



СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
SIBERIAN FEDERAL UNIVERSITY

Ю. И. Гордеев, Е. Г. Зеленкова, В. Б. Ясинский  
**ПРОЦЕССЫ И ОПЕРАЦИИ  
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ  
В АВТОМАТИЗИРОВАННОМ  
ПРОИЗВОДСТВЕ**

**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ**



**ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

УДК 621.7.04(07)  
ББК 34.62-1я73  
Г681

**Р е ц е н з е н т ы :**

Е. А. Шахура, начальник бюро мощностей АО «НПП “Радиосвязь”»;

В. А. Меновщиков, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Общеинженерные дисциплины» ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет»

**Гордеев, Ю. И.**  
Г681      Процессы и операции формообразования в автоматизированном производстве : учеб. пособие / Ю. И. Гордеев, Е. Г. Зеленкова, В. Б. Ясинский. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2021. – 120 с.  
ISBN 978-5-7638-4318-7

Приведены и классифицированы сведения об основных формообразующих операциях, оборудовании, инструментах, применяемых в автоматизированном производстве, в том числе для сложноконтурной профильной обработки. Дано описание новых современных электрофизических методов формообразования и аддитивных технологий. Отражены особенности формирования стратегий и технологий обработки на многоцелевых станках с ЧПУ.

Предназначено для бакалавров и магистрантов, обучающихся по направлениям «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», «Управление качеством», «Метрология, стандартизация и сертификация», «Технологические машины и оборудование», «Информатика и вычислительная техника».

**Электронный вариант издания см.:**  
<http://catalog.sfu-kras.ru>

**УДК 621.7.04(07)**  
**ББК 34.62-1я73**

ISBN 978-5-7638-4318-7

© Сибирский федеральный университет, 2021

---

---

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ И СРЕДСТВА ИХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ .....	6
1.1. Принципы построения процессов и операций формообразования резанием на станках с ЧПУ .....	6
1.2. Процессы электрофизической и электрохимической обработки сложнопрофильных деталей .....	17
1.3. Аддитивные технологии 3D-печати .....	32
2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССОВ И ОПЕРАЦИЙ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ НА МНОГОЦЕЛЕВЫХ СТАНКАХ.....	52
2.1. Формообразующие движения, кинематика и инструмент .....	52
2.2. Инструментальная оснастка многоцелевых станков с ЧПУ .....	70
2.3. Выбор конструкции сменных многогранных неперетачиваемых пластин для сборного инструмента различного назначения .....	86
3. ПОЛУЧЕНИЕ СЛОЖНЫХ ОБЪЕМНО-ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ФОРМ И ПОВЕРХНОСТЕЙ НА СТАНКАХ С ЧПУ .....	95
3.1. Особенности разработки технологических процессов обработки резанием на станках с ЧПУ .....	95
3.2. Возможности САПР ТП «ВЕРТИКАЛЬ» при разработке технологических процессов обработки материалов резанием.....	109
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	115
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	116

---

---

## ВВЕДЕНИЕ

Основной тенденцией повышения технико-экономических показателей процессов формообразования является комплексное использование современных высокопроизводительных станков, сборного инструмента с увеличенной эксплуатационной стойкостью за счет оснащения сменными твердосплавными многогранными пластинами со сложной геометрией режущей части, а также новых безлезвийных электрофизических методов. Усложнение кинематики формообразующих движений, повышение скорости резания при обработке, совмещение отдельных операций на многоцелевых станках, расширенное использование современных цифровых технологий диктуют необходимость использования новых подходов к решению задач построения технологических процессов обработки материалов резанием. Постоянное развитие учения о свойствах и механизмах деформации материалов, появление новых методов расчета и конструирования изделий сложной пространственной формы, новых типов формообразующего оборудования, в том числе многоцелевых станков с числовым программным управлением, предъявляют дополнительные повышенные требования к технологическим процессам изготовления деталей.

