

УДК 621.9.06-52 : 629.7.0363

## **Целесообразность применения станков с ЧПУ в единичном и мелкосерийном производстве на основе показателей технологичности деталей ГТД**

**Т.В. Шеховцева**

*Рыбинская государственная авиационная технологическая академия имени П.А. Соловьева, кафедра технологии авиационных двигателей и общего машиностроения*

**Аннотация.** Рассмотрен вопрос обоснованного применения станков с ЧПУ в единичном производстве на основе конструктивных особенностей деталей ГТД. Разработан алгоритм отработки детали на технологичность как ее качественной оценки. Это позволило дать рекомендации по ряду необходимых требований, которые должны предъявляться к деталям, обрабатываемым на станках с ЧПУ.

**Abstract.** The question of the proved application of CNC machine tools in individual manufacture has been considered on the basis of design features of details in gas turbine engines. The algorithm of improvement of details on adaptability to manufacture as its qualitative assessment has been developed. It has allowed to give recommendations on a number of necessary requirements to the details processed on CNC machines.

**Ключевые слова:** технологичность конструкции детали, станки с ЧПУ, единичное и мелкосерийное производство

**Keywords:** manufacture of detail design, CNC machine, individual and small-scale production

### **1. Введение**

Современные газотурбинные двигатели (ГТД) можно без преувеличения отнести к числу наиболее сложных технических систем, созданных цивилизацией. Обеспечение работоспособности двигателей достигается ценой исключительно высокой энерговооруженности и усложнения всех систем при максимальном снижении массы изделия и использовании уникальных конструктивных и технологических решений (Далин, Михеев, 2001). Непрерывный прогресс в области авиационного материаловедения, а также то, что каждый вновь создаваемый двигатель разрабатывается для решения специфических задач, и поэтому по-своему уникален, резко усложняет задачи унификации и повышения производственной технологичности. В связи с уникальностью каждого газотурбинного двигателя, составляющие их детали также обладают высокой степенью индивидуальности конструкторских решений, что усложняет оценку технологичности деталей.

Одна из задач данной работы состоит в том, чтобы проанализировать конструкции деталей ГТД и методы их обработки, а также разработать алгоритм по отбору деталей на основе показателей технологичности их конструкций с выбором оптимального типа оборудования для обработки.

Наиболее типичные представители деталей ГТД: кронштейны, корпусные детали, моноколеса, лопатки, лабиринты, диски и другие. Каждая группа деталей характеризуется своими конструктивными элементами и технологическими решениями их обработки. Данные группы деталей заслуживают особого внимания, так как относятся к особо ответственным и трудоемким деталям.

### **2. Оценка возможности применения станков с ЧПУ на основе конструкции обрабатываемых деталей**

*Кронштейны в двигателестроении.* Удачной иллюстрацией служит, например, внедрение технологического процесса изготовления деталей типа "Кронштейн" (рис. 1а). Материал – МЛ5 (магниевый сплав). Заготовка в этом случае литая. Особенности детали являются жесточайшие требования к расположению отверстий, взаимосвязанных с крепежными отверстиями на подошве.

Надо отметить, что обработка такого рода деталей весьма затруднительна. Ведь качество готового изделия очень сильно зависит от исходной заготовки, получаемой литьем. Изготавливать такие детали на универсально-фрезерном оборудовании иной раз проще, чем на станке с ЧПУ, поскольку опытный фрезеровщик вручную может "уловить" все "нюансы" конкретной заготовки (Мельников, 1981). Трудоемкость изготовления данной детали на универсальном фрезерном станке составляла 42,5 нормо-часов. Для решения этой задачи на универсальных станках преднамеренно увеличивали часть допусков на поставку заготовки. Это привело к тому, что часть поверхностей, которые по чертежу разрешалось не обрабатывать, на практике фрезеровались.

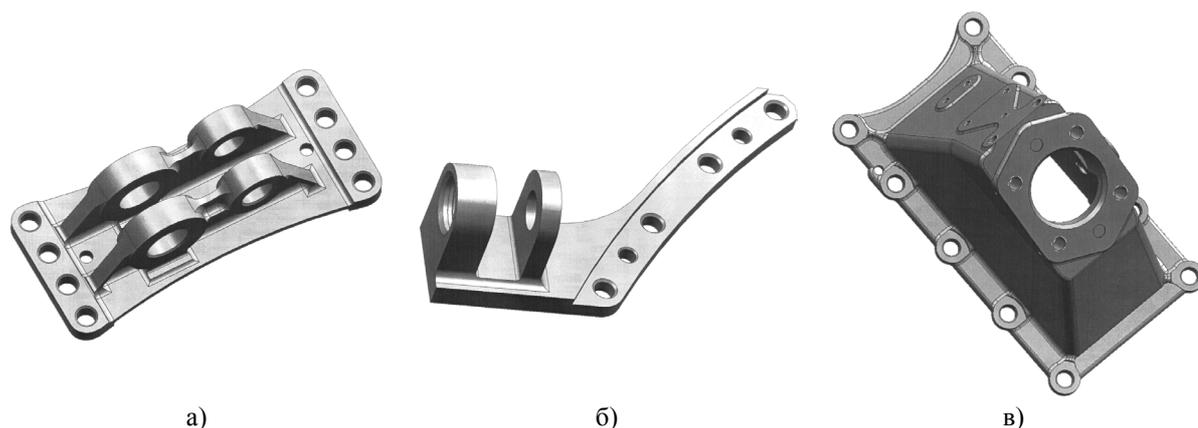


Рис. 1. Кронштейны, изготавливаемые на станках с ЧПУ:  
 а) кронштейн подвески двигателя; б) кронштейн подвески коробки приводов;  
 в) кронштейн крепления двигателя к мотогондole самолета

Для изготовления кронштейна, представленного на рис. 1а, был разработан постпроцессор для ведения работ на станке с ЧПУ и создана математическая 3D-модель, на основании которой разработана программа для изготовления упомянутой выше детали за три установка. В результате, учитывая подготовительно-заключительное время (на наладку) и время работы программы, суммарная трудоемкость изготовления данного кронштейна составила 12,7 нормо-часов (в 3 раз меньше по сравнению с обработкой на универсальном станке). Это, разумеется, обусловлено, в том числе, и особенностями конкретной детали, поскольку материал заготовки позволил работать на повышенных режимах резания.

