

УДК 621.452.3

**В. Ф. МОЗГОВОЙ, К. Б. БАЛУШОК, В. А. ПАНАСЕНКО, М. К. БИРУК***АО “Мотор Сич”, Запорожье, Украина*

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ МОНОКОЛЁС ГТД НА СТАНКАХ С ЧПУ

*Рассмотрен метод гидроабразивной резки, позволяющий сократить трудоёмкость предварительной обработки межлопаточного пространства осевых моноколёс ГТД. Предложенный метод по своим характеристикам позволил рассматривать обработку на гидроабразивном оборудовании как промежуточный этап общего технологического процесса, решающего задачу предварительных операций – съём большого объёма материала за максимально короткое время. Результаты экспериментальных работ и опыт применения метода гидроабразивной резки позволили добиться сокращения трудоёмкости со стабильным качеством и сделать процесс более производительным.*

**Ключевые слова:** моноколесо, станок с ЧПУ, гидрорезательная струя, повышенное давление, управляющая программа, стратегия обработки, приспособление, точность обработки, припуск, параметры, рабочая жидкость, фракция абразива, трудозатраты.

### Введение

Мировые производители авиадвигателей особое внимание уделяют снижению себестоимости выпускаемой продукции, минимизации непроизводительных затрат, внедрению современных инновационных технологий [1]. Современное производство авиационных двигателей ставит перед технологической службой всё более сложные наукоёмкие задачи, от успешного решения которых зависит конкурентоспособность выпускаемой авиационной техники. Применение в производстве первых установок с ЧПУ гидроабразивной резки вызвало технологический скачок и обеспечило небывалую до этого производительность при резке различных материалов и сплавов.

В числе современных технологий применяемых на АО “Мотор Сич” является технология 5-ти координатной гидроабразивной резки на черновых операциях обработки осевых моноколёс ГТД. Процесс гидроабразивной резки не является принципиально новым. Однако в условиях производства малых серий, отдельных деталей, либо для производства в сжатые сроки с минимальными затратами на оснащение инструментом и оснасткой, предлагаемый к рассмотрению метод приобретает особую актуальность.

Метод гидроабразивной резки с помощью высоконапорной струи воды с очень мелким абразивным материалом позволил получить результаты обработки ранее недостижимые другими известными методами. Поскольку в процессе обработки не выделяется тепло, данный метод подходит для обработки чувствительных к нагреванию сплавов, одновременно, исключающих любые структурные и фазовые изменения материала. Небольшая механическая нагрузка при гидроабразивной резке позволяет

исключить появление остаточных внутренних напряжений в материале, что положительно сказывается на последующей полустойкой и чистой обработке лопаток моноколёс.

Применительно к обработке моноколёс, производительность гидроабразивной резки позволила сократить трудоёмкость предварительных черновых операций на обрабатывающих центрах с ЧПУ, где ранее материал межлопаточного пространства удалялся методом послыного фрезерования.

Задача состояла в комплексном технологическом решении проблемы предварительной обработки моноколёс, путём замены ранее применяемого способа обработки на более производительный и безопасный - метод гидроабразивной резки на 5-ти координатном оборудовании с ЧПУ с целью получения максимальной производительности и с минимальными затратами.

### Цель работы

Рассмотреть существующие и предложить альтернативный метод обработки межлопаточного пространства моноколёс ГТД с целью получения максимальной производительности, сокращения трудоёмкости как при черновой, так и последующей чистой обработке моноколёс на станках с ЧПУ. Таким методом является метод гидроабразивной резки. Рассматривается способ автоматизации подготовки управляющих программ 5-ти координатной гидроабразивной резки, осуществление виртуального контроля управляющих программ с целью контроля отсутствия столкновений исполнительных механизмов, корректности основных и вспомогательных перемещений в рабочей зоне станка.

## Результаты экспериментальных исследований

При анализе предварительной обработки моноколёс предлагается метод, который не является стружкообразующим, а направлен на удаление цельного массива материала заготовки моноколеса. Этот материал является межлопаточным пространством. Для этого необходимо обеспечить соответствующие условия ориентации, базирования и закрепления заготовки на столе станка.

На примере обработки моноколёс 1-й и 2-й ступени вентилятора ГТД рассматриваются результаты предварительной обработки посредством гидроабразивной резки.



Рис. 1. Колесо вентилятора 1-й ступени

Осевое моноколесо вентилятора 1-й ступени (рис. 1) отличается высокой степенью сложности, обусловленной как сложнопрофильной поверхностью лопаток, высокими требованиями к их точности и шероховатости, так и трудностью обработки материала, из которого выполнены колёса. Это диктует особые требования по минимизации внутренних напряжений после предварительной обработки перед выполнением чистового фрезерования. Чистовая обработка выполняется методом спирального высокоскоростного фрезерования на 5-ти координатном станке.