Современный уровень развития техники характеризуется существенным увеличением диапазона и усложнением форм используемых рабочих поверхностей деталей и одновременным повышением требований к точности их обработки. Устойчивая тенденция к усложнению формы и геометрической структуры рабочих поверхностей деталей и к ужесточению требований к точности их формообразующей обработки наблюдается в течение длительного периода времени. По оценкам экспертов, около 10 % деталей машиностроения ограничиваются поверхностями сложной формы, и эта доля постоянно увеличивается по мере совершенствования автоматизированных систем конструирования и изготовления – систем класса CAD/CAE/CAM (Computer-Aided Design/Computer-Aided Engineering/Computer-Aided Machining).

Многокоординатная обработка деталей с рабочими поверхностями такого типа отличается нестационарностью всех ее основных параметров: сечения срезаемого слоя, текущих векторов и численных значений скорости и сил резания, кинематических геометрических параметров режущих кромок инструмента и др.

Отличием процессов формообразования поверхностей резанием в автоматизированном производстве является также то, что сложные поверхности деталей обрабатываются методом построчного огибания на оборудовании, имеющем 4–6 и более одновременно управляемых от системы ЧПУ координат. Аналитическое описание конструкции детали и выбор стратегии процесса формообразования сложных поверхностей на многокоординатных станках с ЧПУ представляет собой многофакторную проблему.

Материал, изложенный в данном учебном пособии, основан на проведенных в нашей стране и за рубежом исследованиях и разработках прикладного характера, способствует пониманию современных тенденций в развитии и совершенствовании высокопроизводительных автоматизированных процессов и технологий формообразования, созданию и использовании нового поколения инструментальных композиционных материалов и сложнопрофильных режущих инструментов на их основе.

---

---

# 1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ И СРЕДСТВА ИХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

## 1.1. Принципы построения процессов и операций формообразования резанием на станках с ЧПУ

Формообразование – это процесс, связывающий геометрию поверхностей деталей и инструментов и кинематику их относительного движения в процессе обработки.

Теория формообразования поверхностей при механической обработке деталей изучает геометрические и кинематические аспекты методов и средств обработки поверхности детали с целью синтеза наиболее эффективной технологии изготовления деталей и изделий в машиностроении.

Совершенствование известных и разработка новых способов формообразования сложных поверхностей деталей базируются на точном описании формы детали и исходной инструментальной поверхности и разработке на этой основе рациональной кинематической схемы. Удачная параметризация формообразующих поверхностей деталей на ее 3D-модели упрощает процедуру разработки управляющей программы для станков с ЧПУ. Задача параметризации усложняется тем, что сложноконтурные криволинейные поверхности зачастую не поддаются строгому математическому описанию. Поэтому на практике эта задача решается за счет использования аппроксимирующих сплайн-функций по фрагментам поверхностей и дискретном задании формообразующей поверхности. При этом необходимо учитывать также, что в процессе обработки требуется корректировка величины припуска на срезаемый слой материала, а значит, и режимов резания. Система управления станков с ЧПУ может интерполировать реально заданный профиль детали, изменять скорость и ускорение при обработке, изменять толщину срезаемого слоя, стабилизировать усилия резания на инструмент.

Основные операции формообразования лезвийной обработки резанием, используемые в машиностроении в настоящее время, приведены на рис. 1.

*Анализ сложнопрофильных деталей для многокоординатной обработки.* Высокотехнологичное машиностроительное производство предъявляет повышенные требования к конструкциям и кинематике многоцелевых станков, что объясняется прежде всего сложной пространственной формой поверхностей деталей машин (рис. 2).