В качестве еще одного примера можно привести решение проблемы по изготовлению кронштейна, изображенного на рис. 1б. Материал – также магниевый сплав МЛ5 и титановый сплав ВТ6. Необходимо отметить, что 100 % деталей партии, изготавливаемой по новому, прогрессивному методу, проходят окончательный контроль с первого раза.

Ранее, до использования станка с ЧПУ, укрупненный технологический процесс включал в себя следующие этапы: получение заготовки, универсально-фрезерная операция, слесарная обработка, три универсально-фрезерных чистовых операции с промежуточными слесарными. Затем рихтовочная, координатно-расточная, сверлильная и снова слесарная операции. Однако необходимость выпускать деталь с трудоемкостью менее 25 нормо-часов вынудила искать способы изготовления детали на станке с ЧПУ. Суммарная трудоемкость изготовления детали на станке с ЧПУ составила 15,2 часов (значения трудоемкости обработки деталей приведены по данным ОАО "НПО "Сатурн", г. Рыбинск).

На рис. 1в представлена деталь "кронштейн" (материал – алюминиевый сплав АК4-1), поверхности которой описаны математическими зависимостями и их невозможно обработать на универсальном оборудовании, выдерживая требуемую точность размеров. Поэтому оптимальным вариантом изготовления такой детали является обработка на станке с ЧПУ, что позволит уменьшить число используемой специальной оснастки и сократить вспомогательное время обработки.

По данной группе деталей можно сказать, что их конструкция в настоящее время является весьма сложной в авиации. Данные детали для облегчения веса проектируются с различными выборками, что затрудняет обработку и базирование деталей, и тем самым требуется применение станков с ЧПУ для их изготовления вне зависимости от типа производства.

*Корпусные детали ГТД.* Примером важности правильного выбора оборудования и, соответственно, технологии служит изготовление корпусов коробок приводов, редукторов и центрального привода двигателя (рис. 2).

Материал – магниевый сплав МЛ5 или сталь 10X18H9БЛ. Заготовку получают методом литья. Так как в корпусе более 200 размеров, то всегда существует возможность совершения ошибки из-за человеческого фактора. Разработанная технология с использованием станков с ЧПУ предусматривает сокращение используемого оборудования. В результате этого отсутствует необходимость в многочисленной переустановке детали со станка на станок, с меньшим количеством оснастки и все операции выполняются без непосредственного участия человека в отличие от универсального оборудования.

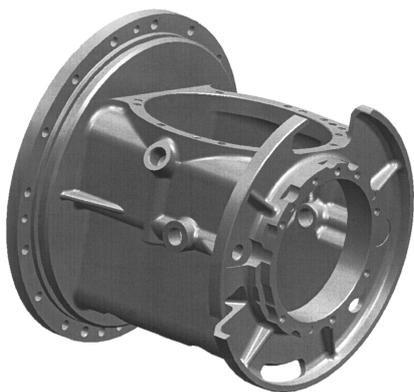


Рис. 2. Корпус центрального привода

По традиционной технологии деталь "корпус центрального привода", имеющая довольно сложную форму и высокие требования к точности производства и качеству обработанных поверхностей, изготавливалась методом литья в песчано-глинистую форму на универсальном оборудовании, а некоторые более сложные операции выполнялись на станке с ЧПУ. Обработка детали представляла собой сложный и длительный процесс с множеством транспортных операций, занимавший около пяти с половиной смен.

Контроль точности изготовления осуществлялся при помощи универсального измерительного инструмента или сложными в проектировании и трудоемкими в изготовлении контрольными приспособлениями. Кроме того, требовалось проектирование и изготовление калибров для контроля

размеров крепежных отверстий, масляных каналов и т.д. Причем специальные измерительные средства применялись только для окончательного контроля поверхностей.

На осуществление операций по контролю готовой детали ранее затрачивалось от полутора до двух смен (около 12-16 часов). Следует отметить, что некоторые предварительно обработанные поверхности, необрабатываемые поверхности, полученные литьем, и ряд размеров, связанных с взаимным расположением отверстий и поверхностей друг относительно друга, не контролировались вовсе. Всё это в результате приводило к выявлению брака только на этапе сборки двигателя.

Для повышения точности, качества поверхностного слоя при изготовлении и снижения трудоемкости изготовления таких деталей было решено использовать станки с ЧПУ и заготовку получать методом центробежного литья (для получения равномерных припусков на заготовке). Технология изготовления детали была изменена по отношению ко всем операциям, выполнявшимся ранее на универсальном оборудовании, и, кроме того, было проведено внедрение компьютеризированной технологии обработки для использования станков с ЧПУ.

