

УДК 621.452.3

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

ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОБРАБОТКИ ДИСКОВ ГТД ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ НА ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРАХ

Рассмотрена обработка сложнофасонных поверхностей дисков ГТД из жаропрочных сплавов на современном металлообрабатывающем оборудовании с применением достижений инструментального производства. Описаны примеры применения 3-х координатных станков с ЧПУ для обработки деталей авиационных двигателей. На основе производственных испытаний предлагается решение технологических задач при обработке типовых мест дисков ГТД на высокоскоростных фрезерных центрах. При этом особое внимание уделено комплексной обработке и оптимизации режимов резания для деталей из труднообрабатываемых сплавов. Для проектирования фрезерной обработки рассмотрена система геометрического моделирования и программирования GeMma-3D, позволившая существенно сократить сроки подготовки управляющих программ.

диск, жаропрочный сплав, высокоскоростной фрезерный центр, твердосплавные пластины

Введение

Высокотехнологичное производство деталей ГТД обуславливает принятие и реализацию новых технологических решений для достижения результата с максимальной эффективностью. Одним из перспективных технологических решений является использование современного высокопроизводительного оборудования и режущего инструмента, оснащённого сменными твердосплавными пластинами с высокими режущими свойствами. На ОАО «Мотор Сич» активно внедряются высокопроизводительное оборудование и современный режущий инструмент.

Цель работы. Практическое решение технологических задач при обработке дисков ГТД из жаропрочных сплавов на высокоскоростных фрезерных центрах с ЧПУ. Определение оптимальных режимов комплексной обработки дисков из труднообрабатываемых сплавов.

Содержание и результаты исследования

Обработка дисков ГТД выполняется с применением 3-х координатных обрабатывающих центров с ЧПУ. В условиях современного производства кон-

турное фрезерование на станках с ЧПУ является одним из распространённых операций механической обработки. Применение числового программного управления и его современные возможности позволяют оптимизировать процесс резания методом гибкого регулирования подачи и скорости резания в процессе работы станка.

Обработка дисков из жаропрочных сплавов на фрезерных обрабатывающих центрах с ЧПУ связана с низкой обрабатываемостью материала, что обусловлено их высокими физико-механическими свойствами. Жаропрочные сплавы можно классифицировать в зависимости от сочетания их физико-механических свойств: высокая твёрдость и прочность материалов; низкая теплопроводность в сочетании с высокой прочностью. Стружкообразование при обработке жаропрочных сплавов сопровождается интенсивными упругими, пластическими деформациями и тепловыми явлениями.

Происходит также и интенсивное трение с инструментальным материалом, которое одновременно с большим давлением и высокой температурой в зоне контакта воздействует на режущую кромку инструмента. Тепловые потоки в зоне контакта вызывают

возникновение градиента напряжений и температур, что инициирует протекание диффузии, адгезии, электрических и магнитных явлений. Эти явления оказывают существенное влияние на работоспособность режущего инструмента, и в первую очередь, на его стойкость.

Стойкость инструмента неразрывно связана с качеством обработанной поверхности детали.

Высокие требования к обеспечению жёсткости системы СПИД обуславливают тщательный подход к выбору оборудования и инструмента. Технологический процесс комплексной фрезерной обработки диска (рис. 1) включает операции сверления и контурного фрезерования ступицы колеса.

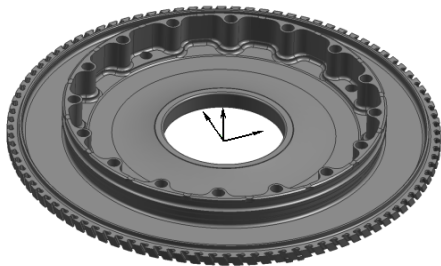


Рис. 1. Математическая модель диска КВД заднего лабиринта ГТД

Диск КВД выполнен из жаропрочного сплава ЭИ698-ВД (ХН73МБТЮ-ВБ). По сравнению с таким известным сплавом как ЭИ-437Б (ХН77ТЮР-ВД) рассматриваемый сплав является более прочным, а коэффициент обрабатываемости его ниже указанного сплава. Так, если при точении сплава ЭИ-437Б пластинкой ВК10ХОМ коэффициент обрабатываемости по данным НИАТа составляет $K_v = 0,32$, то для сплава ЭИ698-ВД он составляет $K_v = 0,14$.