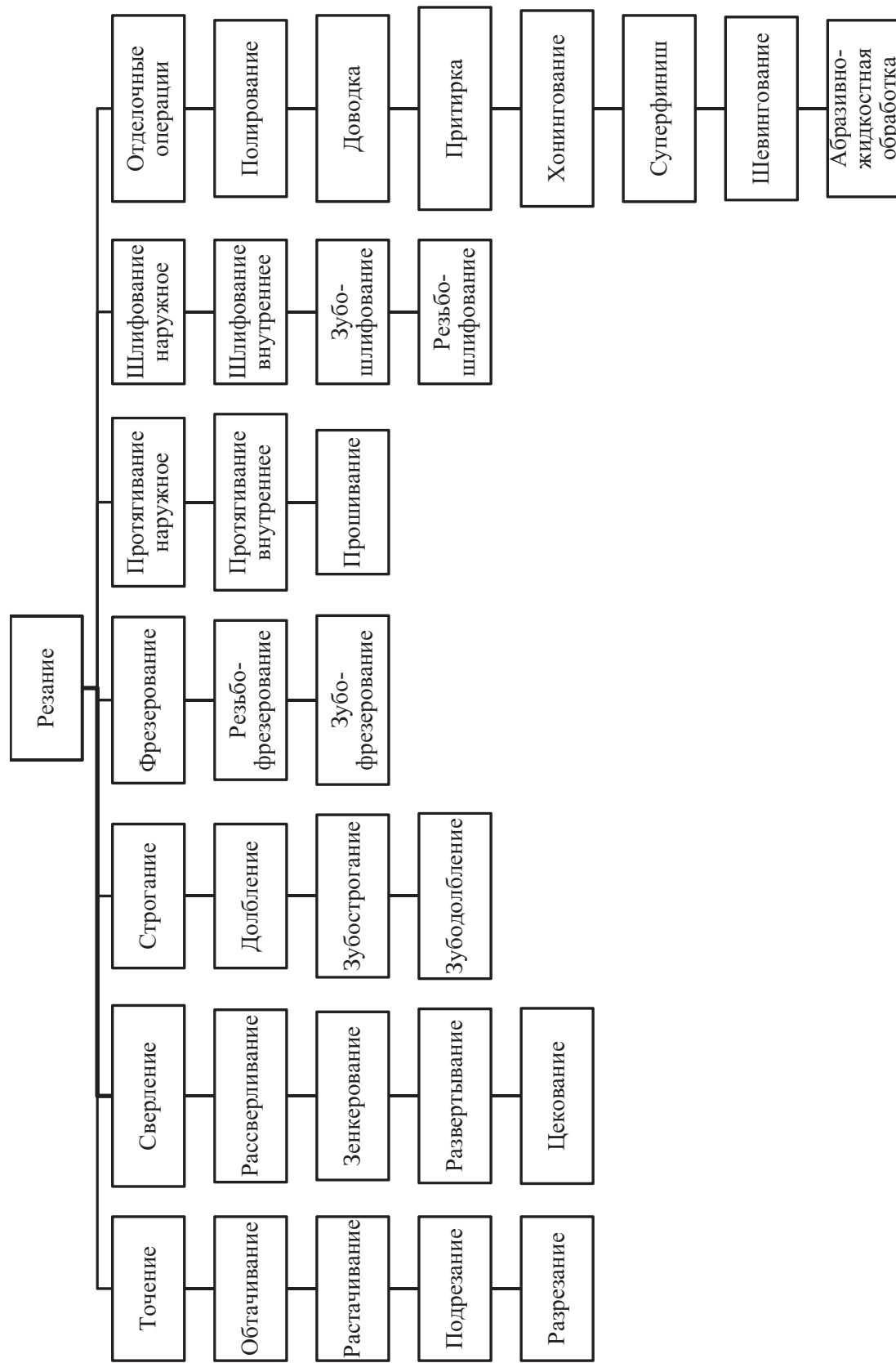
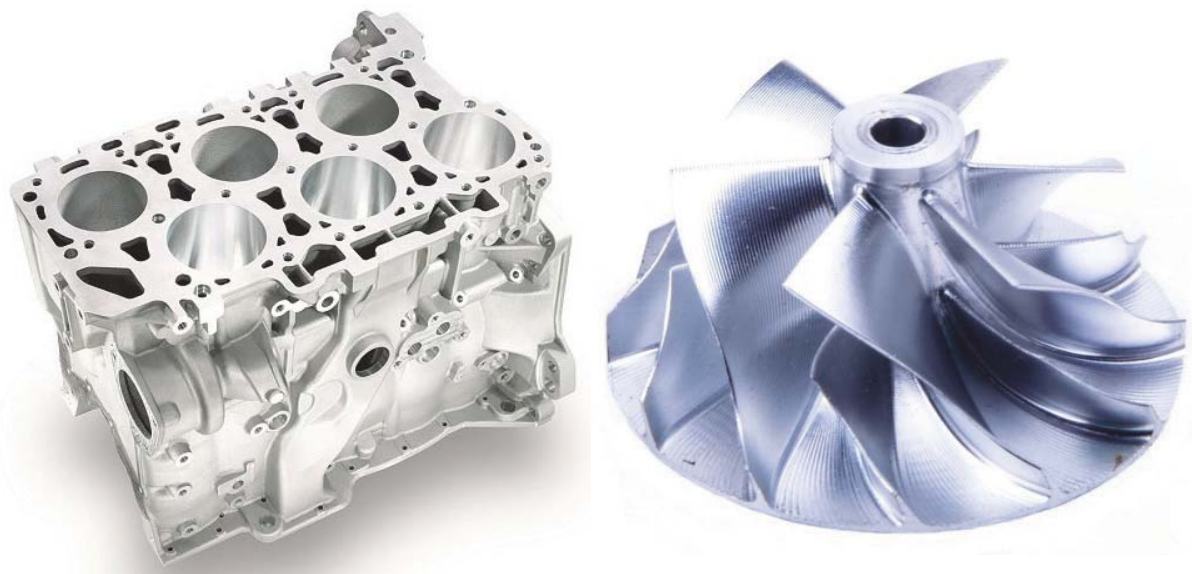