Самыми распространенными причинами брака на производстве являются ошибки в способах базирования и нахождения баз, а также невозможность обеспечить повторяемость позиционирования заготовки в крепежной оснастке (либо оснастка не обеспечивает достаточную жесткость). Проблема в том, что результат невозможно спрогнозировать заранее, а можно только констатировать проблемы по окончании всего цикла обработки (Игнатов и др., 2008; Эффективное технологическое..., 2009). Также распространены ошибки в выборе стратегии обработки, необходимого для нее режущего инструмента и режимов резания, соответствующих этому материалу и инструменту. В результате инструмент или отгибает (недоработка), или затягивает в материал (зарез). Если в первом случае деталь можно спасти операциями доработки, то во втором случае она идет в брак, что неприемлемо в условиях единичного и мелкосерийного производства (Зорин и др., 2009; Илюхин, 2002).

Станки с ЧПУ дают возможность не только обрабатывать детали, но и производить проверку каждой детали в приспособлении, не снимая ее со станка, то есть, не нарушая технологических баз. Для этого используется измерительная система станка.

Автоматизация механической обработки является еще одним технологическим способом обеспечения качества продукции. Именно поэтому предприятия (например, ОАО "НПО "Сатурн") располагают более 500 единицами различного оборудования с ЧПУ. Широко используются обрабатывающие центры, на которых деталь обрабатывается точением (причем возможна обработка одновременно двумя резцами по разным программам), фрезерованием, сверлением и т.д.

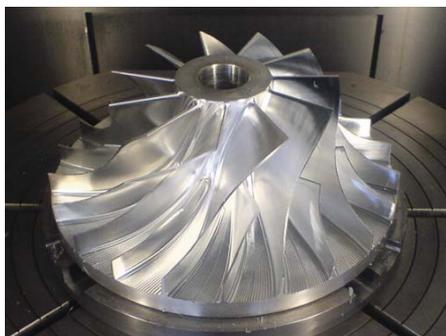


Рис. 3. Колесо компрессора турбины

*Другие особо ответственные и тяжелонагруженные детали ГТД.* Детали типа "кольцо лабиринтное", с точки зрения обработки, имеют две уязвимых геометрических особенности – глубокие внутренние полости и замковые канавки по наружной поверхности.

Детали типа "моноколесо" широко распространены в компрессорах высокого давления (рис. 3). Черновая обработка моноколеса представляет собой фрезерование по объемной модели с постоянным уровнем Z. Модель условно разбивается на уровни (количество которых определяется глубиной одного врезания), инструмент совершает одновременные

перемещения по двум осям, последовательно опускаясь на определенное технологическое расстояние. Это один из самых распространенных способов задания черновой обработки по объемной модели. Черновая обработка лопаток моноколес включает в себя обработку пазов. Фрезерование на полную глубину паза невозможно (рис. 4а) из-за наличия ограничений по глубине резания.

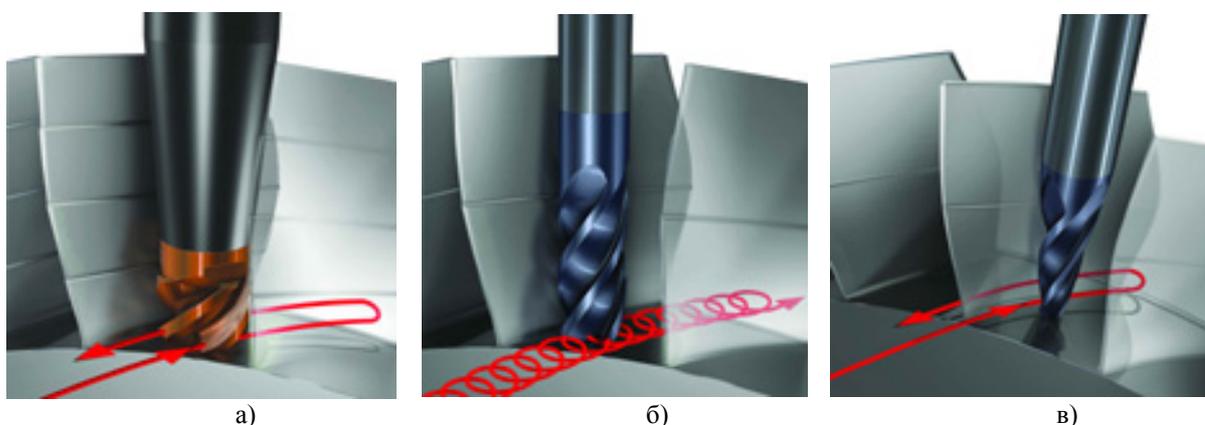


Рис. 4. Обработка лопаток: а) выборка паза последовательными проходами; б) трохойдальное фрезерование; в) чистовая обработка лопаток

Глубина фрезерования паза не должна превышать половины диаметра инструмента. Наилучшим методом обработки является выборка паза последовательными проходами. Также черновую обработку пазов можно производить при высокой подаче, то есть применять трохойдальное фрезерование (*Обработка...*, 2009а,б) (рис. 4б). Это двухкоординатная черновая обработка с высокоэффективным съемом металла с использованием подачи смазочно-охлаждающей технологической смеси (СОТС) под высоким давлением. При обработке данным методом полного паза необходимо запрограммировать вход и выход инструмента из резания по дуге.

Основными положительными факторами предложенной технологии являются: контролируемая длина дуги контакта и малые силы резания, позволяющие работать с большой глубиной резания.

Обработка обода моноколеса представляет собой пятикоординатное перемещение инструмента с обработкой элемента боковой кромкой инструмента. Конструктивный элемент для упрощения задан плоским контуром и контролирующей обработкой поверхностью.