Фрезерование ступицы дисков осуществлялось на станке MA-655 фрезами из быстрорежущей стали P18. Стойкость фрез при этом составляла $T_{ст} = 10...15$ мин. Для обеспечения высокой стойкости инструмента и стабильности процесса резания, а также соблюдения всех технологических и конструкторских параметров при одновременном сокращении цикла обработки необходимо было вы-

брать оптимальный режущий материал. Обработка диска проводилась на 3-х координатном фрезерном центре фирмы HURON K2X20 со стойкой Sinumerik-840D (рис. 2). Конструкция станка содержит фиксированный портал, расположенный над станиной, и подвижный стол (ось X) размерами 120031000 мм. Выдвигающийся суппорт (ось Z) имеет встроенный электрошпиндель. Станок позволяет вести высокопроизводительную обработку в диапазоне от 100 до 18000 об/мин с обеспечением точных размеров, благодаря своей жёсткой конструкции. Магазин инструментов имеет 20 позиций, что расширяет технологические возможности станка. Инструмент устанавливается в базовые модули HSK-63A. После обработки на станке K2X20 фрезой из сплава H10F (SANDVIK) шероховатость и точность обработанных поверхностей диска не соответствовали требованиям чертежа.



Рис. 2. Фрезерный 3-х координатный обрабатывающий центр K2X20

По результатам экспериментальных работ был подобран режущий материал для чернового и чистового фрезерования. Черновое фрезерование выполнялось 2-х зубой фрезой диаметром 20 мм Sogo Mil 390 R390-020B20-11M (SANDVIK) (рис. 3) с механическим креплением твердосплавных пластин R390-11T316E-MM (рис. 4). Материал пластин – твёрдый сплав GC2015 и GC2030.

Обработка детали по высоте проводилась за пять уровней на режимах: $n = 380$ об/мин и $F = 50$ мм/мин.

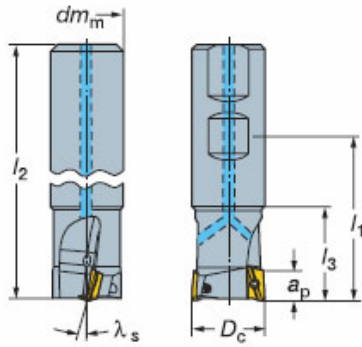


Рис. 3. Концевая фреза Coro Mill 390

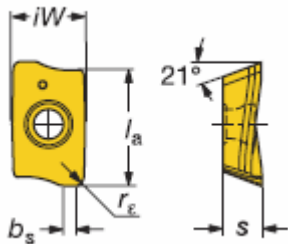


Рис. 4. Пластины для фрез Coro Mil 390

При этом оставлялся припуск на сторону – 0,2 мм, и по дну – 0,5 мм. За счёт применения указанных режущих пластин улучшилось качество предварительно обработанной поверхности, а машинное время чернового фрезерования снизилось в 2 раза относительно существующего при значительном увеличении стойкости инструмента.

В условиях производства при фрезеровании дисков из жаропрочного сплава также была испытана цельная твердосплавная фреза диаметром 20 мм EC200B38-4C20R1.5 фирмы ISCAR (рис. 5). Фреза выполнена из твёрдого сплава IC908. Геометрия фрезы: $z = 4$, длина режущей части 38 мм, общая длина 92 мм, угол винтовой линии 45° , $R = 1,5$ мм. Обработка велась на режимах: $n = 300$ об/мин, $t = 3$ мм, $F = 60$ мм/мин. Стойкость фрезы составила 210 мин. Машинное время обработки детали сократилось почти в 3 раза. Таким образом, одна фреза обрабатывала 2 – 3 детали.