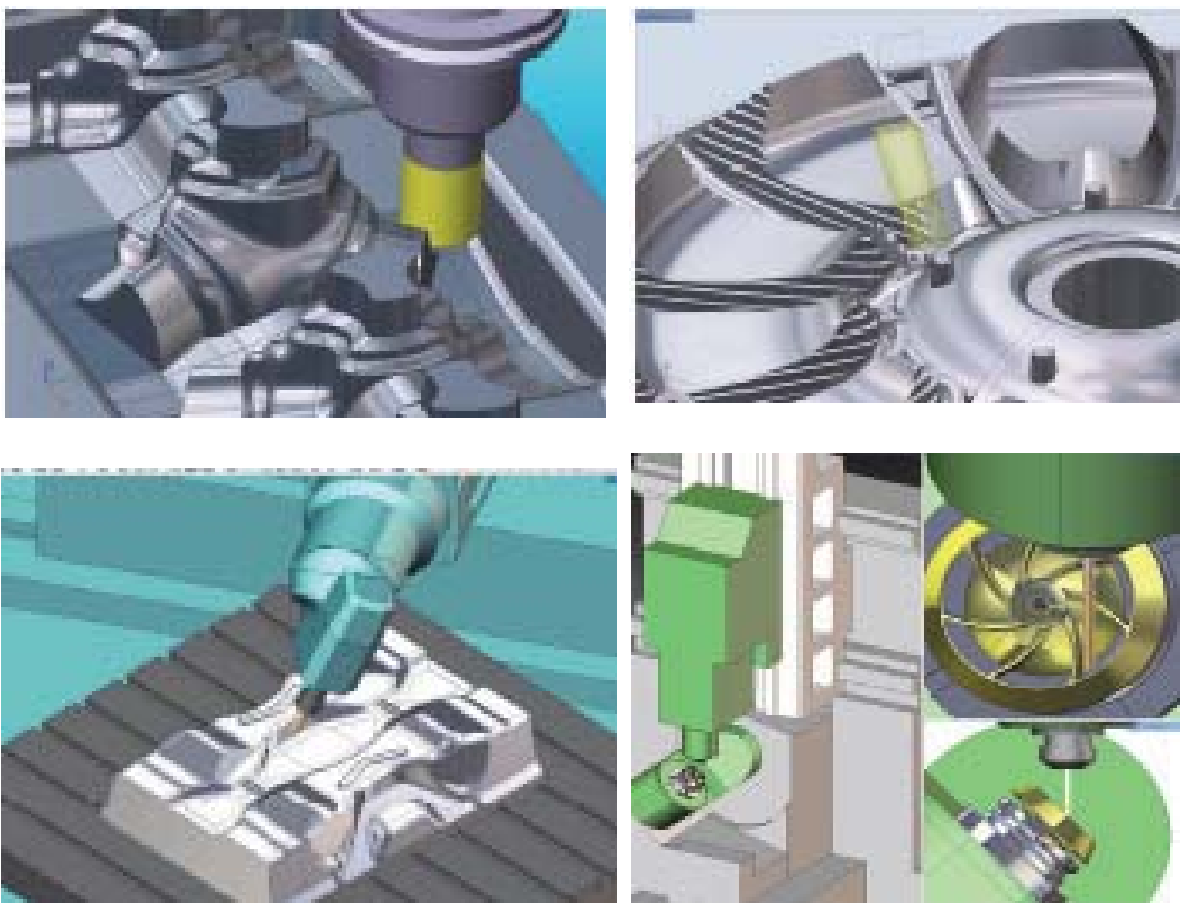