Обработка межлопаточного пространства – это стандартное пятикоординатное фрезерование. Поверхности колеса между лопатками заданы как обрабатываемые. Для определения зоны обработки межлопаточного пространства задаются две ограничивающие кривые и одна управляющая, по ней должны двигаться оси инструмента. Поверхности самих лопаток заданы как контрольные, то есть те поверхности, которых инструмент может касаться, но не может обрабатывать.

Вершина лопатки обрабатывается инструментом, диаметр которого шире поверхности вершины. Это пятикоординатное перемещение, заданное указанием поверхности. Инструмент движется по объемной кривой по нормали к указанной поверхности, что позволяет достичь значительно более высокого качества обработки.

Чистовая обработка пера лопатки – это обработка боковой стенкой инструмента, но заданная не плоскими контурами, как обработка обода, а с указанием поверхности.

Боковое фрезерование или фрезерование с большой глубиной резания является наиболее эффективным методом чистовой обработки лопаток моноколес (рис. 4в), однако для этого необходимо соответствующее программное обеспечение и инструмент.

На примере обработки моноколеса можно оценить многообразие методов пятикоординатного фрезерования на станках с ЧПУ, а также свободную идеологию определения геометрии.

Проектирование и изготовление лопаток очень трудоемкий и ответственный процесс. Сначала проектируется модель лопатки с выпуском рабочей конструкторской документации, затем технологом выполняются некоторые дополнительные построения (специальные ограничивающие контура или поверхности), задаются положения прижимов, определяется форма заготовки. Следует отметить, что все это можно сделать в любой момент времени, параллельно с созданием технологического процесса обработки детали. В приведенном примере лопатка обрабатывается на токарно-фрезерном обрабатывающем центре.

Черновая обработка лопатки (постоянный уровень Z) задается по 3D-модели изделия (рис. 5а).

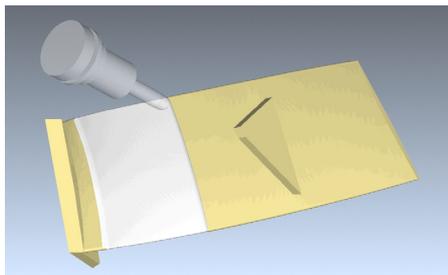


Рис. 5а. Черновая обработка лопатки.



Рис. 5б. Чистовая обработка (спиральная) лопатки

Плоским контуром описывается первоначальная заготовка, номинальной объемной моделью и значениями припусков определяется количество снимаемого материала. Задается способ фрезерования несколько сходный с фрезерованием при постоянным уровнем Z, но при этом материал в пределах плоского контура также должен быть удален.

Чистовая обработка лопаток – это пятикоординатная обработка по спирали (рис. 5б). Лопатка (результат черновой обработки) зажимается в токарно-фрезерный центр, двумя патронами с двух сторон. При работе станка деталь вращается, инструмент может совершать трехкоординатные перемещения с возможностью отклонения по одной из осей. При этом в станках с ЧПУ существует возможность задавать так называемые углы отклонения и опережения, которые позволяют избежать нулевой скорости резания при вершине фрезы, обеспечить доступ к "закрытым" элементам модели и качественно контролировать процесс пятикоординатной обработки.

Для обработки лопаток с бандажными полками применяются пятикоординатные фрезерные станки с ЧПУ Hermle C50 (Германия), на которых за один установ можно обрабатывать все трактовые поверхности пера лопаток. Станки оснащены магазином для смены инструмента и контрольной системой Renishow, что позволяет вести обработку в автоматическом цикле, и обеспечивает

возможность многостаночного обслуживания. Последующая обработка пера лопаток производится на виброабразивной установке с различными наполнителями, что позволяет получить поверхность пера лопаток с шероховатостью до Ra 0,05 мкм. Основное преимущество данного метода фрезерования – это существенное уменьшение отгиба при обработке, так как оба конца лопатки закреплены в патронах.

Приведен лишь небольшой и далеко не самый сложный перечень применения станков с ЧПУ к задачам механообработки. Спектр возможностей станков с ЧПУ значительно шире и постоянно пополняется новыми приемами и стратегиями, что очень ценится в условиях единичных заказов двигателей.

### 3. Исследование целесообразности применения станков с ЧПУ в единичном и мелкосерийном производстве деталей ГТД на основе анализа их конструктивных особенностей

На основе вышеизложенного составлена схема влияния обработки на станках с ЧПУ на весь цикл проектирования и изготовления деталей ГТД (рис. 6).

Анализ результатов проведенных работ по отработке на технологичность свидетельствует о том, что каждая из групп деталей имеет ряд конструктивных особенностей. В таблице представлены основные группы деталей ГТД с обозначением обязательных и переменных параметров конструкции деталей. Обязательными параметрами являются элементы конструкции детали, которые всегда входят в ее состав. К переменным параметрам относятся такие параметры, которые встречаются не у всех представителей данной группы деталей, то есть, определяя наличие переменных параметров необходимо каждую деталь проанализировать индивидуально. Например, большинство корпусных деталей требует обработки более чем по трем сторонам, и их безоговорочно обрабатывают на станках с ЧПУ, используя поворотный стол станка. Таким образом, для большинства корпусных деталей из-за доминирующего фактора (требуется обработка детали более чем по трем сторонам) однозначно назначается станок с ЧПУ.

В результате анализа конструкций различных групп деталей ГТД можно выделить ряд обязательных и дополнительных конструкторских и технологических особенностей, которые влияют на целесообразность обработки конкретной детали на станке с ЧПУ. Выявленные конструкторские и технологические особенности, а также степень их взаимодействия представлены в алгоритме отработки деталей на технологичность, изготавливаемых на станках с ЧПУ (рис. 7).

