

ВВЕДЕНИЕ

Разработка и производство газотурбинных двигателей (ГТД) является одним из научно-технических направлений, в котором участвуют только страны высокого технологического уровня. Это объясняется сложностью задач, лежащих на стыке материаловедения, машиностроительных переделов высокого уровня и информационных технологий. Повышение конкурентоспособности российской авиатехники и ее доли на мировом рынке является одним из приоритетов, заданных Стратегией национальной безопасности Российской Федерации. В рамках реализации Стратегии ключевой задачей является обеспечение внедрения и активного использования инновационных цифровых технологий при разработке, производстве и эксплуатации продукции.

Современный этап развития авиационной техники характеризуется ужесточением эксплуатационных параметров конструкции изделий, увеличением мощности, применением новейших материалов для повышения эффективности и увеличения ресурса изделия. Авиационная промышленность и авиадвигателестроение исторически являются лидерами применения инновационных технологий и новых материалов, а безопасность и высочайшие требования к качеству — важнейшие показатели производства газотурбинных двигателей и установок.

В турбореактивных двигателях ближайшей перспективы (2024–2026) будут существенно повышены параметры рабочего процесса и степень двухконтурности, а в их конструкции будут широко применяться композиционные материалы как в «холодной», так и в «горячей» частях двигателя [1, 2]. Керамические композиционные материалы (ККМ) находят применение для жаровой трубы камеры сгорания, лопаток соплового аппарата (СА) и рабочего колеса (РК) второй ступени ТВД и других ответственных высоконагруженных компонентов ГТД (см. цв. вкл., ил. 1).

Например, в семействе ТРДД LEAP-X компания CFM International впервые в мире для двигателей узкофюзеляжных самолетов применила лопатки РК и передний корпус вентилятора из полимерного композиционного материала.

Разработка новых технологий в авиадвигателестроении занимает не менее 10–15 лет, поэтому и за рубежом, и в России с конца 1990-х гг. активно ведутся работы по созданию научно-технического задела (НТЗ) для двигателей 2025–2030 гг. (шестого поколения). Современное двигателестроение характеризуется [3] применением прорывных технологий (рис. В1) и технических решений: высоконагруженные лопаточные ступени; широкое применение композиционных материалов, в том числе на основе керамической матрицы; лопатки турбины с системой охлаждения Super-cooling, обеспечивающие околостехиометрическую температуру газов на входе в турбину; блиски с полыми лопатками; алюминид титана (TiAl) для лопаток ТНД, изготовленных методами аддитивной технологии, и др.

Эффективность традиционной производственной системы (рис. В2) ограничена вследствие недостаточно активной взаимосвязи огромного количества

различных процессов, связанных с производством сложных инновационных продуктов.

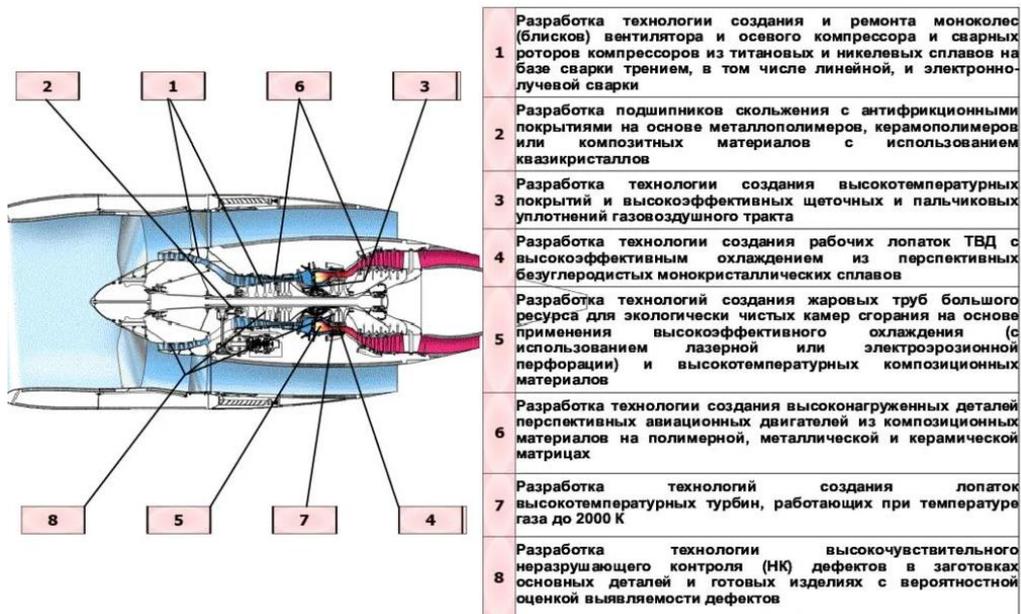


Рис. В1

Критические технологии для компрессоров и турбин перспективных двигателей [2]