Рис. 1. Способы обработки резанием



*a*



*б*

Рис. 2. Детали (а) и примеры обработки (б) сложнопрофильных поверхностей



Пространственная сложность поверхностей деталей такого типа определяется следующими особенностями:

1. Они состоят из поверхностей двойной кривизны. Это не позволяет при расчёте траектории движения инструмента использовать традиционные методы перемещения инструмента напроход, характерные для обычных универсальных станков. Для точного определения координат точек, положения и наклона инструмента (исходная инструментальная поверхность) необходимо предварительно установить координаты точек на поверхностях и направления нормалей в них с помощью созданной 3D-модели.

2. Расположение поверхностей характеризуется образованием «теневых зон» и поднутрений, криволинейностью контура по трем осям, что приводит к технологическим проблемам при их обработке (формообразовании). Необходимо предусмотреть такой наклон инструмента, чтобы исключить контакт – касание периферийной части инструмента соседних поверхностей.

3. Непостоянство размеров сложного объемного профиля, переменная жесткость детали и геометрическо-технологическая связанность формообразующих движений станка и инструмента требуют проведения соответствующей корректировки при разработке управляющих программ и стратегий обработки.

Детали сложной формы могут быть обработаны на станках с многокоординатной кинематикой и элементами, расширяющими их формообразующие возможности за счет изменения угловой ориентации инструмента и заготовки в процессе обработки (рис. 3). Многокоординатный станок может быть также оснащен дополнительными элементами высокотехнологичной оснасткой в виде глобусных столов и (или) поворотных инструментальных головок.