Алгоритм состоит из трех уровней показателей и двух альтернативных решений. Первый уровень – это наиболее важные факторы конструкции деталей, которые являются доминирующими показателями для применения станков с ЧПУ. Они являются достаточными условиями конструкции детали для применения станков с ЧПУ и не требуют проверки по другим показателям. Второй уровень

алгоритма состоит из таких необходимых условий (наличие в конструкции детали конических поверхностей, ребер жесткости, канавок, различных отверстий, длинных расточек и т.п.) при выборе станка с ЧПУ, после которых рекомендуется (но не обязательно) подтвердить достоверность принятого решения путем анализа конструкции детали на третьем уровне. Третий уровень алгоритма состоит из дополнительных параметров, то есть включает в себя технологические показатели процесса изготовления детали, которые учитываются на стадии технологической подготовки производства (ТПП).

Для отдельных групп деталей ГТД, таких как кронштейны и корпусные детали, существенным аргументом являются отверстия различного типоразмера и расположения, выборки, ребра жесткости, торцовки для изготовления на станках с ЧПУ. Также некоторые кронштейны (рис. 1а, б) характеризуются плоским криволинейным контуром, который безоговорочно требует обработки на станках с ЧПУ.

Таблица. Классификация деталей по технологичности

Параметры	Лопатки	Крыльчатки	Моноколеса	Диски компрессора и турбины	Лабиринты	Корпуса	Кронштейны	Крышки	Фланцы	Валы
1. Сложная пространственная форма (x, y, z)										
2. Обработка более чем по 3-м сторонам детали										
3. Сложная ступенчатая форма или криволинейный контур, или сферических, конических поверхностей										
4. Лыски, выборки, ребра жесткости, торцовки, канавки, выточки										
5. Стыковые и опорные плоскости, расположенные под разными углами										
6. Отверстия различного типа и размера и расположения										
7. Длинные расточки и расточки внутри детали										
8. Точность размеров детали от 6 качества и выше										
9. Детали, требующие при обработке на универсальных станках специальной оснастки и фасонных режущих инструментов										
10. При обработке на станке с ЧПУ уменьшится количество применяемого режущего инструмента										
11. При обработке на станке с ЧПУ уменьшится число переустановок детали										

 – характерный параметр;  
 – переменный параметр.

В алгоритме также представлены два варианта его решения со значением "или", то есть, в результате анализа детали по предложенному алгоритму можно обосновать решение применения станка с ЧПУ для анализируемой детали или предпочесть универсальный станок. Принятие решения главным образом основывается на конструктивном облике детали, на который технолог накладывает факторы ТПП.

Необходимо отметить, что алгоритм разработан для деталей, для которых нельзя принять однозначное решение с первого взгляда.

На примере нескольких типовых представителей (рис. 8) основных групп деталей, применяемых в ГТД, определена эффективность их обработки на станках с ЧПУ с использованием разработанного алгоритма (рис. 7).