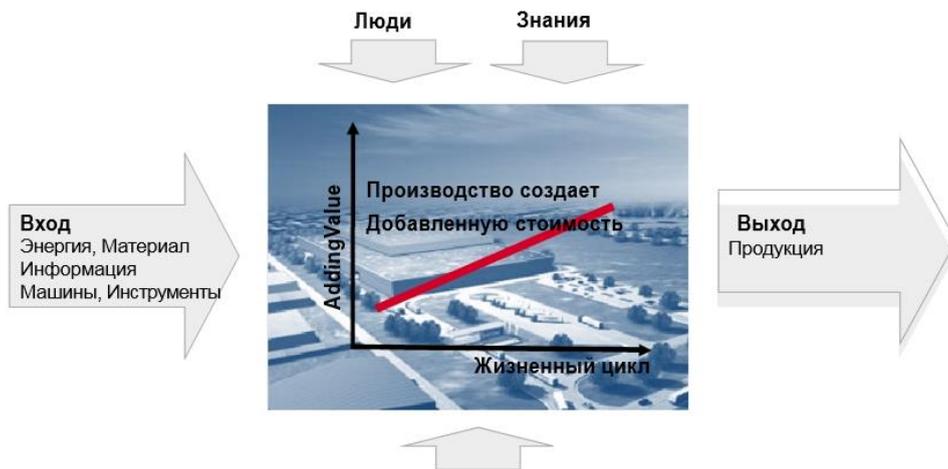


Рис. В2

Пример обычной производственной системы

Лавинообразное развитие информационных технологий открывает новые возможности управления производственными процессами, методами их реализации с целью обеспечения требуемого качества продукции. Возможность иметь актуальную информацию об изделии не только в процессе изготовления,

но и во время всего жизненного цикла становится определяющей для дальнейшего развития технологий производства продукта. Моделирование отдельных технологий и всего производственного процесса выходит на новый уровень — создание киберфизических систем, где свойства математических моделей адаптируются с учетом параметров физических изделий.

Киберфизические системы (Cyber-Physical System, CPS) — это системы, состоящие из различных природных объектов, искусственных подсистем и управляющих контроллеров, позволяющих представить такое образование как единое целое. В CPS обеспечивается тесная связь и координация между вычислительными и физическими ресурсами. Компьютеры осуществляют мониторинг и управление физическими процессами с использованием такой петли обратной связи, где происходящее в физических системах оказывает влияние на вычисления и наоборот.

Это позволяет создать цифровой двойник реализуемого процесса и изделия, благодаря чему открывается целый спектр возможностей моделирования: от более точной оценки пригодности изделия для эксплуатации, технологии его производства до изменения стандартов производства. Новый подход, основанный на принципах получения более точной, комплексной, верифицируемой, не подверженной влиянию человеческого фактора информации, получил название «Индустрия 4.0» [4]. Основные этапы развития автоматизации производственных систем до уровня «Индустрия 4.0» показаны на рисунке В3 [5].

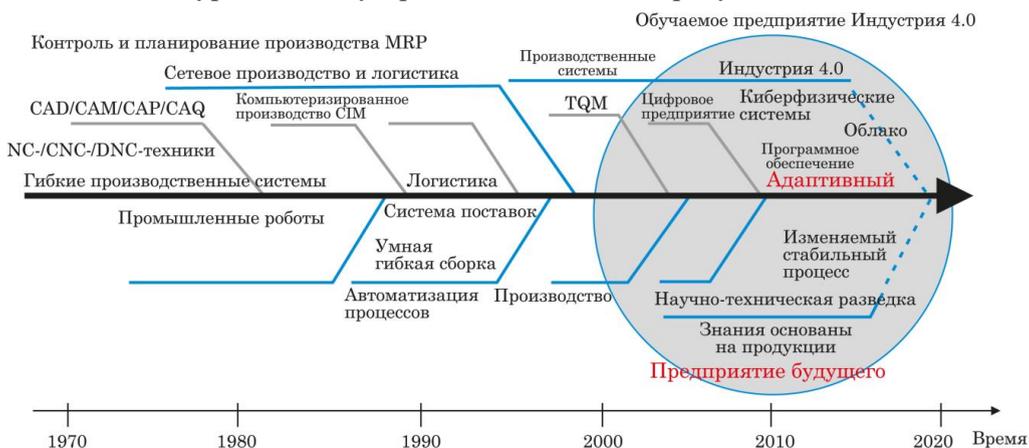


Рис. В3

Основные этапы развития автоматизации производственных систем до уровня «Индустрия 4.0»