Моноколесо выполнено из титанового сплава ВТ8-1 ОСТ190197-89 и характеризуется нежесткой конструкцией с неблагоприятным соотношением геометрии высоты лопатки - хорда лопатки (табл. 1).

Таблица 1  
Геометрическая характеристика моноколеса 1-й ступени КНД

Параметры колес	Колесо 2-й ступени КНД
Высота лопатки $H_{max}$	101,858
Толщина $S_{max}$ : верхнего сечения	2,361
нижнего сечения	4,684
Хорда $L_{max}$ : верхнего сечения	70,444
нижнего сечения	64,838

Технологический процесс формообразования профиля пера лопатки и поверхности ступицы начинается с черновой обработки межлопаточного пространства. Ранее применяемая на АО "Мотор Сич" технология предварительной обработки моноколёс заключалась в выполнении фрезерования на 3-х координатном станке с ЧПУ. Заготовка моноколеса представляла собой предварительно обработанный на токарном станке диск.

При черновом фрезеровании межлопаточного пространства была обеспечена максимальная на то время производительность обработки. Фрезерование осуществлялось концевыми фрезами из быстрорежущей стали и твёрдого сплава различного диаметра последовательно с двух сторон за две операции (рис. 2). При выполнении данных операций обеспечивался гарантированный припуск по кромкам пера лопатки и по ступице. Минимальный оставляемый припуск составлял 3 мм.

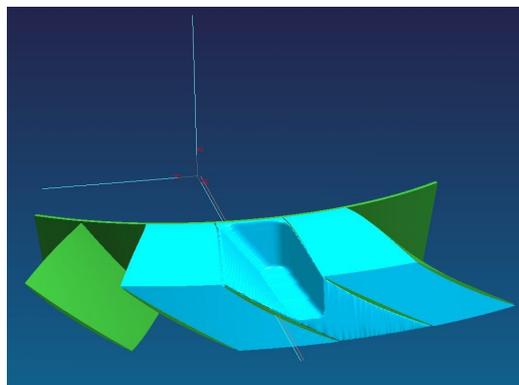


Рис. 2. Черновая обработка межлопаточного пространства с одной стороны

На второй черновой операции заготовка переворачивалась в том же приспособлении и производилась выборка металла межлопаточного пространства с другой стороны (рис. 3).

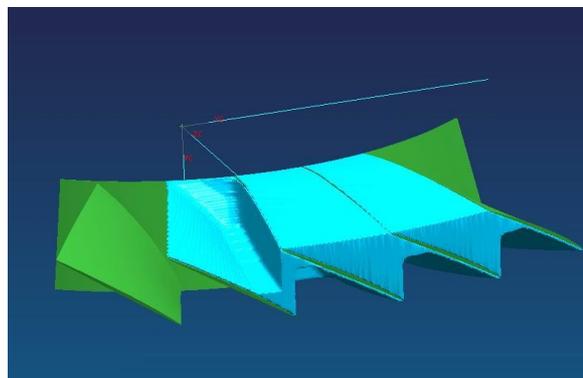


Рис. 3. Черновая обработка межлопаточного пространства с другой стороны

Для удаления оставшейся технологической перемычки предусматривалась операция, на которой

дисковой фрезой Ø300мм на универсальном станке оставшаяся перегородка срезалась. В таком состоянии заготовка поступала на дальнейшую получистовую и чистовую 5-ти координатную обработку на станке ТВ-1005 ЛЕСНТИ (рис. 4).

Существенным недостатком данной технологии являлась очень высокая трудоёмкость и наличие на деталях теневого и недообработанного зон, наличие фрезерной универсальной операции. Это обуславливало необходимость вводить на операциях с ЧПУ дополнительные технологические переходы для выравнивания припуска, что ещё больше увеличивало общую трудоёмкость обработки.

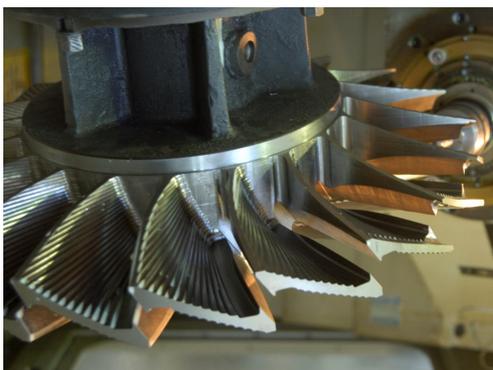


Рис. 4. Предварительно обработанная заготовка моноколеса перед чистовой обработкой на станке ТВ-1005 ЛЕСНТИ

Следующий этап в совершенствовании технологии обработки моноколёс заключался в применении модернизированных 5-ти координатных обрабатывающих центров с ЧПУ на базе станка ИС-800 [2], [оснащенных силовыми поворотными столами и системой УЧПУ Sinumerik-840D.