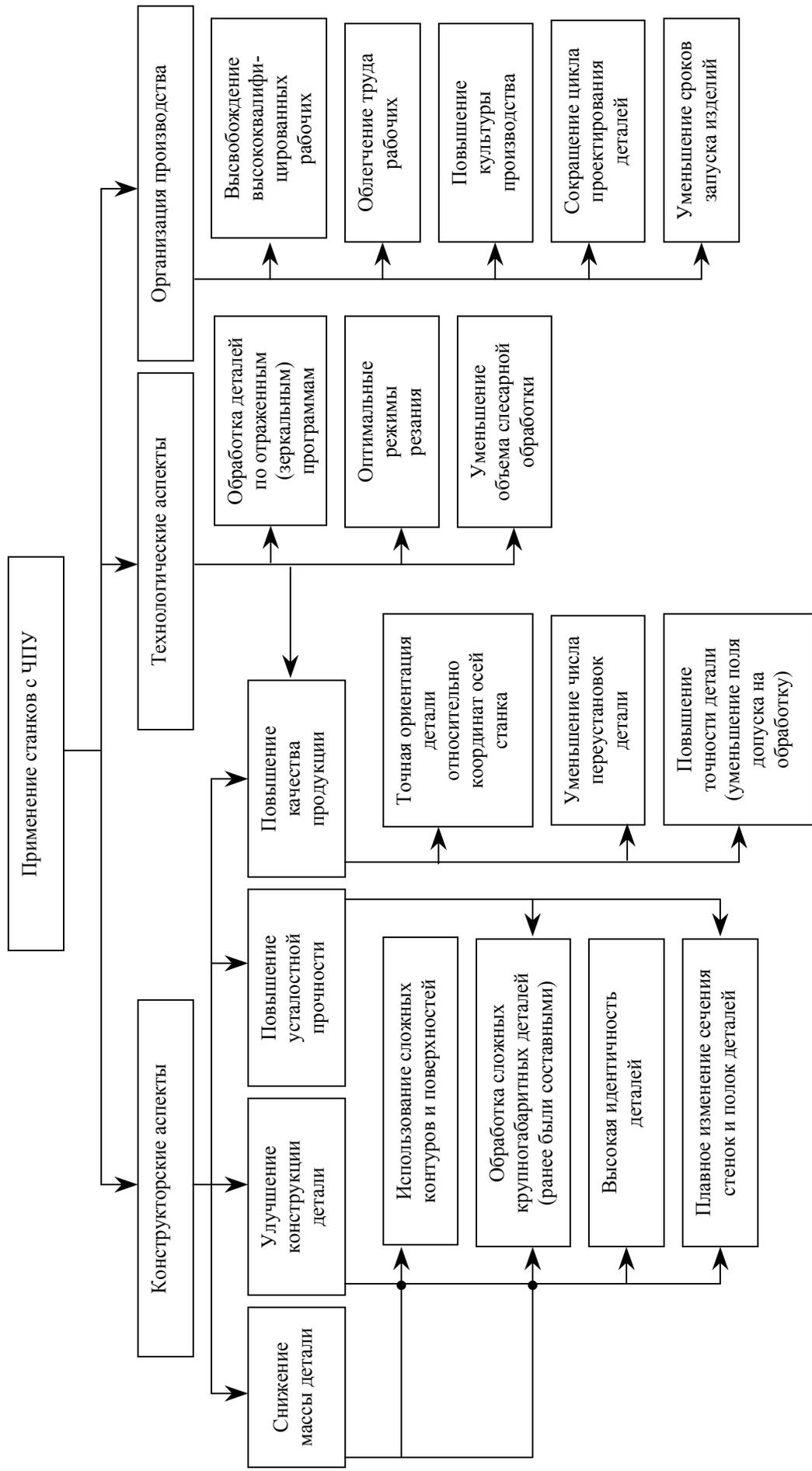


Рис. 6. Схема влияния обработки на проектирование и изготовление деталей ГТД

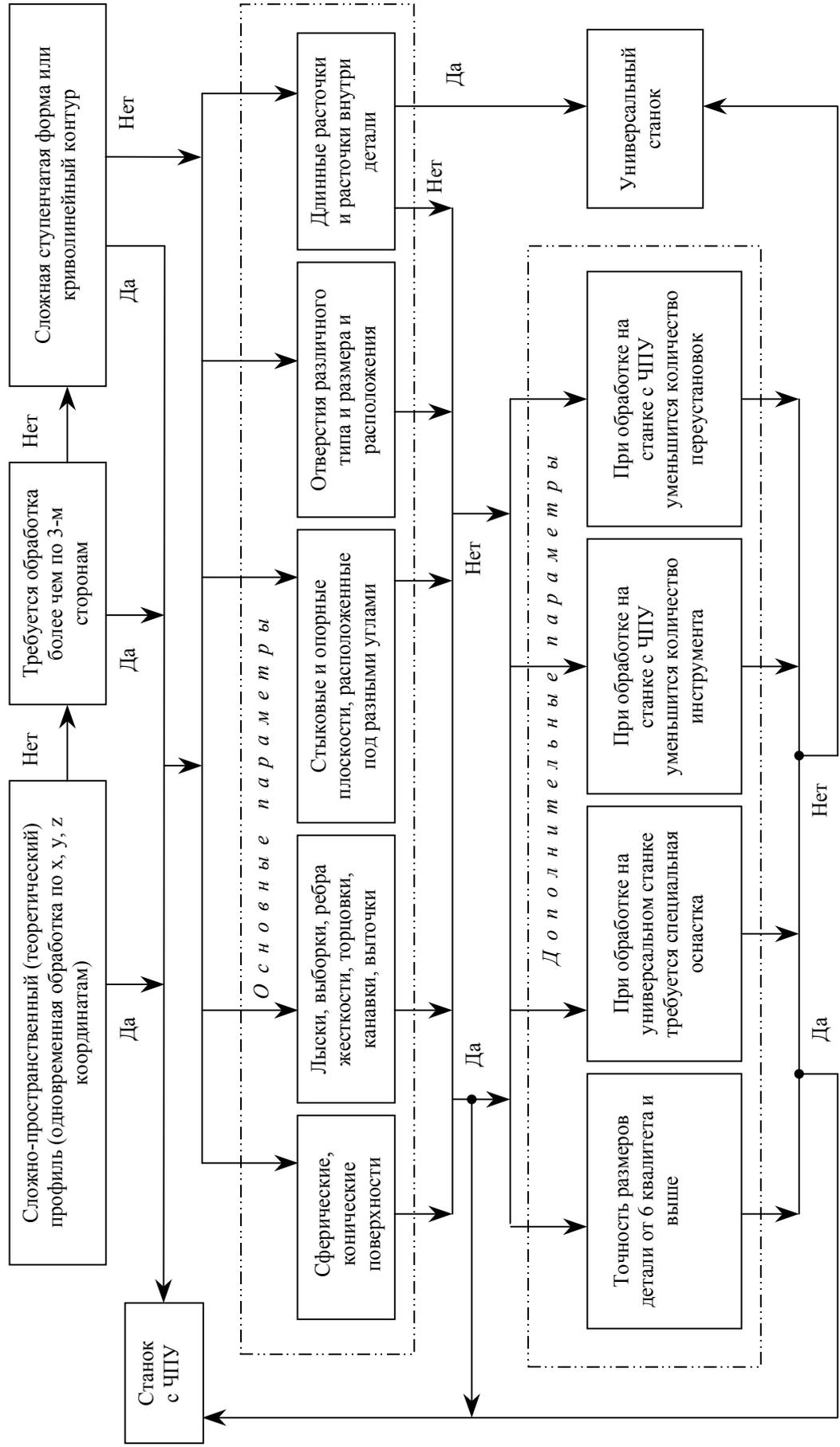


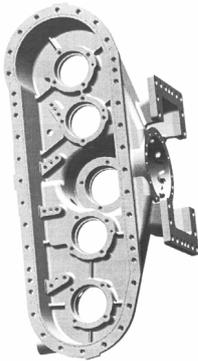
Рис. 7. Алгоритм обработки деталей на технологичность