Главными направлениями развития современного производства в рамках «Индустрии 4.0» являются:

1) сбор, обработка данных, работа с большим объемом неструктурированных данных, хранящих информацию обо всем жизненном цикле изделия (Big data);

2) Интернет-компоненты (IoT) — подключение всех производственных установок в единую сеть с возможностью передавать управляющую информацию для адаптивно управляемого производственного процесса;

3) виртуальная реальность — проектирование объектов, технологий производства деталей, методов контроля в виртуальной реальности;

4) инновационные, аддитивные технологии, 3D-печать — принципиально новые методы и возможности изготовления деталей, требующих новых подходов и контроля процессов;

5) автоматизация и внедрение искусственного интеллекта на всех уровнях систем;

б) киберфизические системы — объединение технологических производственных операций и операций контроля в единую систему с использованием искусственного интеллекта. Интеграция между человеческим трудом и машинами, подключенными к Интернету. Промышленное предприятие «Индустрия 4.0» будет выглядеть как единая информационная система, в которой будут храниться, обрабатываться и отслеживаться все данные и процессы производства и контроля, причем большая часть процессов, а также мониторинг будут происходить автоматизированно с помощью современных программно-аппаратных средств. При такой организации можно сфокусировать максимум энергии на решении задач модернизации, оптимизации конструкций и поиске новых технических решений и материалов для совершенствования изготавливаемых изделий. В информационно замкнутой системе возможно оценить качество изделия на любом этапе производства, а также проанализировать и доработать при необходимости технологию, после чего выявляется максимальное количество дефектов. Цифровая копия каждого изделия будет хранить данные обо всех этапах жизненного цикла детали, включая чертежи и трехмерные модели в цифровом виде, модели технологических процессов изготовления, данные текущих параметров процесса, данные о неразрушающем контроле на каждом этапе производства и другие важные параметры.

В настоящее время оборудование устаревает с феноменальной скоростью, поэтому приоритетным направлением является высокотехнологичное оборудование, которое соответствует современным стандартам и имеет возможность интегрироваться в киберфизические системы, что будет способствовать облегчению мониторинга и повышению качества продукции. Применяя такое оборудование, производственные предприятия будут повышать скорость адаптации к новым требованиям, идти в ногу со временем и иметь конкурентные преимущества.

Применительно к производству авиационных газотурбинных двигателей и установок основными точками приложения «Индустрии 4.0» на начальном этапе являются: автоматизация всех технологических процессов производства и контроля; внедрение методов статистического анализа; создание системы учета всех стадий производства и контроля жизненного цикла изделия. Старые технологии на таком производстве оказываются неэффективными, неэкономичными, неэкологичными и требуют модернизации или замены. Создание новых

технологий играет ключевую роль в обеспечении будущей конкурентоспособности авиационной техники.

Список литературы

1. Скибин, В. А. Работы ведущих авиадвигателестроительных компаний в обеспечение создания перспективных авиационных двигателей (аналитический обзор) / В. А. Скибин, В. И. Солонин, В. А. Палкин ; под общ. ред. В. А. Скибина, В. И. Солониной. — М. : ЦИАМ, 2010. — 676 с.
2. Палкин, В. А. Обзор работ в США и Европе по авиационным двигателям для самолетов гражданской авиации 2020–2040-х годов // Авиационные двигатели. — 2019. — № 13 (4). — С. 75.
3. Авиационные двигатели. — 2019. — № 14 (5). — С. 63.
4. Westkämper, E. Strategien der Produktion: Technologien, Konzepte und Wege in die Praxis. — SpringerVieweg, 2016. — 316 s.
5. Westkämper, E. «Industrie 4.0 — Zukunftsperspektiven» // Сборник докладов X Международного симпозиума, Дрезден, 28 февраля 2018 г. — Дрезден, 2018. — С. 10–11.