Для чистового фрезерования была испытана и применена 5-ти зубая концевая твердосплавная фреза диаметром 15 мм и радиусом при зубе 2,5 мм из твёрдого сплава KFC K44 EF (KONRAD CAR-

BIDE). Физико-механические свойства твёрдого сплава приведены в табл. 1. Фреза была изготовлена на 5-ти координатном заточном станке фирмы JUNGGER.

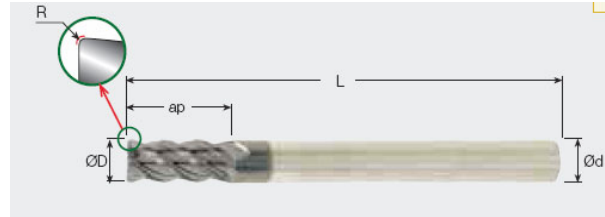


Рис. 5. Фреза EC200B38-4C20R1.5 фирмы ISCAR

Таблица 1
Физико-механические свойства твёрдого сплава
KFC K44 EF (KONRAD CARBIDE)

Процент содержания кобальта, Co, %	Твёрдость		Предел прочности при изгибе, МПа	Размер зерна, мкм
	HV, МПа	HRA		
12,0	1680	92,5	≥ 4000	0,5

Чистовое фрезерование проводилось по контуру детали с использованием коррекции на радиус инструмента (рис. 6). Обработка проводилась с подачей СОТС. Повышение производительности процесса резания было достигнуто за счёт рационального использования возможностей применяемых концевых фрез, назначением соответствующих подач для конкретных участков обрабатываемой поверхности, что обеспечило постоянную величину напряжений в режущем инструменте, погрешность обработки и другие заданные условия. Используя возможности программирования стойки Sinumerik-840D, осуществлялся автоматический пересчёт подачи при круговой интерполяции для центра инструмента, выдерживая постоянной рабочую подачу на режущей кромке фрезы. Благодаря этому, существенно повысилась точность и производительность механической обработки, стабильность геометрических размеров, что положительно отразилось на качестве сборки изделия. Снизилось влияние человеческого фактора в сложном технологическом процессе изго-

товления дорогостоящих и ответственных деталей ГТД.

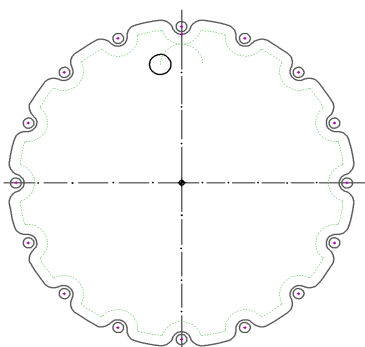
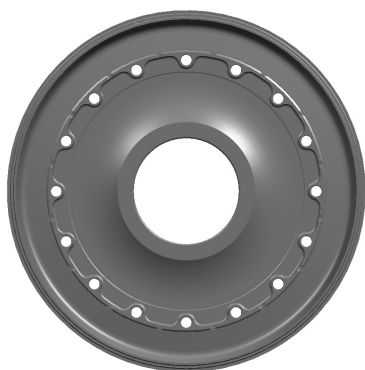


Рис. 6. Проектирование фрезерования в системе GeMMa-3D

При проектировании фрезерной обработки использовалась система геометрического моделирования и программирования GeMMa-3D, которая позволила существенно сократить сроки подготовки управляющих программ.

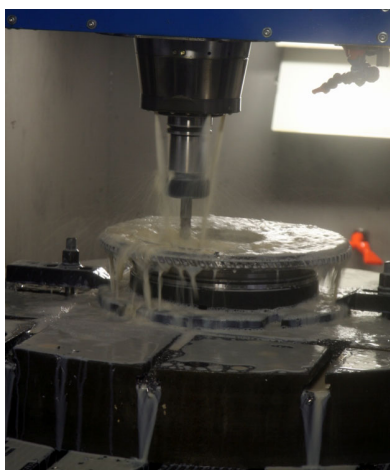


Рис. 7. Чистовое фрезерование диска на станке K2X20

При чистовом фрезеровании (рис. 7) наилучшие результаты были достигнуты при следующих режи-

мах обработки: $V = 17$ м/мин; $F = 30$ мм/мин; $n = 360$ об/мин.