а. Крышка



б. Вал



в. Корпус

Рис. 8. Типовые представители основных групп деталей ГТД

Деталь "крышка" (рис. 8а) по первому уровню алгоритма не имеет сложнопостепенчатого профиля, то есть не требуется одновременная обработка по трем координатам и не требует обработки более чем по 3 сторонам. Таким образом, последовательно переходим в блок "Деталь имеет сложную ступенчатую форму или криволинейный контур". Данная деталь характеризуется сложным криволинейным контуром по крепежному фланцу. Так как данный признак является достаточным, то такую деталь следует однозначно обрабатывать на станке с ЧПУ. В качестве дополнительных условий можно предложить анализ и рассмотреть основные параметры на втором уровне алгоритма. "Крышка" содержит отверстия различного типа, размера и расположения, следовательно, изготовление данной детали целесообразно производить на станке с ЧПУ. Дополнительно при проверке на третьем уровне, где на вопросы "при обработке на универсальном оборудовании потребуются специальная оснастка" (кондуктор) и "при обработке на станке с ЧПУ уменьшится количество переустановок детали" получаем положительные ответы. Таким образом, обработку детали "крышка" целесообразно выполнять на станке с ЧПУ, а не на универсальном оборудовании.

Деталь "вал" (рис. 8б) проходит первый уровень алгоритма без положительного ответа, так как не имеет сложнопостепенчатого профиля и является телом вращения, то есть не требует обработки более чем по трем сторонам. Рассматриваемый ступенчатый вал не имеет сложной формы, его конструкцию следует рассматривать на втором уровне алгоритма – основных параметров, а затем и на третьем – дополнительных параметров. Конструкция детали по сложности не удовлетворяет требованиям, предъявляемым на данных уровнях алгоритма. Таким образом, получив отрицательный ответ по всем параметрам, представленным в алгоритме, делаем вывод, что деталь "вал" логично обрабатывать на универсальном оборудовании.

Деталь "корпус" (рис. 8в) на первом уровне алгоритма характеризуется тем, что не имеет сложнопостепенчатого профиля, по стрелочке "Нет" переходим к блоку "Требуется обработка детали более чем по трем сторонам". Большинство корпусных деталей требует обработки более чем по трем сторонам, и их безоговорочно обрабатывают на станках с ЧПУ, используя поворотный стол станка. То есть, большинство корпусных деталей однозначно по данному доминирующему фактору переходят по стрелочке "Да" на обработку на станке с ЧПУ, но рассматриваемая деталь, хоть и относится к корпусным деталям, не требует обработки более чем по трем сторонам. Это значит, что данное условие не является достаточным для детали, представленной на рис. 8в, и при проверке на сложную ступенчатую форму или криволинейный контур нельзя однозначно определить тип оборудования.

Таким образом, рассмотрение "корпуса" переходит на второй уровень алгоритма, где деталь характеризуется по двум группам параметров ребрами жесткости, канавками, выточками, отверстиями различного типа и размера, и расположения. То есть, имея положительный ответ на втором уровне алгоритма, можно принимать решение: рассматриваемый корпус следует обрабатывать на станке с ЧПУ. При этом возможна (но не обязательна) проверка детали на третьем уровне алгоритма, где деталь "корпус" (рис. 8в) удовлетворяет всем четырем параметрам (при обработке данной детали необходимо обеспечить точные размеры, при обработке на универсальном оборудовании потребуются специальная оснастка, значительно больше режущего инструмента и будет больше число переустановок детали). Тем самым подтверждается правильность выбора применения станка с ЧПУ.

#### 4. Рекомендации по практическому применению станков с ЧПУ

Эффективность эксплуатации станков с ЧПУ в основном определяется конструкцией деталей (рис. 7), ее технологичностью (рядом базовых конструкционных показателей). Можно выделить ряд основных требований к конструкции деталей ГТД, влияющих на эффективность обработки на станках с ЧПУ, важные факторы технологической подготовки производства (ТПП) и учесть организацию ТПП.

1. Конструктивные требования:

1.1. Детали должны требовать одновременной обработки по  $x$ ,  $y$ ,  $z$  координатам, то есть детали со сложнопостроенным (теоретический) профилем. К таким деталям относятся такие детали ГТД, как крыльчатки, моноколеса, лопатки, диски компрессора и турбины, лабиринты.

1.2. Детали должны иметь сложную форму со ступенчатыми криволинейными, сферическими или коническими поверхностями. Данному условию удовлетворяют такие группы деталей, как корпуса, крышки, кронштейны, валы, фланцы, муфты и т.п.

1.3. Обрабатываемая деталь не должна иметь длинных расточек, требующих применения борштанг и расточек внутри детали на большом расстоянии от наружной стенки, так как расточка на станках с ЧПУ производится на коротких жестких оправках, без борштанг. Необходимо предусмотреть уменьшение числа и ширины торцовых подрезок расточным инструментом, или, еще лучше, полное исключение таких подрезок за счет перевода торцовой обработки на фрезерование и зенкерование. Это такие детали, как корпуса и валы. Также следует избегать расточки канавок в отверстиях или, по возможности, уменьшать их размеры и снижать требования к их точности. Там, где это возможно, канавки следует переносить на валы, фланцы.

1.4. Возможность выполнения как можно большего числа обрабатываемых поверхностей за одну установку без перебазирования, например, моноколеса, крыльчатки, лопатки, диски, лабиринты, корпуса, крышки, кронштейны, фланцы, муфты и т.п.

