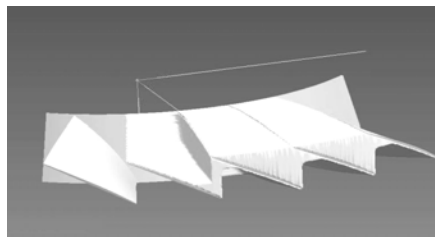


Рис. 9. Черновая обработка моноколеса с другой стороны

Черновое фрезерование, выполненное по указанным схемам, обеспечивает максимальную производительность по съему металла, снижает трудоемкость обработки на последующем чистовом фрезеровании на высокоскоростном оборудовании и делает его более экономичным.

После черновой обработки межлопаточного пространства с двух сторон остается перегородка (рис. 9). Она получается в результате теневой зоны при обработке межлопаточного пространства. Эта перегородка срезалась дисковой фрезой диаметром 300 мм и шириной 14 мм на универсально-фрезерном станке. Фреза была подобрана таким образом, что обеспечивала гарантированное расстояние до наиболее выступающих точек профиля лопатки. Для анализа процесса резания и определения углов установки заготовки в приспособлении было

выполнено моделирование операции прорезки, на основании чего спроектирована и изготовлена технологическая оснастка (рис. 10). Продольная подача фрезы на станке осуществлялась вручную, число оборотов фрезы $n = 9$ об/мин.

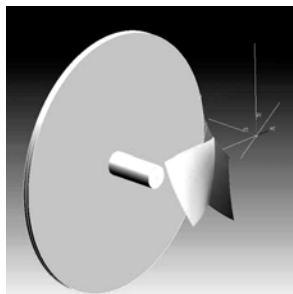


Рис. 10. Модель прорезки перегородки дисковой фрезой

После операции прорезки заготовку направляют на термостабилизацию. После термообработки моноколеса проходили полустовое и чистовое фрезерование на высокоскоростном фрезерном станке фирмы «LIECHTI» – TURBOBLISK 1005. Эта обработка позволяет получить качественно новые точностные параметры обрабатываемых поверхностей и шероховатость в диапазоне $Ra = 0,25 \dots 0,4$ мкм.

Используя преимущества высокоскоростного фрезерования, удалось решить многие сложные технологические вопросы. Для этого, используя преимущества высокоскоростного фрезерования, была разработана новая технология формирования пера лопаток.

Этап полустового и чистового фрезерования на станке TURBOBLISK 1500 (рис. 11) выполнялся в несколько переходов. 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 – 18000 об/мин. Максимальный диаметр заготовки – 1000 мм. Скорость приводов: «X», «Y», «Z» – 30000 мм/мин; «B» – 18000 град/мин., «A» – 25200 град/мин.

Основная сложность при чистовом фрезеровании пера лопаток моноколес состоит в том, что после предварительной обработки они имеют тонкостен-

ную форму и относительно невысокую жесткость в поперечном направлении. Разработанная технология обработки на основе преимуществ высокоскоростного фрезерования позволила значительно снизить возникающие упругие деформации лопаток.



Рис. 11. Общий вид 5-ти координатного станка фирмы «LIECHTI» TURBOBLISK 1500

Полустовое фрезерование межлопаточного пространства и лопаток осуществляли до условных технологических границ, которые устанавливали, исходя из максимальной высоты обработки (рис. 12).

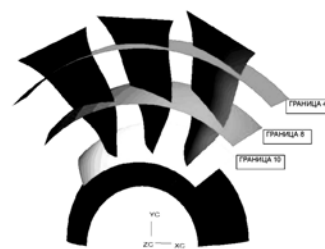


Рис. 12. Модель колеса с технологическими границами по высоте лопатки

По высоте лопаток формировались уровни (с 1 по 18) последовательного фрезерования. Для этого использовали два типа фрез:

- цилиндрические, которые снимают максимальный оставленный припуск по перу лопаток и по ступице колеса;
- конические, которые выравнивают припуск по лопатке и по ступице колеса до 0,7 мм.

Черновое фрезерование осуществляли по следующей схеме:

1. Прорезка межлопаточного пространства по 18-ти уровням цилиндрической фрезой с зубом за центр, диаметр 16 мм; $R = 0,5$ мм; $Z = 4$; $V_{рез} = 30$ м/мин; $Fz = 0,06$ мм.

2. Подчистка лопаток и ступицы до 0,7 мм по профилю конической фрезой $R = 5$ мм; угол конуса – 5° ; $Z = 4$; $V_{рез} = 70$ м/мин; $Fz = 0,06$ мм.

Между черновым и чистовым фрезерованием осуществляют термостабилизацию. После термообработки на получистовом фрезеровании использовали сферические угловые фрезы с параметрами: $R = 5$ мм; угол конуса – 5° ; $Z = 4$; $V_{рез} = 70$ м/мин; $Fz = 0,06$ мм. Лопатку обрабатывали 250-тью спиральными проходами, ступицу – 70-тью проходами. Оставляемый припуск по лопатке и по ступице – 0,05 мм. Для придания лопатке необходимой дополнительной жесткости при получистовом и чистовом фрезеровании межлопаточное пространство заполнялось специальной демпфирующей массой, которая выполняла еще и функции твердой СОЖ.