Полученные результаты исследования процесса обработки жаропрочных сплавов подтвердили активное проявление адгезионных процессов по задней и передней поверхности режущих пластин. Эти процессы оказывают наибольшее влияние на фактическую стойкость режущего инструмента. Результаты сравнительных испытаний стойкости инструмента из различных материалов приведены в табл. 2.

Таблица 2
Результаты сравнительных испытаний фрез из различных материалов

Наименование параметра	Марка твёрдого сплава		
	P18	H10F (SANDVIK)	AF K44 EF (KONRAD CARBID)
Качество обработанной поверхности, Ra , мкм	1–1,6	0,7–0,9	0,6–0,7
Износ режущей кромки, мм	0,3–0,6	0,1–0,3	0,1–0,2
Стойкость T , мин	15–20	10–15	120–160

Главными оценивающими параметрами инструмента явились степень износостойкости и способность фрезы обеспечивать требуемые параметры обработки. При этом критерием отбора явилась устойчивость процесса резания, стабильный стружкоотвод и высокое качество поверхности (рис. 8).



Рис. 8. Диски, обработанные фрезами из сплава AF K44 EF

Наряду с рассмотренным станком для выполнения фрезерных и сверлильных операций успешно применяется 3-х координатный обрабатывающий центр PICOMAX-95 с системой управления HEIDENHAIN iTNC 530 (рис. 9).

Станок снабжён моторшпинделем и отличается повышенной жёсткостью станины, высокими скоростями перемещений исполнительных органов и высокой точностью позиционирования шпинделя. Размеры стола станка 16003550 мм позволяют обрабатывать крупногабаритные детали. Конструкция станка имеет расширенную рабочую зону по оси «Z», что даёт возможность устанавливать и обрабатывать детали высотой до 600 мм.



Рис. 9. Фрезерный 3-х координатный обрабатывающий центр PICOMAX-95

На станке установлен моторшпиндель с диапазоном частоты вращения $n = 50-20000$ об/мин (рис. 10). Магазин инструментов рассчитан на 46 инструментов с базовыми держателями по HSK-63A. Высокие скорости холостых перемещений исполнительных механизмов станка позволили значительно сократить машинное время обработки.

Ранее сверление отверстий в дисках из жаропрочных сплавов представляло сложную технологическую задачу, обусловленную труднообрабатываемостью материала, необходимостью обеспечения точности взаимного расположения отверстий и требуемой шероховатости поверхности.

Погрешность взаимного расположения отверстий диаметром $10,35 + 0,07$ на диаметре 250 мм составляет 0,03 мм.

Сверление сквозных отверстий диаметром 10,35 мм и глубиной 20 мм в ступице диска из титанового сплава BT8 заключается в методе постепенного приближения к размерам готового отверстия. Технологический процесс образования отверстий включает следующие технологические переходы:

- центрирование;
- сверление отверстие сверлом диаметром 9,5 мм с подачей $F = 6 - 10$ мм/мин и $n = 180$ об/мин;
- расфрезеровка отверстий фрезой диаметром 10 мм для придания перпендикулярности оси отверстия;
- окончательное растачивание отверстий, используя последовательно две расточные головки диаметром 10,15 мм и диаметром 10,35 мм фирмы SANDVIK (рис. 11).



Рис. 10. Моторшпиндель станка PICOMAX-95



Рис. 11. Высокоточная расточная оснастка фирмы SANDVIK

Микрорезцы изготовлены с механическим креплением пластин.

Пластины выполнены из твёрдого сплава GC1015, GC1020, GC1025. Резцы крепятся в расточные балансируемые базовые модули HSK-63A. За счёт возможности радиального смещения инструмента внутри блока производилась настройка на растачиваемый диаметр.