Применение модернизированных станков с поворотными столами позволило внедрить новую технологию, обеспечивающую оптимальную схему удаления материала межлопаточного пространства за счёт возможности поворота детали на станке по управляющей программе (рис. 5). Процесс обработки стал намного производительнее, в том числе, и за счёт применения на станках высокоскоростных шпинделей. Положительным стало то обстоятельство, что при данной схеме обработки были устранены теневые зоны. Благодаря этому обеспечивался равномерный оставляемый припуск по поверхности.

Схема обработки была принята в формате 3+2. Оставляемый припуск по профилю пера и ступице составлял 1,9мм. Объём снимаемого межлопаточного материала при этом способе значительно увеличился. Это положительным образом отразилось на снижении трудоёмкости последующей получистовой и чистовой обработки моноколёс на 5-ти координатном оборудовании с ЧПУ.



Рис. 5. Предварительная обработка межлопаточного пространства на станке с ЧПУ ИС-800 по схеме 3+2

Трудоёмкость черновой обработки моноколёс была снижена также за счёт применения современных фрез с механическим креплением твердосплавных пластин (рис. 6).



Рис. 6. Заготовка моноколеса после черновой обработки на станке ИС-800

Необходимо отметить, что, эксплуатируя несколько модернизированных станков с ЧПУ ИС-800 за счёт применения разработанной геометрической параметризации УП, удалось добиться унификации управляющих программ при передаче со станка на станок [3]. Управляющие программы обработки перестали зависеть от станочных констант и высоты приспособления при 3-х и 5-ти координатной обработке. Программное обеспечение для параметризации было разработано специалистами отдела программирования станков с ЧПУ УГТ и внедрено во всех цехах предприятия, где эксплуатируются модернизированные 5-ти координатные станки на базе модели ИС-800 с системой Sinumerik-840D [4].

Условия производства требовали новых решений, направленных на дальнейшее сокращение трудоёмкости обработки моноколёс. И в первую очередь – за счёт сокращения трудоёмкости предвари-

тельных операций обработки межлопаточного пространства, являющиеся наиболее трудоёмким этапом обработки. В качестве альтернативного метода существующей технологии специалистами УГТ был предложен метод гидроабразивной резки на гидроабразивном станке (рис. 7).



Рис. 7. Станок гидроабразивной резки EVODAN компании AQUARESE

В настоящее время технология резки материалов – вода с абразивом, является одним из наиболее эффективных, гибких, экологически чистым и энергосберегающим способов в производственной деятельности промышленного предприятия. Технология водоструйной обработки из области научных разработок прочно вошла в производственную область, и сегодня в мире наблюдается всё более увеличивающийся интерес к данному методу обработки и оборудованию.

На предприятии АО «Мотор Сич», понимая важность поставленной задачи, пошли по принципиально новому пути, рассматривая гидроабразивную резку применительно к многокоординатной обработке моноколёс из жаропрочных и титановых сплавов. Область интересов совпала с необходимостью сокращения трудоёмкости обработки межлопаточного пространства моноколёс ГТД, где требовалась 5-ти координатная обработка. Решение было найдено совместно с компанией AQUARESE (Франция), у которой был приобретён 5-ти координатный станок гидроабразивной резки EVODAN с системой ЧПУ Sinumerik.

Детальная технологическая подготовка производства и отладка всех составляющих элементов процесса гидроабразивной резки позволили выйти на качественно новый уровень производства.

Подготовка управляющих программ для гидроабразивного станка осуществлялась в среде прикладного программного обеспечения AQUARESE SOFT (рис. 8). Специализированный программный продукт позволяет генерировать управляющие программы обработки с учётом нескольких основных параметров [5]. Основные из них – давление и рас-

ход воды, размер фракции и расход абразива, диаметр и длина рабочего сопла, скорость подачи рабочей смеси, продольный угол опережения оси сопла.