Чистовое фрезерование состоит из следующих проходов:

- фрезерование поверхностей сопряжения в корневом участке лопатки с припуском 0,8 мм по профилю пера и 0,5 мм по ступице;
- фрезерование пера лопатки с припуском 0,2 мм по профилю и 0,7 мм по ступице;
- фрезерование ступицы с припуском 0,2 мм и профиль пера с припуском 0,3 мм;
- финишное фрезерование лопатки и ступицы с нулевым припуском.

Все проходы выполнялись коническими фрезами со сферическим зубом. Режимы резания: скорость резания $V_{рез} = 300$ м/мин., подача на зуб $Sz = 0,06$ мм.

Финишное фрезерование прикорневого участка лопатки выполняли конической фрезой со сферическим зубом с режимами резания: скорость резания $V_{рез} = 240$ м/мин., подача на зуб $Sz = 0,04$ мм. Стойкость конических фрез – 1,5–3 часа. Основными критериями для определения стойкости фрез при финишном высокоскоростном фрезеровании моноколес явились требуемые точность и шероховатость обработанных поверхностей.

Формообразование лопаток осевых моноколес на чистовых переходах осуществлялось методом спирального высокоскоростного фрезерования, в соответствии с которым профиль лопатки образовывался

путем многопроходного огибания фрезой с постоянным перемещением по высоте лопатки (рис. 13).

В процессе фрезерования непрерывно осуществлялся точечный контакт фрезы и профиля лопатки. Количество проходов устанавливали, исходя из требуемой шероховатости обработанной поверхности лопатки. Режимы резания: $V_{рез} = 65–140$ м/мин., подача на зуб $Sz = 0,011–0,09$ мм.

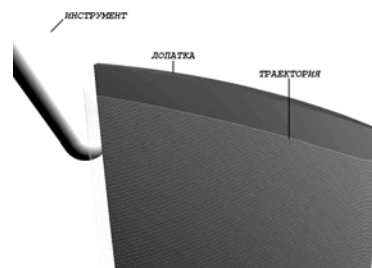


Рис. 13. Формообразование пера лопатки моноколеса спиральным высокоскоростным фрезерованием

Расчет количества чистовых проходов рассчитывался, исходя из конструкторских требований по точности и шероховатости поверхности лопаток моноколеса. При чистовом фрезеровании осевого моноколеса использовали сферические угловые фрезы с параметрами: $R = 5$ мм; угол конуса – 5° ; $Z = 6$; $V_{рез} = 300$ м/мин; $Fz = 0,06$ мм. Лопатку обрабатывали 527-ью спиральными проходами, а ступицу – 150-тью проходами начисто (рис. 14).

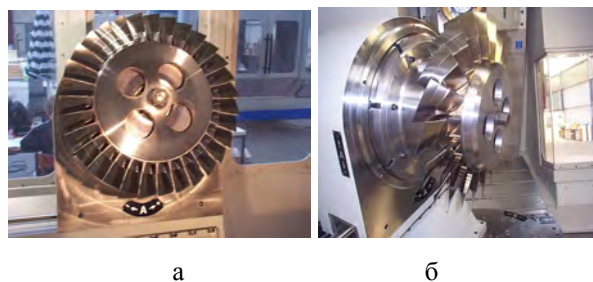


Рис. 14. Осевое колесо компрессора в зоне обработки: а – вид спереди; б – вид сбоку

Этапы получистовой и чистовой обработки осевого моноколеса показаны на рис. 15.

При фрезеровании профиля лопаток осевого моноколеса на станке «TURBOBLISK 1005» обеспечивается плавность обработки поверхностей спинки и корыта, входных и выходных кромок пера лопаток,

прикорневой поверхности пера и поверхности ступицы. На каждом уровне выполняли построчное фрезерование межлопаточного пространства.

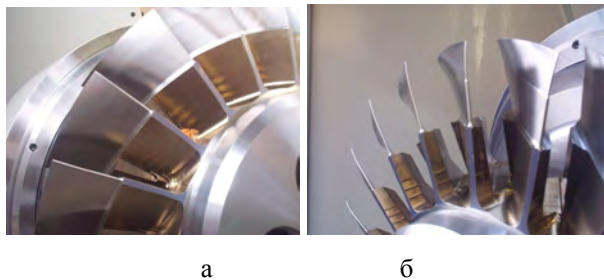


Рис. 15. Лопатки осевого колеса компрессора после финишного высокоскоростного фрезерования: а – лопатки со стороны спинки; б – лопатки со стороны выходных кромок

Для обработки межлопаточного пространства применялись цилиндрические фрезы. Стойкость цилиндрических фрез – от 3 до 5 часов. Вылет фрез из патрона определялся глубиной расположения уровня фрезерования относительно максимального диаметра периферии лопаток.

При финишном фрезеровании ступицы осевого моноколеса траекторию перемещения фрезы задавали таким образом, чтобы исключить зарезание профиля пера смежных лопаток (рис. 16).