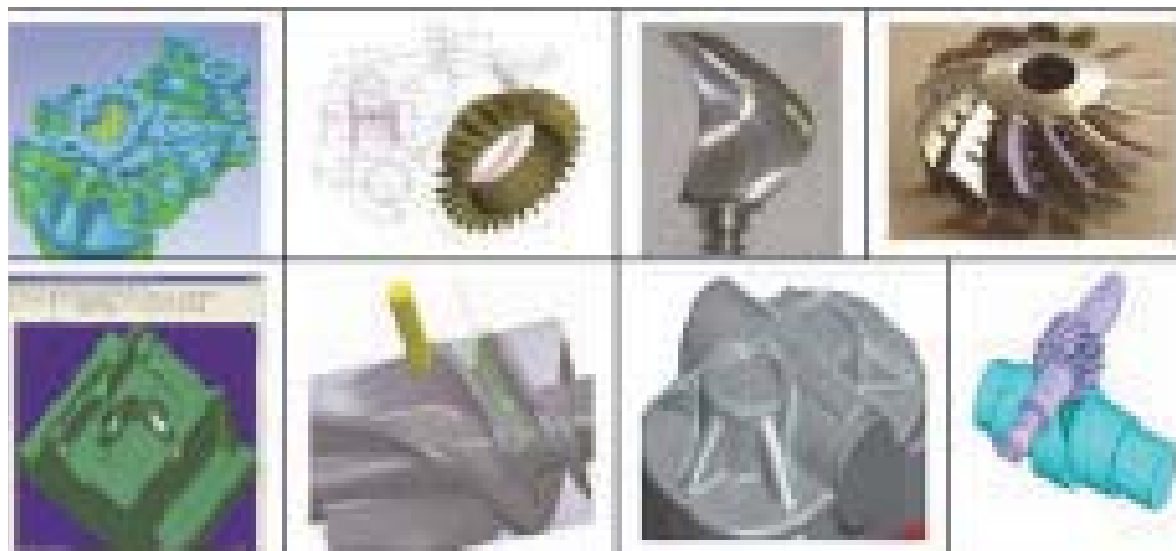
4. Производство сложнопрофильных деталей основано на IT-технологиях, объединяющих конструкторско-технологическую подготовку (CAD-CAE-CAM) в единую иерархическую систему.

Таким образом, для эффективного управления формообразованием и точностью требуется разработка методов аналитического описания криволинейных сложнопрофильных поверхностей топологически сложных деталей.

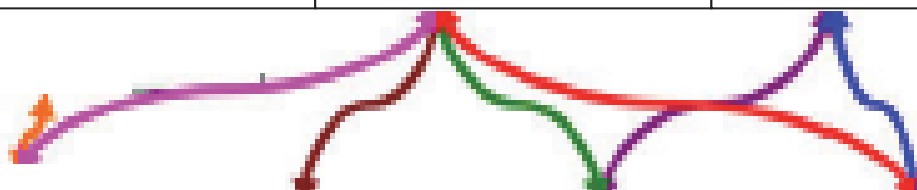
Для обеспечения точности обработки таких деталей должна быть учтена кинематика пространственного перемещения многосвязного механизма станка, в котором проявляются его точностные параметры и рабочие характеристики.

Примерный алгоритм проведения анализа и синтеза обрабатывающей технологической системы для обработки деталей с пространственными криволинейными поверхностями приведен на рис. 4.

Машиностроительные высокоответственные детали  
(сложнопрофильные, прецизионные, труднообрабатываемые)



Сложнопрофильность и множественность рабочих и базирующих поверхностей	Точность и качество поверхностей	Обрабатываемость материала
--	----------------------------------	----------------------------



Многокоординатная кинематика (формообразование возможностей)	Прецизионность	Энергетическая (P-T), кинетическая (V-S) характеристики	Режущая способность
Требуемые технические возможности обрабатывающей системы			

Типы высокотехнологичных деталей:

- 1 – крупногабаритные сложнопрофильные детали типа «пресс-форма», «головка блока цилиндра»;
- 2 – детали с крупным периодически криволинейным профилем типа импеллера (крыльчатки, лопатка турбины, лопасть винта);
- 3 – детали с мелким периодически криволинейным рабочим профилем (зубчатые детали)

Рис. 3. Признаки классификации сложнопрофильных деталей

При этом в этой многоуровневой иерархической структуре обеспечивается взаимосвязанное соответствие топологии и свойств инструмента кинематическим характеристикам привода станка при информационно-математическом обеспечении формообразования в системе ЧПУ.