Глава 1

ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ФАСОННЫХ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ, ЖАРОСТОЙКИХ СПЛАВОВ НА МНОГОЦЕЛЕВЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРАХ

В данной главе рассмотрены вопросы оптимизации обработки фасонных деталей сложной формы из высокопрочных, жаростойких сплавов на многоцелевых обрабатывающих центрах (МОЦ).

Приведены примеры применения МОЦ при изготовлении различных ответственных деталей авиационного двигателя из жаропрочных никелевых сплавов.

Проведен анализ факторов, определяющих эффективность применения МОЦ.

Рассмотрены новые технологические возможности МОЦ, существенно повышающие эффективность их применения и снижающие трудоемкость изготовления сложных деталей и сборочных единиц.

Ключевые слова: *многооперационная обработка, валы и диски турбин, гибридные технологии, additive technology.*

In this chapter machining optimization problems of the profiled parts with complex shape from high-strength, heat-resistant alloys on the multipurpose machining centers (MMC) are considered. Examples of the MMC application in the manufacture of various critical parts for an aircraft engine from heat-resistant nickel alloys are adduced. The analysis of the factors that determine the effectiveness of the MMC application is carried out. New technological possibilities of the MMC, significantly increasing the efficiency of their application and reducing the complexity of the manufacturing complex parts and assembly units are considered.

Keywords: *multioperational machining, turbine shafts and wheels, hybrid technology, additive technology.*

Введение

Проектирование и производство современных, сложнотехнологических машин, к числу которых относятся газотурбинные двигатели (ГТД) и установки, характеризуется все более возрастающими требованиями к эксплуатационным характеристикам и показателям надежности изделий. Это, в свою очередь, усложняет конструкцию ответственных деталей ГТД, ужесточает требования к точности и качеству их изготовления и обуславливает применение все более труднообрабатываемых сталей и сплавов с целью обеспечения рабочих параметров машин. Вышеназванные факторы существенно повышают трудоемкость изготовления большинства деталей.

Высокие критерии работоспособности ответственных деталей и сборочных единиц (ДСЕ) современного авиационного двигателя предъявляют особые требования к методам их изготовления. К таким деталям относятся диски и валы авиационных двигателей. Проблемы постоянного повышения качества и поддержания высокой конкурентоспособности производства ГТД привели к

новым решениям и применению технологий комплексной многооперационной обработки наиболее ответственных ДСЕ.

Основными предпосылками для применения технологий комплексной многооперационной обработки являются:

- сложная геометрия деталей (поверхности свободной формы, сложные внутренние контуры, неустойчивые для базирования заготовки, детали);
- маленькие партии обрабатываемых деталей (замена оснастки по ходу машинного времени, обработка в режиме Just-In-Time);
- высокие требования к качеству обработанной поверхности (требует измерения параметров в процессе обработки);
- большой объем припусков для обработки резанием (необходима высокая производительность приводов шпинделя при продолжительной работе и жесткость оснастки);
- материалы, трудноподдающиеся обработке резанием (высоколегированная сталь, закаленная сталь, жаростойкие сплавы);
- высокая стоимость заготовок (исключение брака в работе).

Технология комплексной многооперационной обработки [1] реализуется на современных многоцелевых обрабатывающих центрах (МОЦ).

1.1. Факторы, определяющие эффективность применения МОЦ

Для эффективной обработки сложных ДСЕ в условиях мелкосерийного и единичного производства многоцелевые обрабатывающие центры должны обладать следующими основными свойствами [2]:

- высокой мощностью и крутящим моментом шпинделя (100 кВт и 100 Нм соответственно), что обеспечивает гибкость при объемной обработке резанием при снятии больших припусков;
- активной системой гашения вибраций, которая повышает срок службы инструмента до 30% и сокращает продолжительность обработки;
- наличием жесткой поворотной фрезерной головки с высоким крутящим моментом. Это обеспечивает гибкость процесса, позволяет вести одновременную черновую обработку по 5 осям, снижает продолжительность обработки сложных деталей;
- возможностью установки борштанг с призматическими оправками для глубокого сверления (соотношение «длина обработки = 16 × диаметр»);
- наличием системы интенсивной подачи СОЖ под давлением до 200 бар и расходом 200 л/мин. Это повышает срок службы инструмента до 20% и сокращает продолжительность обработки на 15–20%;
- достаточным объемом инструментального магазина;
- эффективной и достаточной системой адаптивного управления процессом обработки;
- системой контроля поломок инструмента и столкновений при наладке и эксплуатации;

- системой эффективной защиты станка от перегрузок;
- «гибкостью» языка программирования и возможностью параллельной обработки.