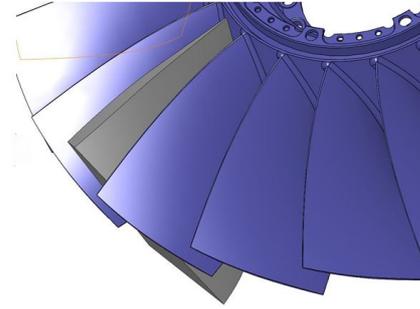


Рис. 8. Вырезаемый фрагмент моноколеса

Задание параметров осуществляется в SOFT, где технолог может виртуально создать весь процесс обработки.

Первые результаты обработки позволили сделать вывод о правильности выбранного направления. Существенное влияние на результаты работ оказывали ряд основных параметров процесса резания (рис. 9).

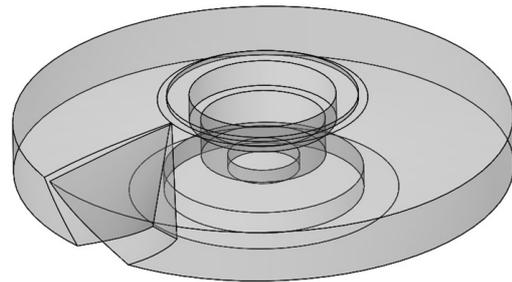


Рис. 9. Общий вид заготовки моноколеса с обработанным первым объектом

Задача технологов-программистов состояла в выборе оптимального соотношения между качеством и скоростью резания в заданном интервале времени. Имея в распоряжении входные параметры – фракция абразива, диаметр сопла, давление и расход воды, с помощью программного обеспечения и опираясь на полученные опытные результаты, удалось найти оптимальный вариант для решения поставленной задачи.

Производительность обработки была повышена в несколько раз, что было главной целью проведения опытных и экспериментальных работ предшествующих внедрению в производство прогрессивного метода (рис. 10).

По сравнению с ранее применяемыми, данный метод имел и экономическое преимущество, выразившееся в высвобождении 5-ти координатных фрезерных обрабатывающих центров с ЧПУ от необхо-

димости черновой обработки и применение вместо них специализированного станка. Высвобожденное станочное время фрезерных центров было эффективно использовано для обработки других деталей.



Рис. 10. Обработка детали на станке AQUARESE

Эффективность применения нового метода обработки колеса вентилятора 1-й ступени была подтверждена на практике (табл. 2). Опыт работы на гидроабразивном станке был применён и при обработке других деталей типа моноколёс.

Внедрённая технология обработки потребовала пересмотра ранее разработанной технологии изготовления осевых моноколёс при полуступичной обработке.

Таблица 2

Сравнительная характеристика разных методов обработки

	Метод фрезерования	Метод ГАО
Количество лопаток	19	19
Припуск на чистовую обработку (мм min)	лопатка – 1,9 ступица – 1,9	до 5÷7 мм
Тмаш (мин)	оп.80 - 203мин оп.90 - 200мин Всего: 403мин	50 ÷ 55
Общее время черновой обработки колеса	7567 мин (127ч)	1045 мин (18ч)
Сокращение трудоёмкости	-	109 часов

Для этого, взамен существующим фрезерным переходам межлопаточного пространства, были разработаны новые - для выравнивания припуска после гидроабразивной резки (рис. 11). Выравнивание припуска выполнялось, как и по прежней техноло-

гии, на 5-ти координатных станках моделей C50U Hermle и ТВ-1005 ЛЕСНТИ.

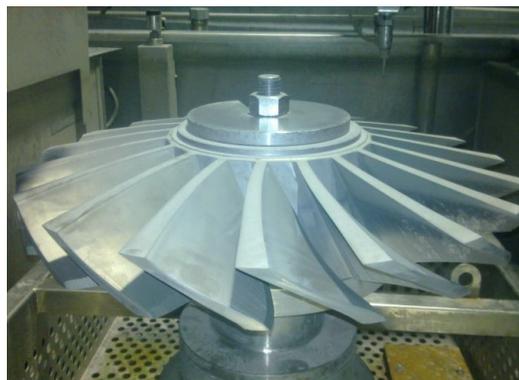


Рис. 11. Обработанное на гидроабразивном станке моноколесо

Разработанные новые фрезерные переходы по выравниванию припуска отличались от предыдущих переходов меньшей трудоёмкостью. Это стало возможным благодаря тому, что предварительно был вырезан большой объём материала на гидроабразивном станке.

Дальнейшая чистовая обработка лопаток и ступицы моноколеса выполнялась по отработанной технологии с применением средств автоматизации и переменной 3D-коррекции на станке C50U Hermle (рис. 12).