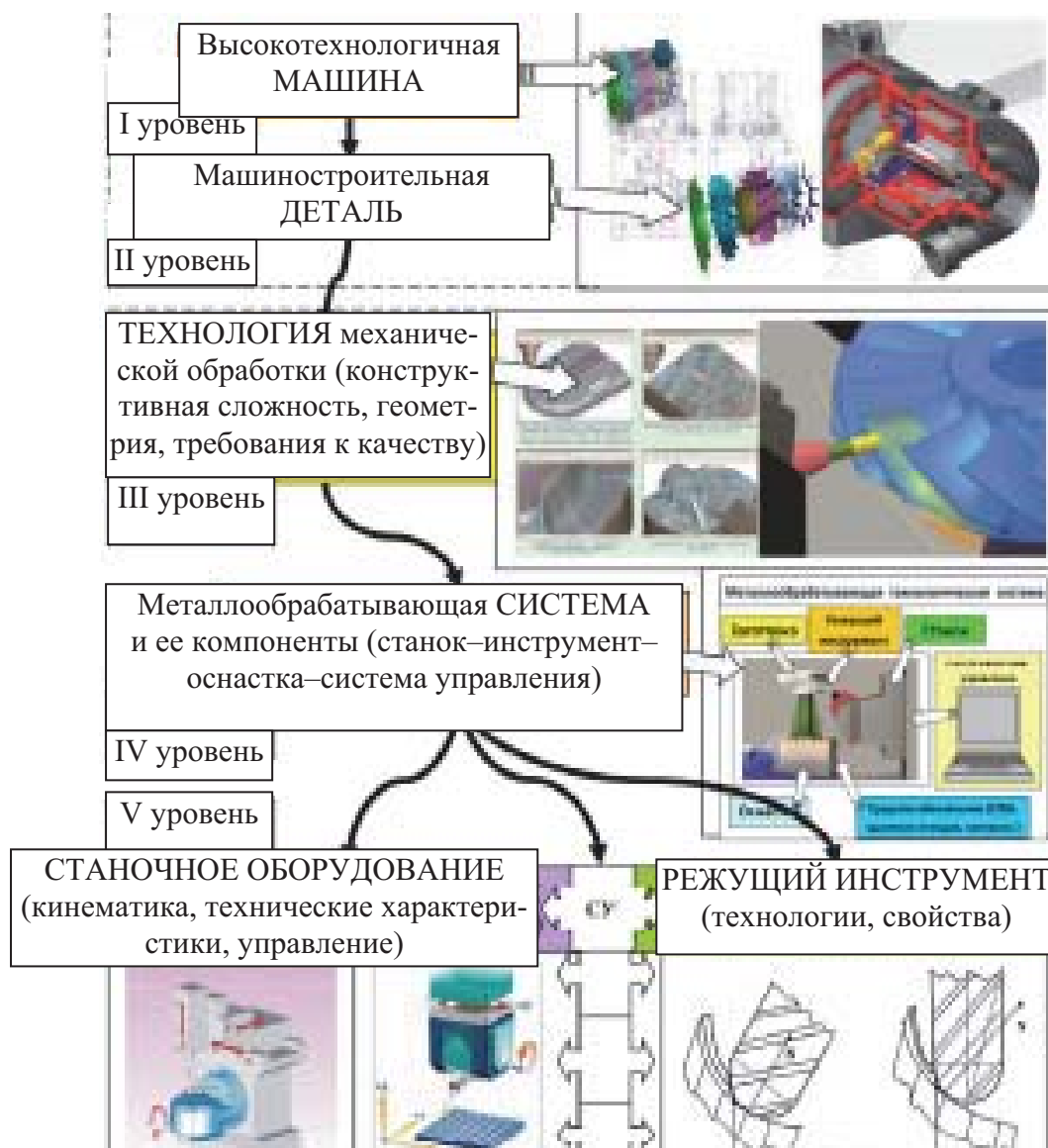


Рис. 4. Идентификация характеристик многоосевых станков для обработки сложнопрофильных деталей

**Оборудование для многокоординатной технологии формообразования.** Трехкоординатные станки имеют последовательную кинематику, реализованную через замкнутую цепь двух или более ветвей (инструмента и заготовки), разделенных неподвижным базис-блоком. Станок представляет из себя совокупность подвижных узлов, соединяющих базис с конечным звеном станка, несущим инструмент или заготовку. Заготовка и инст-

румент закрепляются в конечных звеньях ветвей компоновки, а их относительная подвижность обеспечивает сложнопрофильное формообразование при условии согласования по определенному закону скоростных параметров движений кинематических пар (интерполяции движений по разным осям). Двухосевая интерполяция дает плоскоконтурное формообразование, одновременно согласовывая две линейные оси. Трехосевая интерполяция дает пространственное формообразование в трехмерном объеме декартовой системы координат, одновременно согласовывая три линейные оси XYZ.