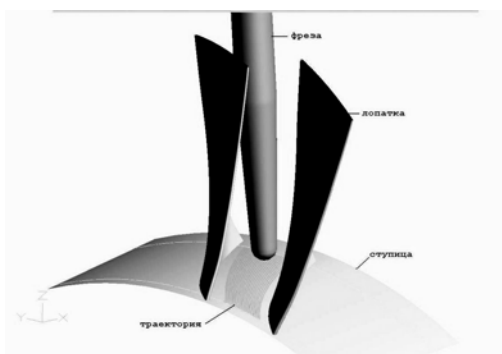


Рис. 16. Моделирование финишного высокоскоростного фрезерования ступицы осевого моноколеса

В процессе обработки, с целью исключения соударения инструмента с рядом расположенными лопатками и элементами приспособления, программно управляют вектором оси инструмента. Это достигается одновременной работой всех пяти координат станка. Управление по пяти координатам осуществ-

лялось с помощью специального программного обеспечения фирмы «LIECHTI» и комплекса программ на базе системы GeMMa-3D.

Особое внимание при подготовке процесса уделено предварительному инструментальному оснащению. Высокие точностные требования, предъявляемые к конструкции моноколес, обуславливают требования к инструменту для высокоскоростного фрезерования:

- максимальное отклонение формы радиуса . 0,01 мм;
- торцевое и радиальное биение0,01 мм;
- радиальное биение инструмента, установленного на оправку и в шпиндель, на длине 250 мм0,02 мм;
- фреза должна быть динамически отбалансирована (частота вращения шпинделя18000 об/мин).

Фрезы изготавливали из мелкозернистого твердого сплава: H10F SANDVIK, HB30F и HB44F BOLERIT, твердые сплавы SGS и PROTOTYPE, PX10 и PX12UF CARDURO. Для обеспечения требуемых показателей по биению инструмента на чистовых операциях применяли специальные гидрооправки фирмы SANDVIK (рис. 17).



Рис. 17. Инструмент и гидрооправки фирмы SANDVIK

Измерение геометрических параметров профиля пера лопаток осевых моноколес после фрезерования производили без снятия детали со станка с применением щупа RENISHAW, что исключает погрешности, возникающие при переустановке детали (рис. 18, 19), сокращает длительность контрольных операций, позволяет совершенствовать оборудование и приборы, используемые для измерения геометрии в цеховых условиях.

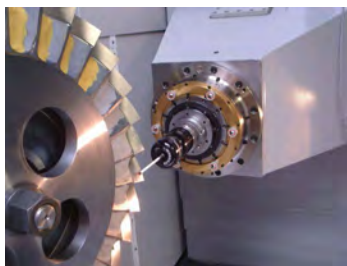


Рис. 18. Измерение профиля лопатки



Рис. 19. Измерительный щуп «RENISHAW»

Точность и шероховатость обработанных поверхностей лопаток и ступицы определяли после финишного высокоскоростного фрезерования. Точность соответствует техническим условиям на изготовление (рис. 20).

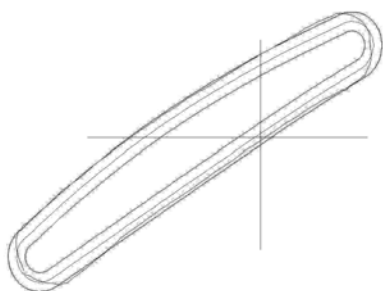


Рис. 20. Профилограмма поперечного сечения лопатки широкохордного моноколеса после чистового фрезерования

Шероховатость обработанных поверхностей пера лопаток после финишного высокоскоростного фрезерования находилась в диапазоне

$$R_{a,cp} = 0,346 \dots 0,410 \text{ мкм (табл. 2).}$$

Таблица 2

Шероховатость поверхностей после финишного высокоскоростного фрезерования

Усл.номер лопатки	Знач. шероховатости, R_a , мкм	Измерения			Среднее знач., R_a , мкм	
		Черт.	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
3			0,36	0,34	0,35	0,350
Ступица			0,25	0,25	0,25	0,25

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

Заключение

На основе проведенных исследований и полученных результатов после применения высокоскоростного фрезерования установлено, что выбранное направление с учетом современной тенденции развития обработки сложнопрофильных деталей ГТД высокоскоростным фрезерованием является перспективным и требует дальнейшего развития и совершенствования применяемых при обработке технологических решений.

Литература

1. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора: Монография. Ч. 1/ В.А. Богуслаев, Ф.М. Муравченко, П.Д. Жеманюк и др. – Запорожье: ОАО «Мотор-Сич», 2003. – 396 с.
2. Богуслаев А.В., Качан А.Я., Карась В.П. Высокоскоростное финишное фрезерование лопаток моноколес // Вестник двигателестроения. – 2002. – № 1. – С. 110-111.
3. Жеманюк П.Д., Мозговой В.Ф. Качан А.Я., Карась В.П. Формообразование сложнопрофильных поверхностей моноколес высокоскоростным фрезерованием // Газотурбинные технологии. – 2003. – № 5 (26). – С. 18-21.

Поступила в редакцию 1.06.2006

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