Рассмотрим некоторые факторы, определяющие эффективность эксплуатации МОЦ в условиях мелкосерийного производства. Одним из важнейших качеств, определяющих эффективность эксплуатации МОЦ в условиях мелкосерийного производства, является способность оборудования к переходу на выпуск новой детали. Время, затрачиваемое на освоение производства новой детали, и время оперативной переналадки оборудования определяются следующими основными составляющими:

- 1) подготовкой к изготовлению изделия и проработке КД;
- 2) подбором инструмента и технологической оснастки;
- 3) разработкой и проверкой управляющей программы;
- 4) внедрением процесса в производство:

- наладкой системы СПИД;
- отладкой управляющей программы;
- 5) подготовкой технологической документации;
- 6) условиями хранения и оперативного использования управляющих программ.

Ниже (табл. 1.1) приведена некоторая сравнительная информация по времени, затрачиваемому на переналадку МОЦ одного типа различных производителей, WFL M35-G, Mazak Integrex 300ШСТ и Nakamura Tome STS-40, которая получена в процессе длительной интенсивной эксплуатации на одном из заводов.

Таблица 1.1

Основные переходы и время, затрачиваемое на переналадку МОЦ

Основные переходы	M35-G	Integrex 300ШСТ	STS-40
Перестановка кулачков	6 мин	7 мин	10 мин
Перестановка сухарей	0 мин	5 мин	5 мин
Перестановка упора	3 мин	3 мин	4 мин
Замена инструмента (1 позиция)	6 мин	10 мин	10 мин
Прочие операции	2 мин	1 мин	2 мин
Данные с учетом всей номенклатуры деталей			
Максимальное время переналадки	24 мин	68 мин	149 мин
Минимальное время переналадки	5 мин	4 мин	6 мин
Среднее время переналадки	19 мин	21 мин	59 мин

Процесс обработки управляющих программ на станках WFL и NT практически одинаков, однако существенно — в среднем более чем в два раза — отличается по длительности. На станках Mazak обработка программ для обработки простых деталей, написанных в среде Mazatrol, представляется более удобной, так как работа ведется не на уровне текста программы, а на уровне объектов обработки (элементарных обрабатываемых поверхностей), которые можно выбрать из списка. Однако для сложных фасонных деталей это преимущество отсутствует.

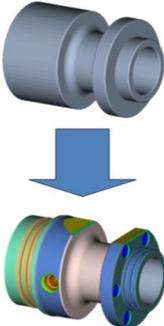
Условия хранения и оперативного использования управляющих программ оказывают существенное влияние на длительность наладки и переналадки. На станках WFL количество и объем программ ограничивается только доступным объемом памяти на жестком диске, который для всех случаев является достаточным и может быть увеличен при необходимости. Станки NT обладают сильно ограниченным объемом памяти (только оперативная память), поэтому хранение программ с большим количеством строк затруднено. Станки Mazak имеют несколько зон хранения управляющих программ, которые доступны пользователю. Две зоны имеют ограничение только по объему свободного места на жестком диске, а зона с рабочими программами, доступными в оперативном режиме, имеет ограничение по количеству УП.

В условиях серийного производства, при большой номенклатуре сложных ДСЕ, решение по хранению УП на станках фирмы WFL выглядит наиболее оптимальным.

В таблице 1.2 приведен пример анализа основных составляющих затрат времени, возникающих при обработке детали типа муфты в условиях серийного производства на различных МОЦ.

Таблица 1.2

Анализ основных составляющих затрат времени

Тип МОЦ	Millturn M35-G	Integrex 300PIST
Расчет, проверка и корректировка УП	16 ч	8 ч
Переналадка станка на новую деталь	19 мин	21 мин
Внедрение УП	6 ч	6 ч
		
Время обработки одной детали	21,6 мин	28,7 мин

Как видно из данных таблицы, время на переналадку станка сопоставимо с машинным временем обработки одной детали. Минимальное время, затрачиваемое на переналадку станка, может быть обеспечено за счет:

- использования быстросменных кулачков;
- эргономичного расположения зоны обслуживания инструментального магазина;
- возможности доступа к режущему инструменту без прерывания цикла обработки.