Как правило, многокоординатная обработка начинает свое исчисление с 4-х координат, одновременно интерполируемых с помощью системы ЧПУ станка. К традиционной трехкоординатной интерполяции линейных движений по трем осям XYZ (Px, Py, Pz) добавляется поворот относительно одной из этих осей (Vx, Vy, Vz) применением специальной оснастки: двухкоординатных инструментальных головок и (или) глобусных столов (рис. 5). Любое интерполяционное «добавление» к этой системе вращательного движения относительно одной из осей увеличивает степень многокоординатности на соответствующее число степеней подвижности. Наиболее распространенная пятикоординатная обработка включает одновременное согласование при резании трех линейных осей (Px, Py, Pz) и двух поворотных осей (Vx, Vz), см. рис. 6.

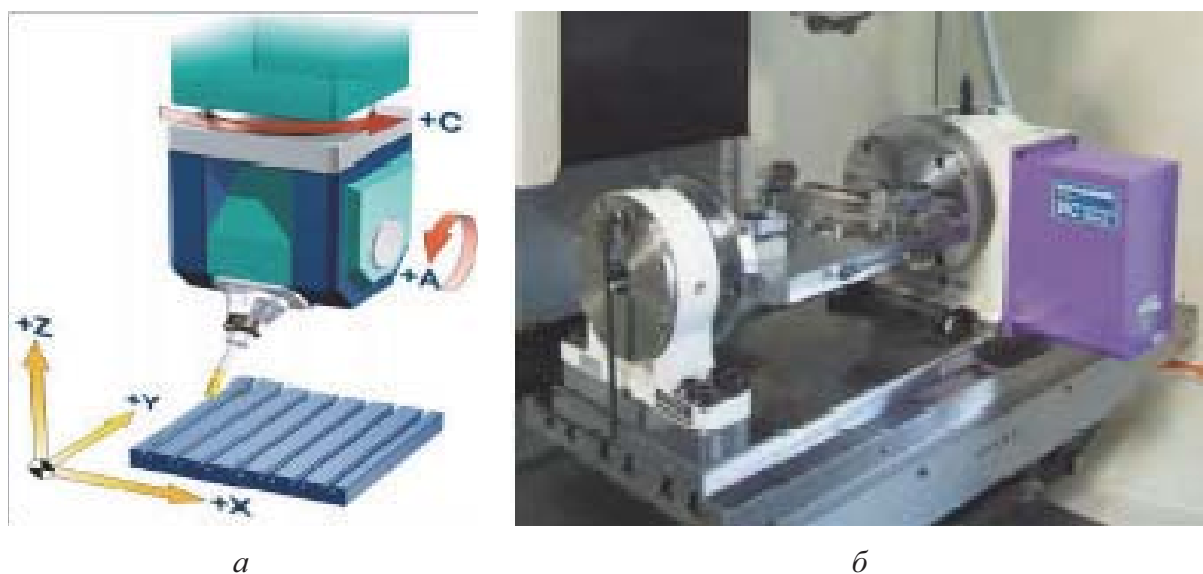


Рис. 5. Спецоснастка станков для многокоординатной обработки:  
*а* – двухкоординатная поворотная головка; *б* – поворотный стол

Распределение этих подвижностей по ветвям компоновки станка не имеет значения, так как результирующая степень подвижности последовательной кинематической станочной системы определяется как сумма степеней подвижности ветвей, поскольку каждая кинематическая пара имеет