1.5. Требования к соосности отверстий в противоположных стенках по возможности не должны быть жесткими. Обработка этих отверстий производится с поворотом стола на  $180^\circ$ . При этом, если ось отверстий не лежит в вертикальной плоскости, проходящей через ось стола, дополнительно требуется перемещение стола или шпинделя по горизонтальной координате. Естественно, что, несмотря на высокую точность поворота столов, соосность отверстий в противоположных стенках трудно достижима. Данное требование предъявляется в корпусных деталях.

2. Требования по ТПП:

2.1. Детали, требующие при обработке на универсальных станках специальной оснастки и фасонных режущих инструментов.

2.2. Общее число инструментов, требующихся для обработки детали, должно быть по возможности минимальным. Это достигается унификацией размеров отверстий, зенковок, резьб и т.д. Это требование важно для любых станков, однако на станках с автоматической сменой инструментов оно приобретает особое значение, будучи связано с точностью, производительностью и надежностью работы.

2.3. Возможность установки и закрепления детали на столе станка посредством простейших приспособлений (упоров, прихватов и т.д.). На многих станках многоцелевого назначения новую заготовку устанавливают во время обработки предыдущей. В этих случаях сложные быстродействующие приспособления не требуются. Экономия на числе приспособлений, требовавшихся ранее для многократной установки обрабатываемой детали на нескольких универсальных станках, дополняется экономией за счет простоты приспособлений на станках с ЧПУ.

2.4. Следует широко использовать возможности пространственной трехкоординатной обработки деталей на фрезерных станках с ЧПУ, применять равнопрочные сечения, которые обеспечивают плавные переходы от разных толщин стенок, канавок, ребер жесткости, смазывающих каналов и полок, и тем самым уменьшать массу конструкции, а также применять детали, имеющие поверхности двойной кривизны.

3. Требования по организации ТПП:

3.1. Трудоемкость операций на станке с ЧПУ не должна быть ниже 0,1 станко-часа с тем, чтобы можно было организовать многостаночное обслуживание.

3.2. Качество точности обработки не должно превышать точность станка, чтобы можно было совмещать черновые, получистовые и чистовые операции на одном станке.

3.3. Припуск у заготовок деталей должен быть минимальным, а допуск не более  $\pm 0,5$  мм. Твердость заготовок должна колебаться в небольших пределах для того, чтобы можно было регулировать время смены всех инструментов на станке по стойкости. В связи со снижением стоимости механической обработки на станках с ЧПУ по сравнению с универсальным оборудованием во многих случаях следует предусматривать обработку (штампованных и кованных заготовок) не только сопрягаемых поверхностей, но и всех остальных, которые позволят уменьшить массу конкретной детали и снизить требования к точности исходной заготовки.

При проектировании технологических процессов, а также при конструировании изделий, следует заложить самые прогрессивные формы и методы инженерного замысла изготовления деталей и изделий, учитывая, что оператор станка практически не вмешивается в процесс изготовления. Также

необходимо отметить, что при проектировании деталей следует максимально использовать простые и однотипные конструктивные элементы, составленные из прямых линий и окружностей. В пределах одного конструктивного элемента не допускаются сопряжения обрабатываемых и необрабатываемых поверхностей.

## 5. Заключение

1. В станках с ЧПУ сочетается точность и производительность станков-автоматов и гибкость универсального оборудования. Применение станков с ЧПУ позволит сократить цикл проектирования и запуска опытных изделий, а также уменьшить цикл подготовки производства серийных изделий за счет централизованной подготовки производства в процессе проектирования и опытного производства с последующей их передачей в серийное производство. В связи с широким спектром требований к конструкции деталей, обрабатываемых на станках с ЧПУ, разумно пользоваться алгоритмом отработки деталей на технологичность (рис. 7), как на качественную методику оценки;

2. на станках с ЧПУ технологично изготавливать детали сложной пространственной формы, с плоским криволинейным контуром, при обработке деталей с более чем по трем сторонам при максимальной концентрации операций за одну установку. На основании этого разработаны схема влияния обработки на проектирование и изготовление деталей ГТД по применению станков с ЧПУ (рис. 6) и алгоритм отработки детали на технологичность (рис. 7) как ее качественной оценки. Эти разработки позволили дать рекомендации по ряду необходимых требований, которые должны предъявляться к деталям, обрабатываемым на станках с ЧПУ.

## Литература

- Далин В.М., Михеев С.В. Конструкция вертолетов. М., МАИ, 350 с., 2001.
- Зорин А., Родина И., Тагильцев А. Внедрение на ОАО "Авиаагрегат" технологии межоперационного контроля деталей сложной формы на станках фирмы Hermle при помощи ПО PowerINSPECT OMV компании Delcam. САПР и графика, № 9, с.100-103, 2009.
- Игнатов М.Г., Перминов А.Е., Прокофьев Е.Ю. Влияние вектора вертикальной составляющей силы резания на точность и шероховатость обрабатываемой поверхности при встречном фрезеровании. Вестник машиностроения, № 9, с.49-50, 2008.
- Илюхин С.С. Каркасно-кинематический метод моделирования формообразования поверхностей деталей машин дисковым инструментом. Автореферат дис. ... докт. техн. наук. Тула, Тульский ГУ, 39 с., 2002.
- Мельников Г.Н. Точность контурного фрезерования на станках с ЧПУ. Основные направления развития технологии машиностроения. Труды МВТУ, № 348, с.128-135, 1981.
- Обработка сложных деталей авиационной промышленности. Двигатель, № 3, с.28-29, 2009а.
- Обработка сложных деталей авиационной промышленности. Двигатель, № 4, с.32-33, 2009б.
- Эффективное технологическое решение по обработке корпусных деталей летательных аппаратов. Двигатель, № 6, с.22-23, 2009.