При настройке использовался микроскоп ZOLLER (рис. 12). Изображение режущей кромки инструмента формировалось оптически с помощью телевизионной камеры и передавалось на монитор, а оцифровка осуществлялась лазерным длинномером относительно геометрической оси вращения инструмента с точностью до 0,001 мм.

Точная настройка резцов осуществлялась микрометрическими винтами.



Рис. 12. Микроскоп ZOLLER для настройки осевого инструмента

Для работы на современных фрезерных станках с высокооборотными шпинделями необходима динамическая балансировка инструментов и держателей. Центробежные силы несбалансированных держателей увеличивают нагрузку на подшипниковый узел шпинделя и снижают качество обработки деталей – точность операционных размеров и шероховатость обрабатываемой поверхности.

Для получения наилучших результатов после установки инструмента в инструментальный блок проводили его балансировку на балансировочном станке фирмы SHUNK (рис. 13).



Рис. 13. Балансировочный станок ACURO для балансировки инструмента

В процессе балансировки (рис. 14) компенсировались несимметричное распределение массы ротора. Компенсация дисбаланса выполнялась при помощи встроенных или спаренных балансировочных колец в строго определённом месте оправки.

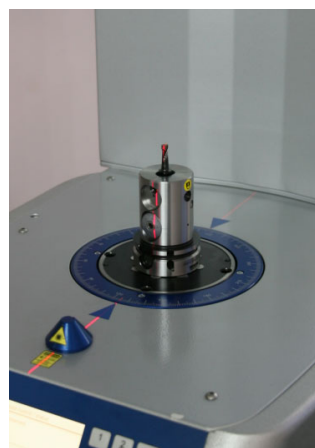


Рис. 14. Динамическая балансировка инструмента

Для балансировки инструментальных державок и инструмента также применялись балансировочные кольца под различные диаметры цилиндрических оправок.

Точность балансировки задавалось критерием "G". Максимальный дисбаланс не превышал 2,5G.

Если результат начального дисбаланса требовалось улучшить, то функции цикла балансировки снова активизировались до получения приемлемого результата.

Заключение

Высокие технологии и успешная эксплуатация высокоскоростного оборудования с применением современной инструментальной оснастки позволяет получать качественно новые характеристики деталей.

Исследования, проведенные в производственных условиях, показывают широкие возможности в расширении номенклатуры обрабатываемых деталей из жаропрочных сплавов на высокоскоростном оборудовании.

Рассмотренные особенности технологии обработки дисков ГТД из жаропрочных сплавов могут быть использованы при дальнейших исследованиях в области обработки авиационных деталей для технологического обеспечения высокого качества и надёжности авиационных двигателей.

Список литературы

1. Панасенко В.А., Петров С.А., Мозговой С.В., Карась Г.В. Особенности обработки дета-

лей авиационных ГТД на станках с ЧПУ // Вестник двигателестроения. – 2005. – N 1. – С. 138-144.

2. Макаров А.Д., Мухин В.С., Шустер Л.Ш.. Износ инструмента, качество и долговечность деталей из авиационных материалов: Учебное пособие. – Уфа, 1994. – 368 с.

3. Левин М.Ю., Лобанов В.М., Гринберг П.Б. Прочность твердосплавных пластин для черновой обработки жаропрочных сплавов // Станки и инструмент. – 1990. – № 12. – С. 30-31.

4. Шатерин М.А., Ермолаев М.А., Самойленко В.Д. Силы и контактные нагрузки, действующие на заднюю поверхность режущего инструмента // Станки и инструмент. – 1988. – № 3 – С. 28-30.

5. Кушнер В.С., Левин М.Ю., Гринберг П.Б., Лобанов В.М. Оптимизация по критерию прочности формы режущих пластин для чернового точения труднообрабатываемых материалов // Авиационная промышленность. – 1991. – № 6. – С. 28-30.

Поступила в редакцию 22.05.2008

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