Рис. 12. Чистовая обработка моноколеса на 5-ти координатном станке HERMLE C50U

## Заключение

Внедрение в производство новых инновационных методов обработки деталей авиационных двигателей рассматривается как передовой производственный опыт, направленный на совершенствование технологий с одновременным сокращением трудоёмкости. Двигаясь в направлении совершенствования изготовления деталей, прикладываемые усилия направлены на повышение надёжности и безотказности работы авиационных двигателей выпускае-

мых АО "Мотор Сич". Приобретённый опыт эксплуатации новейшего оборудования с ЧПУ позволит обеспечить планомерное наращивание производственного потенциала предприятия.

### Литература

1. Панасенко, В. А. АО "Мотор Сич": интеллектуальный и производственный потенциал - гарант успеха предприятия [Text] / В. А. Панасенко // *Промышленность в Фокусе*. – 2013. – Т. 5, № 9. – С. 49-51.

2. Бурма, А. Ф. Изготовление, модернизация и ремонт обрабатывающих центров, станков с ЧПУ и другого оборудования на АО "Мотор Сич" [Текст] / А. Ф. Бурма // *Промышленность в Фокусе*.

– 2013. – Т. 5, № 9. – С. 30-37.

3. Унификация управляющих программ обработки деталей ГТД на пятикоординатных станках с ЧПУ [Text] / В. Ф. Мозговой, В. А. Панасенко, К. Б. Балушок, М. К. Бирук / *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2014. – № 8(115). – С. 6-11.

4. Пат. UA 106853 C2 B23C 3/18 (2006.1) Способ обработки нежестких консольно закреплённых деталей с применением переменной 3D-коррекции инструмента на станках с ЧПУ [Текст] / В. А. Панасенко, И. И. Котов; заявитель и патентообладатель АО "Мотор Сич". – № 106853; заявл. 25.10.13; опубл. 11.03.2014, Бюл. № 23. – 7 с. : ил.

5. Руководство по эксплуатации станка AQUARESE. Инструкция пользователя [Текст]. – 2014. – 70 с.

Поступила в редакцию 12.05.2015, рассмотрена на редколлегии 19.06.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. каф. А. Я. Качан, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

### СУЧАСНІ МЕТОДИ ПОПЕРЕДНЬОЇ ОБРОБКИ МОНОКОЛЕС ГТД НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК

*В. Ф. Мозговой, К. Б. Балушок, В. О. Панасенко, М. К. Бирук*

Наведено приклад новітньої технології попередньої обробки моноколес ГТД, що відрізняється застосуванням гідрорізання на гідроабразивному 5-ти координатному верстаті для видалення метала міжлопаточного простору моноколес. Технологія забезпечує підвищений рівень продуктивності і якості попередньої обробки моноколес. Розглянуто засоби підготовки та використання досягнутих у випробуваннях різноманітних методів підготовки керуючих програм. Порівняно результати трудовитрат при звичайній технології обробки відносно запропонованих. Досягнуті результати при обробці деталей методом гідрорізання були впроваджені у виробництво з метою скорочення затрат і зменшення машинного часу, таким чином, забезпечуючи конкурентоздатність на світовому ринку авіадвигунобудівників.

**Ключові слова:** моноколесо, верстат з ЧПУ, гідрорізанна струя, підвищений тиск, керуюча програма, стратегія обробки, пристосування, точність обробки, припуск, параметри, робоча рідина, фракція абразиву, трудовитрати.

### MODERN METHODES OF PRELIMINARY PROCESSING MONOWHEELS OF TURBINE ENGINES ON MACHIN CNC

*V. F. Mozgovej, K. B. Baluchok, V. A. Panasenko, M. K. Biruk*

The example of innovative technology of preliminary processing of monowheels of engine different by application is resulted are sharp on the hydroabrasive 5 coordinate machine CNC for metal removal spaces of monowheels. Technology the raised level qualities processings of monowheels. Ways of preparation and use of the reached results in tests of various methods of preparation managing directors programs are considered. Comparative results of expenditures of labor at usual technology of processing and at the offered. The reached results at processing of details by a method have been introduced in manufacture for the purpose of reduction expenses and reduction time, thus providing competitiveness of modern providing competitiveness in the world market engines.

**Key words:** a monowheel, a machine CNC, hydroabrasive stream, an elevated pressure, the operating program, processing strategy, the adaptation, accuracy of processing, parameters, works a liquid, fraction of sand, an expenditure of labor.

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

**Балушок Константин Брониславович** – канд. техн. наук, заместитель гл. технолога, АО "Мотор Сич", 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.

**Бирук Михаил Карпович** – инженер-программист УГТ, АО "Мотор Сич", Запорожье, Украина, e-mail: ugt@motorsich.com.