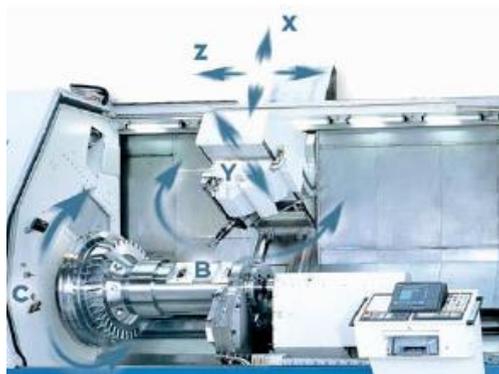
1.2. Конструкция и технологические возможности многоцелевых обрабатывающих центров

Технологические возможности многоцелевых обрабатывающих центров позволяют за одну установку детали производить токарную, фрезерную обработку внутренних и наружных поверхностей: сверление, зенкерование, развертывание и растачивание отверстий под любым углом наклона, фрезерование наружных и долбление наружных и внутренних шлиц и зуба, проводить измерение обработанных поверхностей и вводить коррекцию управляющей программы.

На рисунке 1.1 приведены компоновка и основные конструктивные узлы и компоненты МОЦ [3]. Один станок объединяет в себе функциональные возможности токарного центра, 5-координатного обрабатывающего центра, зубофрезерного станка и станка для глубокого сверления.



a



б

Рис. 1.1

Общий вид (а) и CNC-управляемые оси перемещений (б)

Исполнение массивной станины из серого чугуна с уклоном и инновационное геометрическое расположение осей позволило сделать особо широким расстояние между направляющими, а расстояние между точкой обработки и направляющими минимальным.

Основные конструктивные узлы и компоненты МОЦ с магазином инструментов и программно-управляемым люнетом приведены на рисунке 1.2.

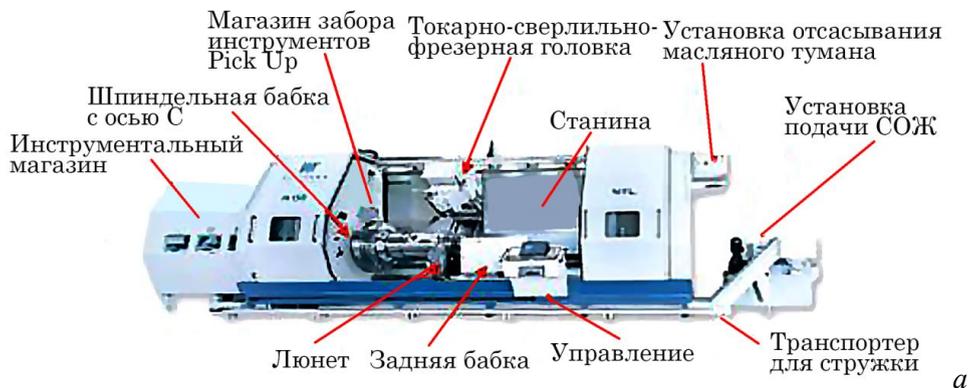


Рис. 1.2

Основные конструктивные узлы и компоненты МОЦ (а), магазин инструментов (б), программно-управляемый люнет (в)

На рисунках 1.3–1.5 приведены технологические возможности и примеры типовых операций обработки на МОЦ.

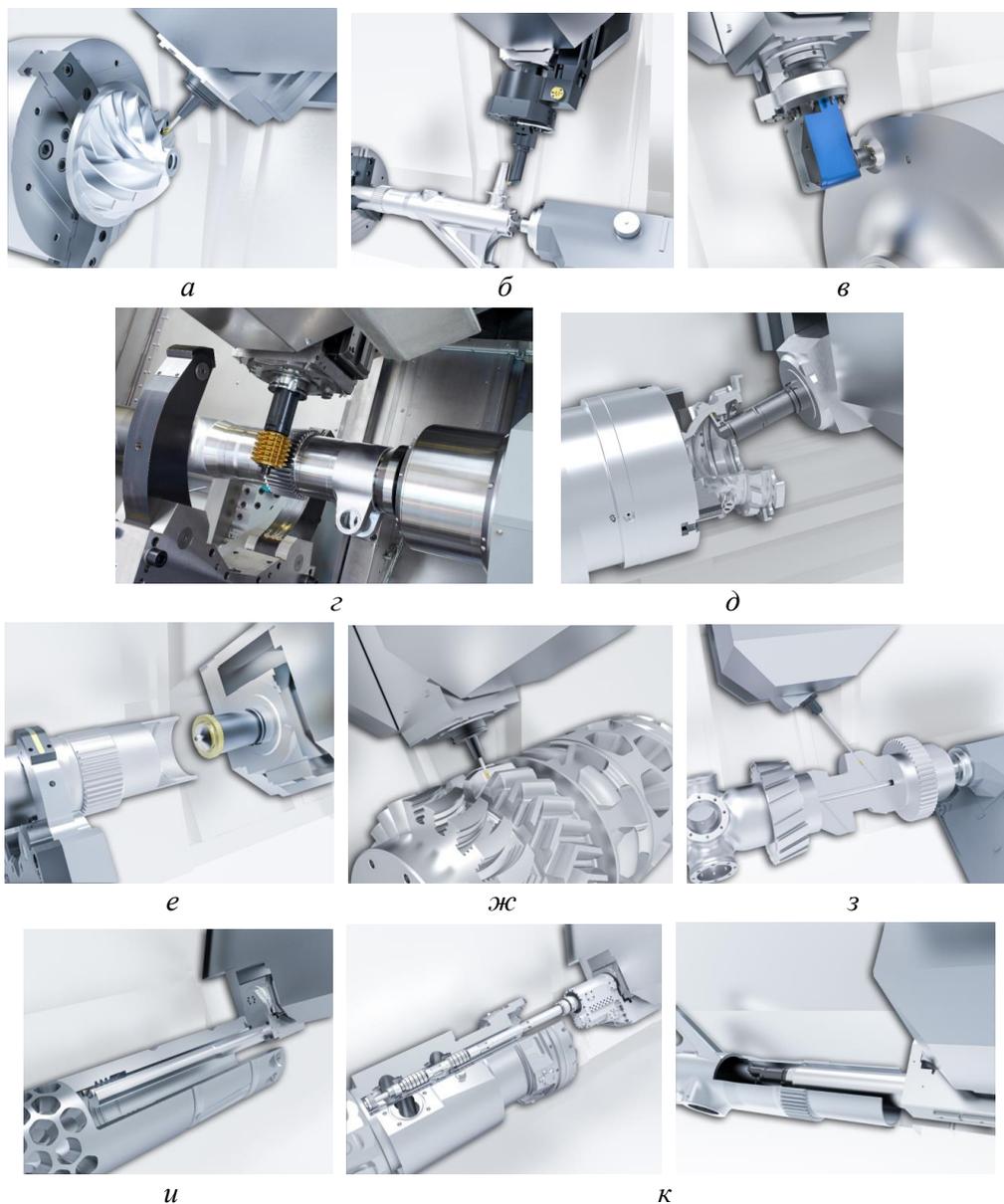


Рис. 1.3

Технологические возможности и примеры типовых операций обработки на МОЦ:
а — 5-осевое фрезерование крыльчатки/шнека; *б* — точение план-суппортной головкой; *в* — точение осе-несимметричных внутренних отверстий; *г* — фрезерование зубьев методом обката Flank-Нов прямых и наклонных наружных цилиндрических и сферических зубчатых колес; *д* — внутренняя расточка с применением управляемой оси *B*; *е* — долбление зубьев шестерен; *ж* — обработка фланков зуба; *з* — глубокое сверление; *и* — внутреннее точение борштангой; *к* — обработка внутренних фасонных поверхностей CNC-управляемой специальной борштангой.

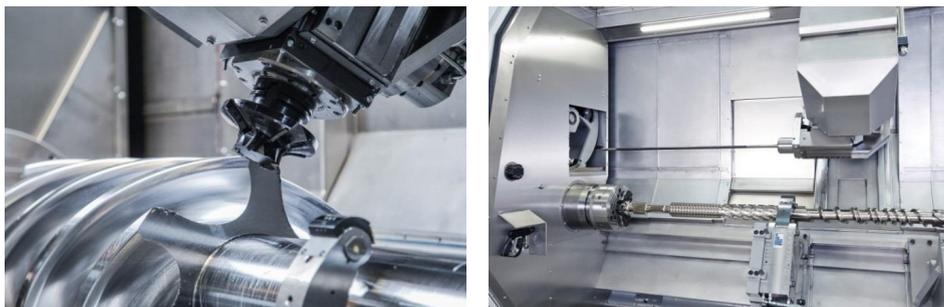


Рис. 1.4

Обработка шнеков, длинных и тонких валов на станке M40 Millturn/4500 мм

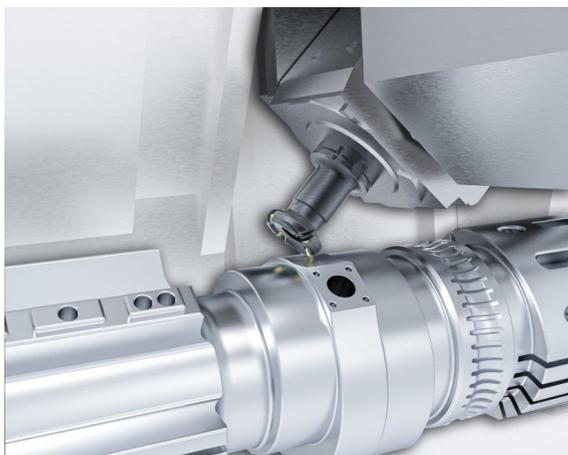


Рис. 1.5

Обработка кулачков распределительного вала

Преимущества технологии комплексной обработки на многооперационном МОЦ валов и дисков турбин приведены далее.

1.3. Программирование обработки

Особенности проектирования технологий и в особенности операционных технологий обработки на современных обрабатывающих центрах и МОЦ коренным образом изменились и значительно упростились в сравнении с разработкой технологий для обычных станков с ЧПУ. Циклы, режимы обработки заложены в программное обеспечение станка. Задача технолога на производстве при разработке технологии обработки деталей заключается в:

- правильном выборе типа обрабатываемой поверхности (см. рис. 1.3–1.5);
- задании исходных параметров обработки, таких как материал, твердость, вид химико-термической обработки поверхности и др.;
- задании требований к выходным показателям качества и точности: шероховатости, допускам.

В значительной степени это упрощается за счет ввода цифровой модели заготовки и детали. Например, универсальный и логичный программный редак-

тор Millturn PRO с графической поддержкой позволяет выполнять программирование непосредственно на станке, обеспечивая эффективное и интуитивное написание программ ЧПУ.

Программный продукт CrashGuard Studio [4] (рис. 1.6) обеспечивает эффективное программирование при помощи ПО для 3D-моделирования, для предварительной проверки программ ЧПУ на персональном компьютере. Особенности данного ПО: визуализация всех этапов программирования для заблаговременной диагностики неисправностей, качество программ ЧПУ для обеспечения производительности и надежности станка, а также более короткое время подготовки станка к производству благодаря предварительному моделированию. Оператор станка получает готовую программу, проверенную на возможность столкновений.

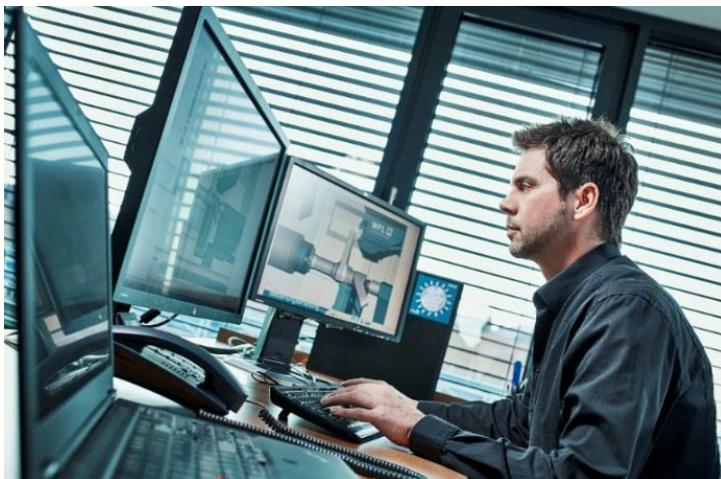


Рис. 1.6

Программный продукт CrashGuard Studio

Данная система моделирования эффективно работает на этапе подготовки производства.

1.4. Адаптивное управление процессом обработки

Важнейшим вопросом в любом технологическом процессе является защита обрабатываемой детали, инструмента и станка. Припуски заготовок редко бывают строго определенными и постоянными. Программа обработки при этом должна состояться из расчета самого неблагоприятного контура заготовки, что обуславливает проходы без съема металла и, соответственно, большую продолжительность черновой операции. Для компенсации этих погрешностей система адаптивного контроля (рис. 1.7) выполняет измерение фактических припусков и актуальных, действующих усилий и регулирует подачу или скорость вращения по определяемой адаптивной характеристике, благодаря чему на участках, где не происходит снятия стружки, скорость обработки существенно увеличивается.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru