

А.Р. Маслов

**РЕЗАНИЕ МЕТАЛЛОВ  
В АВТОМАТИЗИРОВАННОМ  
ПРОИЗВОДСТВЕ**

*Учебное пособие для бакалавров*

**Ай Пи Ар Медиа  
Москва • 2021**

УДК 621.9

ББК 34.63

М31

**Автор:**

*Маслов А.Р.* — д-р техн. наук, проф. кафедры МТ-2  
факультета МТ МГТУ им. Н.Э. Баумана

**Маслов, А.Р.**

**М31** Резание металлов в автоматизированном производстве : учебное пособие для бакалавров / А.Р. Маслов. — Москва : Ай Пи Ар Медиа, 2021. — 300 с. — Текст : электронный.

ISBN 978-5-4497-0839-7

В учебном пособии изложены особенности процессов обработки резанием в условиях автоматизированного производства (АП), включающего автоматическое металлорежущее оборудование с компьютерными системами управления и развитое технологическое оснащение. Показаны основные направления развития процессов обработки резанием с позиции обеспечения их высокой надежности. Освещены: современный подход к инструментальному обеспечению АП; методы повышения надежности работы режущего инструмента; основы выбора режущего инструмента по критерию минимальной себестоимости деталей при их автоматическом производстве; методика назначения режимов обработки резанием в автоматизированном производстве.

Подготовлено с учетом требований Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования.

Учебное пособие будет полезно при изучении дисциплин «Режущий инструмент», «Современные инструментальные материалы в процессах резания», «Современные материалы в машиностроении» студентами направления подготовки 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

*Учебное электронное издание*

© Маслов А.Р., 2021

© ООО Компания «Ай Пи Ар Медиа», 2021

Редактор *А.Д. Матлахова*  
Технический редактор, компьютерная верстка *Г.И. Иванова*  
Корректор *Т.Г. Саблина*  
Обложка *С.С. Сизиумовой*

Подписано к использованию 09.12.2020. Объем данных 14 Мб.

Издание представлено в электронно-библиотечных системах  
**IPR BOOKS** ([www.iprbookshop.ru](http://www.iprbookshop.ru)),  
**Библиокомплектатор** ([www.bibliocomplectator.ru](http://www.bibliocomplectator.ru))

Бесплатный звонок по России: **8-800-555-22-35**  
Тел.: 8 (8452) 24-77-97, 8 (8452) 24-77-96

*Отдел продаж и внедрения ЭБС:*  
*доб. 206, 213, 144, 145*  
*E-mail: [sales@iprmedia.ru](mailto:sales@iprmedia.ru)*

*Отдел комплектования ЭБС:*  
*доб. 224, 227, 208*  
*E-mail: [mail@iprbookshop.ru](mailto:mail@iprbookshop.ru)*

**По вопросам приобретения издания обращаться:**  
доб. 208, 201, 222, 224  
E-mail: [izdat@iprmedia.ru](mailto:izdat@iprmedia.ru), [author@iprmedia.ru](mailto:author@iprmedia.ru)

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	6
<b>ГЛАВА 1. ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА</b> .....	7
1.1. Задачи автоматизированного производства .....	7
1.2. Система инструментального обеспечения.....	10
1.3. Методы выбора инструмента .....	23
1.4. Типизация технологических циклов обработки резанием.....	29
<b>ГЛАВА 2. ДОСТИЖЕНИЕ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ, ОБРАБАТЫВАЕМЫХ РЕЗАНИЕМ</b> .....	44
2.1. Показатели качества.....	44
2.2. Экономические критерии качества .....	51
2.3. Обеспечение надежности деталей .....	52
2.4. Повышение качества деталей.....	54
<b>ГЛАВА 3. НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ</b> .....	57
3.1. Системный анализ технологических систем .....	57
3.2. Виды повреждений и отказов режущего инструмента .....	59
3.3. Системный подход к инструменту .....	65
3.3.1. Анализ условий эксплуатации .....	65
3.3.2. Оценка качества системы инструмента .....	71
3.3.3. Особенности инструмента для автоматизированного производства .....	77
<b>ГЛАВА 4. СОВРЕМЕННЫЕ РЕЖУЩИЕ МАТЕРИАЛЫ</b> .....	83
4.1. Быстрорежущие стали.....	87
4.2. Твердые сплавы .....	90
4.2.1. Области применения твердых сплавов.....	94
4.2.2. Твердые сплавы с износостойкими покрытиями .....	97
4.2.3. Ультрамелкозернистые твердые сплавы .....	104
4.3. Керметы.....	106
4.4. Режущая керамика.....	111
4.5. Сверхтвердые материалы .....	126
<b>ГЛАВА 5. ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТА</b> .....	134
5.1. Нанесение износостойких покрытий .....	136
5.2. Химическое осаждение покрытий.....	141

5.3. Физические методы осаждения покрытий.....	147
5.4. Особенности эксплуатации режущего инструмента с покрытием .....	155
<b>ГЛАВА 6. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ ИНСТРУМЕНТ .....</b>	<b>158</b>
6.1. Точность и жесткость закрепления инструмента .....	161
6.2. Специальные конструкции вспомогательного инструмента.....	166
<b>ГЛАВА 7. ДИАГНОСТИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ИНСТРУМЕНТА ....</b>	<b>176</b>
7.1. Разработка систем диагностирования .....	176
7.2. Диагностирование процесса резания .....	180
7.3. Выявление отказа инструмента .....	201
7.4. Диагностирование по результатам обработки .....	209
<b>ГЛАВА 8. АВТОМАТИЧЕСКАЯ СМЕНА ИНСТРУМЕНТА .....</b>	<b>216</b>
8.1. Устройства для автоматической смены инструмента .....	216
8.2. Контроль смены инструмента.....	225
<b>ГЛАВА 9. ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ В АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ.....</b>	<b>236</b>
9.1. Обработка тел вращения.....	240
9.2. Обработка корпусных деталей.....	244
<b>ГЛАВА 10. НАЗНАЧЕНИЕ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ .....</b>	<b>253</b>
10.1. Группирование материалов по обрабатываемости.....	253
10.2. Выбор режущего материала .....	264
10.3. Оптимизация режимов резания .....	275
<b>ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>295</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Современное технологическое оборудование для обработки резанием деталей машиностроения отличается высоким уровнем автоматизации. Автоматизированное производство включает в себя автоматические металлорежущие станки с компьютерными системами управления и развитое технологическое оснащение.

На станках осуществляется автоматическая смена заготовок с помощью транспортно-складских систем, включающих в себя роботов. В инструментальную оснастку входят, помимо высокопроизводительного режущего и вспомогательного инструмента, устройства автоматической смены инструмента и системы диагностирования и контроля процессов резания. Вне станков осуществляется подготовка инструмента к работе в системе инструментообеспечения, состоящей из сборки, настройки инструмента, его кодирования и доставки к станкам.

Эти процессы осуществляются в едином информационном поле автоматизированной системы управления производством. Важным элементом информационного обеспечения современного автоматизированного производства является накопление в базах данных технологической информации об эксплуатационных свойствах применяемых инструментов по результатам выполненных процессов обработки. Это позволяет автоматически корректировать технологические процессы в направлении повышения их надежности и, как следствие, роста их эффективности.

Данное учебное пособие написано в соответствии с программой подготовки специалистов по направлению 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств». Издание может быть рекомендовано также для подготовки специалистов по машинам и технологиям высокоэффективных процессов обработки материалов.

Материалы учебного пособия способствуют:

- **получению знаний** о методах повышения надежности работы режущего инструмента;
- **развитию умений** выбора режущего инструмента по критерию минимальной себестоимости деталей при их автоматическом производстве;
- **овладению** методикой назначения режимов обработки резанием в автоматизированном производстве.

# ГЛАВА 1. ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА

## 1.1. Задачи автоматизированного производства

Основной задачей современного автоматизированного производства (АП) является достижение «безлюдности». Близка к ней и задача создания технологии, при которой не требуется проводить отладочные работы непосредственно на рабочих позициях. Это относится как к основному технологическому процессу (отладке режимов обработки, числа проходов, траектории инструмента), так и к вспомогательным (например, программированию траектории движения схватов промышленных роботов без обучения).

Для автоматических линий массового производства отладка спроектированного технологического процесса была необходимым этапом. В современных узкономенклатурных АП отладка технологического процесса нежелательна, но допустима, поскольку сменяемость номенклатуры мала. Для широкономенклатурных АП, характеризующихся частой сменой объектов производства, длительные периоды отладки процесса приводят к значительному снижению эффективности.

Решение этих задач, от которых зависит эффективная работа АП связано с большими трудностями и возможно только при реализации комплекса мероприятий, основанных на новейших технологических разработках и максимальном использовании возможностей имеющихся технических средств. Наиболее реальным путем является стабилизация отклонений входных технологических параметров следующими способами: разработкой и совершенствованием технологических процессов получения заготовок и инструмента со стабильными техническими характеристиками; уменьшением разброса параметров оборудования и инструментальной оснастки и т.п.

Однако обеспечить технологическую надежность АП только такими способами вряд ли возможно. Поэтому разрабатывают новые методы проектирования технологических процессов и управления ими. В условиях отсутствия контроля со стороны операторов в основе этих методов лежит широкая информационная обеспеченность, которая базируется в первую очередь на внедрении систем диагностирования режущего инструмента на всех этапах его использования.

Для диагностирования процессов обработки в современном АП используют силовые параметры процесса, температуру в зоне обработки, низкочастотные вибрации, оптические, акустические, электромагнитные и электронно-эмиссионные методы. Уровень теоретических и экспериментальных исследований в этих

областях позволяет сегодня оценивать отдельные (в основном, геометрические и силовые) параметры процессов в узком диапазоне изменения условий.

Для диагностирования такого сложного процесса, как процесс резания, созданы интегральные методы оценки его состояния, позволяющие фиксировать начальное состояние и анализировать динамику развития с помощью ЭВМ. Исследования показали, что в этом случае, как и при косвенном контроле технологических параметров, повышается достоверность измерений с помощью многопараметрического контроля с последующей алгоритмической обработкой. Наличие в составе АП управляющего вычислительного комплекса позволяет эффективно использовать такой метод, с учетом корреляционных связей. При этом могут варьироваться не только параметры, но и состав используемой информации и алгоритмы ее обработки. Возрастающий объем информации о состоянии процессов резания усложняет передачу этой информации от объекта и в центральную управляющую ЭВМ, что требует новых информационных технологий.

Информационная обеспеченность является первым шагом в создании активно-управляемой технологии, в которой проектирование и управление технологическими процессами основаны не только на исходной, но и на непосредственно получаемой в процессе эксплуатации рабочей информации. Последняя является основой создания информационных систем управления. Подобные системы разрабатывались и для обычных станков с ЧПУ, но не получили широкого развития из-за их недостаточной гибкости (связанной с аппаратными принципами реализации) и вследствие малой эффективности в условиях многономенклатурного производства. В АП их эффективность существенно повышается, поскольку основное время становится преобладающим в рабочем процессе изготовления изделий.

Помимо непосредственного повышения экономических показателей информационные системы позволяют повысить надежность управления технологическими процессами в условиях «безлюдной технологии». Эти системы основаны на программно-аппаратных принципах, что упрощает их техническую реализацию и обеспечивает необходимую приспособляемость к изменяющимся в широком диапазоне условиям производства.

Оптимизация основного технологического процесса обеспечивает значительный прирост эффективности АП. Она достигается поиском оптимальных решений технологических задач на всех уровнях и этапах подготовки производства. Этому способствует автоматизация систем технологической подготовки и управ-



лении, позволяющая вырабатывать наиболее эффективное, однозначное и взаимосвязанное решение технологических задач на основе принципа оптимальности.

Справочная информация для расчетов траектории движения инструмента и режимов резания хранится в базе технологических данных. Для повышения надежности проектирования используются типовые решения, входной контроль и коррекция содержания базы данных.

Применение входного контроля заготовок и инструмента позволяет уточнять расчетные параметры и уменьшать их вероятный разброс, не пропускать на позиции обработки инструмент и заготовки, не удовлетворяющие заданным требованиям. Часть данных, полученных в результате входного контроля (в основном часто изменяющихся), используют для адаптивного управления процессом резания.

Увязка физических и технологических параметров процессов резания позволяет повысить точность путем организации многопараметрического контроля, разработать алгоритмическое и программное обеспечение систем контроля, создать специальные испытательные стенды.

Значительным резервом повышения технологической надежности АП является уточнение расчетных параметров на основе статистической обработки информации, получаемой в ходе выполнения типовых технологических переходов.

Новые методы проектирования и управления реализуют основные принципы технологии АП позволяют повысить надежность проектных решений, повысить эффективность и надежность технологических процессов в условиях переналаживаемых производств, снизить трудоемкость отладочных работ.

Дополнительные затраты на «гибкость» АП приводят к значительному увеличению стоимости станко-часа. Поэтому возникает необходимость в решении комплекса организационных и информационных задач, направленных на интенсификацию эксплуатации АП.

Эти задачи относятся, в том числе, к инструментальной оснастке, которая включает в себя режущий и вспомогательный инструмент и должна полностью отвечать условиям и требованиям АП. С одной стороны, это — технические требования, возникающие при выполнении производственных функций с ограниченным вмешательством человека, а с другой стороны — экономические требования, заключающиеся в снижении себестоимости при изготовлении оснастки.

Инструмент серьезно влияет на структуру затрат в АП. Эффективность современных технологических систем определяется не только величиной основного времени, когда наиболее существенным является объем удаляемого материала в единицу времени, но и затратами вспомогательного времени, вре-

мени технического обслуживания и времени на подналадку. Таким образом, переменная доля себестоимости операции, связанная с инструментом, зависит от режимов резания, потерь времени на наладку инструмента на заданные размеры обработки, стоимости инструмента за период его стойкости, а также связана со случайным (преждевременным) выходом инструмента из строя из-за его разрушения или неудовлетворительного формирования стружки.

Повышение экономической эффективности может быть достигнуто с помощью применения инструмента, который обеспечивает увеличение размерной стойкости инструмента, что достигается за счет использования более износостойких материалов и путем нанесения износостойких покрытий.

Возникающие в процессе установки погрешности базирования и погрешности закрепления определяют фактическое положение режущей части инструмента относительно заданного в выбранной системе координат, а в результате упругих, контактных, тепловых деформаций вспомогательных устройств и износа их элементов под влиянием процесса резания происходит дальнейшее изменение режущей части и нарастают погрешности установки. В задачу адаптивного управления входит устранение этих погрешностей.

Некоторые из перечисленных систем и устройств разрабатывались ранее для традиционных производственных систем. Однако для АП характерно объединение их в единую систему технологической подготовки и управления, что позволяет решать задачу создания принципиально новой технологии обработки резанием.

Современное АП может быть определено как компьютерно-интегрированное, связывающее воедино все процессы, необходимые для проектирования и изготовления заданной номенклатуры изделий. Важнейшей составляющей такого производства является интегрированная система проектирования и управления технологическим процессом (технологическая система). В общем случае современная технологическая система включает в себя три зоны: проектирования и планирования технологических операций, изготовления изделий и контроля.

Поскольку рациональная технология – это, прежде всего, рациональное использование инструмента, то в организации технологической системы любого производства основным и определяющим является организация и функционирование инструментального обеспечения (ИО).

## 1.2. Система инструментального обеспечения

Главными *видами обеспечения работы АП* являются: техническое, технологическое, математическое, программное, информационное, лингвистическое, методическое, организационное, экономическое и инструментальное. Они

представляют собой совокупность средств, методов, моделей, документов, показателей, с помощью которых достигается эффективная работа АП. Для инструментального обеспечения средствами являются инструменты, оборудование для их проектирования, изготовления, испытания, ремонта, утилизации; транспорт для доставки, склады для хранения, мерители для настройки, датчики для диагностики, устройства для регулирования; методы представляются способами использования инструментов для получения заданных характеристик изделий по качеству и объемам выпуска; модели чаще всего существуют в виде расчетных формул, чертежей, программ, реализующих методы ЭВМ; документы содержат всю необходимую информацию для совершения действий и их отражения для запоминания; показатели характеризуют эффективность соответствующих видов обеспечения.

В рамках АП как системы ИО представляет собой единую подсистему, имеющую общую цель и поэтому рассматриваемую обособленно в качестве самостоятельной системы. Такое представление о снабжении рабочих мест инструментами возникло в связи с развитием системного подхода к производствам, вызванного автоматизацией. Оно и является основой для системы инструментального обеспечения (СИО), создаваемой в автоматизированном варианте. Происходит интенсивное насыщение инструментального хозяйства автоматами для управления системой, конструирования, изготовления, складирования, перемещения, установки инструментов на станках, их ремонта и утилизации. Количественное наращивание уровня автоматизации должно завершиться качественным скачком в усовершенствовании всей системы. Качественно новое функционирование составляет существо и является коренным отличием СИО от инструментального хозяйства. Путь достижения такого результата лежит через совместное использование накопленного опыта инструментарнообеспечения и последних достижений автоматизации привычно ручных работ, связанных с доставкой, установкой и наладкой инструментов на станине.

Инструментальное обеспечение, по сути, представляет собой действия, направленные на приспособление технологического оборудования для изготовления заданного изделия в установленном режиме работы с получением требуемых качественных и количественных показателей. Для достижения этой цели следует оснастить соответствующим инструментом станки. В связи с этим возникает необходимость в проведении работ по созданию, хранению, учету, доставке и установке технологической оснастки, которая определяется как орудие производства, присоединяемое к технологическому оборудованию для выполнения технологического процесса. Совместное использование автоматического

оборудования и оснастки, обеспечивающее достижение основной цели производства, — выпуск продукции, позволяет применить обобщающий термин — **средства технологического оснащения**. Оно охватывает оборудование, оснастку и устройства механизации и автоматизации. **Оснастка**, в свою очередь, состоит из основных инструментов, осуществляющих непосредственное воздействие, вспомогательных инструментов, определяющих рабочие движения, и приспособлений для закрепления заготовок и деталей.

Подготовка оборудования к выполнению операции связана с проведением работ по установке оснастки, называемых **наладкой**. Таким же термином определяется и результат этих работ. **Подналадка** — это дополнительное регулирование технологического оборудования и оснастки в процессе работы для восстановления достигнутых при наладке значений параметров. **Настройка** — это придание нужного взаимного положения основному и вспомогательному инструментам, а также приспособлениям на станке или вне его.

*Цель ИО* состоит в непосредственном воздействии основных инструментов на обрабатываемые заготовки или собираемые детали для изготовления изделий требуемого качества. На первом месте стоит основное, для чего создаются предприятия: выпуск изделий для удовлетворения общественных потребностей в них. Это достигается в конечном итоге в результате воздействия основных инструментов. Отсюда следует, что современное производство во всей его сложности направлено на осуществление этих воздействий. Можно утверждать, что экономика промышленности определяется степенью совершенства ИО, измеряемой качественными показателями получаемых изделий и производительностью действующего производства.

В результате разделения общей цели на подцели получим следующую их последовательность. Ряд средств, приводящих к непосредственному воздействию на обрабатываемые заготовки и собираемые детали:

- а) выполнение рабочих и холостых движений инструментов;
- б) обеспечение рабочих мест инструментом;
- в) безопасная и эффективная эксплуатация инструмента;
- г) бесперебойное снабжение производства инструментом;
- д) изготовление инструмента;
- е) снабжение материалами и полуфабрикатами;
- ж) обеспечение проведения экспериментальных работ с оснасткой;
- з) проектирование инструмента;
- и) определение потребности в инструменте;
- к) информационное обеспечение инструментального хозяйства;
- л) управление процессом ИО.

Каждой подцели должно соответствовать определенное действие системы. Отсюда выявляется состав функций системы и устанавливается основная последовательность их выполнения. В результате создается функциональная модель СИО, которая может иметь различную форму представления: в виде словесного описания, аналитической формулы, логической зависимости, графической схемы. Последняя оказывается предпочтительной по двум причинам: удобство восприятия человеком и простота перехода от нее к программе реализации модели на ЭВМ.

Графическая форма в виде чертежей, структурных схем, графиков функциональных зависимостей дает возможность воспринять модель во всей ее взаимосвязи, осуществлять преобразования для получения выводов, последовательно уточнять закономерности в частностях. Теория графов вводит строгую логику в преобразования и обеспечивает доказательность выводов.

Реализация модели на ЭВМ является конечной целью работ, проводимых по автоматизации СИО. Гибкая СИО, построенная на основе вычислительной техники, сокращает запасы инструментов, повышает коэффициент их использования, уменьшает время на поиск и заказ нужных инструментов. Без этого безвозвратно теряется 30–60 % инструментальных запасов; идет накопление инструментов главным образом на рабочих местах; операторы тратят до 20 % времени на поиск режущих инструментов. Кардинальное решение указанных проблем возможно только с применением ЭВМ. Для этого используют базы данных для нескольких тысяч стандартных режущих инструментов, идентифицированных номером детали, номером инструмента, кодом групповой технологии. Их применение позволяет сократить запасы инструментов на 60 %, а коэффициент использования инструмента повышается с 70 до 99 %. При этом устраняется дублирование заказов на инструмент, сокращаются запасы инструментов и площадь складов, уменьшается время обучения операторов инструментального хозяйства с шести месяцев до трех недель.

В функциональной модели, представленной на рис. 1.1, функции СИО записаны в прямоугольных блоках, а дуги в виде стрелок показывают взаимосвязи их выполнения. Каждая функция обеспечивает достижение своей подцели. Однако порядок их расположения на схеме изменен на обратный относительно ряда подцелей, т.е. показывает прямое направление последовательности действий от начального этапа управления системой (блок 1) до конечного выполнения рабочих и холостых ходов (блок 13). Используют два типа линий для соединения блоков: *одинарные* — информационные потоки и *двойные* — материальные потоки. Для увеличения информационного содержания схемы над со-

единительными линиями указаны основные документы или изделия, которыми завершаются функции и через которые идет информационный и материальный обмен между блоками.

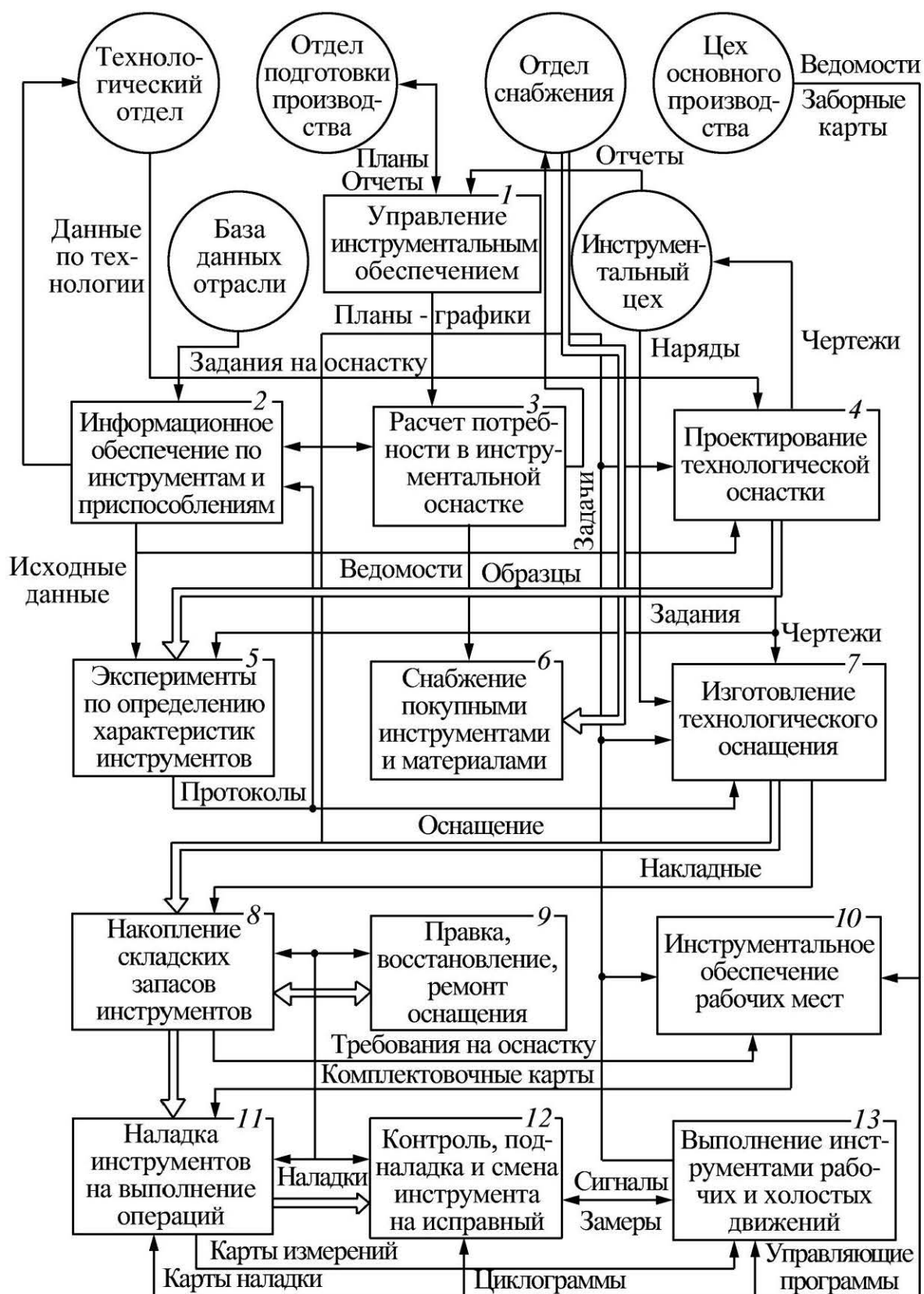


Рис. 1.1. Структурная схема функций системы инструментального обеспечения

Внешние по отношению к СИО системы представлены на схеме в кружках. Отдел подготовки производства, выпуская соответствующий план, определяет начало работ по ИО. Блок 1 координирует выполнение всех функций созданием планов-графиков, доводимых до каждого блока по линиям связи. Выполнение их контролируется обратными связями, данные которых сводятся в общий отчет, направляемый в отдел. Все остальные работы в СИО определяются схемой со степенью подробности, достаточной для высшего уровня моделирования.

Следующий уровень моделирования, детализирующий функции системы, связан с выделением задач инструментального обеспечения. Для этого прежде всего в каждой функции определяются задачи, которые сводятся в общий перечень (табл. 1.1).

*Таблица 1.1*

### **Перечень задач системы инструментального обеспечения**

<b>Функция</b>	<b>Задача</b>
Управление ИО	Планирование работ Контроль выполнения планов Оперативное регулирование процесса
Информационное обеспечение по инструментам и приспособлениям	Учет расходования инструментов Учет складских запасов и оборотных фондов Исходные данные для проектирования инструмента Каталоги типового инструмента Типовые инструкции по проектированию и эксплуатации инструмента
Расчет потребности в инструментальной оснастке	Статистика потребления инструмента Прогнозирование потребности инструмента Анализ заявок на ИО Расчет потребности в ИО по этапам работ
Проектирование технологической оснастки	Разработка ТЗ на оснастку Проектирование агрегатов оснастки Конструирование оснастки
Экспериментальное определение характеристик инструментов	Макетирование сложного инструмента Проведение вычислительных экспериментов Проведение натуральных экспериментов Обработка результатов и выдача рекомендаций по проектированию и эксплуатации инструмента
Снабжение покупными инструментами и материалами	Определение поставщиков Оформление заявок на приобретение Приобретение и поставка на предприятие Выдача нарядов цехам на получение

Функция	Задача
Изготовление технологического оснащения	Обеспечение рабочих мест Выполнение технологического процесса Приемка и сдача продукции на склад
Накопление складских запасов	Определение норм запасов инструмента Поддержание заданного уровня запасов
Правка, восстановление, ремонт инструмента	Контроль состояния инструмента Определение вида работ по восстановлению Проведение восстановительных работ Приемка и сдача продукции на склад
Обеспечение рабочих мест инструментом	Составление заявок на получение со склада Получение и доставка инструмента в раздаточные кладовые Распределение инструмента по рабочим местам Сбор использованного инструмента
Наладка инструментов на выполнение операции	Комплектация наладок инструментами Наладка вне станка Наладка инструмента на станке
Контроль, подналадка и смена инструмента на исправный	Диагностирование инструмента Подналадка инструмента по параметрам детали Выявление аварийных состояний инструментов Смена инструмента
Выполнение инструментами рабочих и холостых движений	Введение управляющих программ изготовления изделий Изготовление пробных изделий Регулирование параметров движения

Любой материальный результат в СИО фиксируется выпуском соответствующей информации. Например, изготовление образцов оснастки отображается в накладной сдачи их на склад. Таким образом, информационное моделирование охватывает все процессы в системе и с этой точки зрения приобретает характер выявления общих закономерностей ее функционирования. Следовательно, полученный перечень задач, охватывая все действия, позволяет в значительной степени уточнить представление о работе СИО и сделать очередной шаг в направлении ее автоматизации.

Каждая отмеченная в табл. 1.1 задача представляется моделью в виде структурной схемы (см. рис. 1.1). Начертание задач производится с применением стандартизированных условных обозначений, разработанных для схем алгоритмов и программ, которые будут расшифровываться по мере рассмотрения моделей.

Для обозначения автоматически выполняемого процесса переработки информации используют *прямоугольники*, для разветвления процесса в зависимости от решения, выражаемого словами «да» или «нет» в ответ на вопросы, помещенные в блоках, применяют *ромбы*, для указания ручного выполнения операций — *трапеции*, для отметки начала и конца процесса — *бочонки*. Остальные обозначения относятся к документам: *двойной флажок* — ручной



носитель, *цилиндр с крышкой* — магнитный диск, *прямоугольник с волнистым срезом* — машинный документ. При изображении линии связи отмечаются *стрелками* только при направлении их снизу вверх и справа налево. Разрыв линий обозначается *кружками* с одинаковыми индексами.

Структурная схема задач имеет структуру, характеризуемую чередованием документов и работ. Она начинается с исходных документов, набор которых должен быть достаточным для информационного обеспечения проведения работы. Выполнение следующей работы необходимо подкрепить дополнительной информацией. Такой порядок просматривается по каждой схеме: новая работа основана на использовании ранее полученного документа и дополнительной информации из других источников. Обеспечение достаточной полноты информации для выполнения каждой работы является первым требованием по составлению задач.

В результате получают полный перечень документации, необходимой для осуществления процесса проектирования. Перечень дает возможность выполнить второе требование, состоящее в решении вопроса об автоматизации процесса переработки информации. С этой точки зрения выделяют **три вида моделей**, соответствующие различным уровням автоматизации:

1. *Исходная*, фиксирующая достигнутый уровень.
2. *Типовая*, задающая наибольший возможный (идеальный) уровень.
3. *Рабочая*, определяющая необходимый проектный уровень для очередного этапа внедрения автоматизации.

Между исходной и идеальной моделями располагается ряд рабочих моделей, задающих уровни автоматизации по этапам совершенствования системы. Выбор уровня для каждого этапа определяется стремлением добиться оптимальной работы системы при имеющихся ограничениях на ресурсы, выделяемые для автоматизации. Уровень автоматизации экономически обосновывается, данные для обоснования берут из технологического процесса переработки информации. Общая последовательность операций при этом задается структурной схемой задачи. Сравнение нескольких вариантов таких схем разными уровнями автоматизации позволяет сделать выбор оптимального решения. При построении схем нужно согласовывать уровни автоматизации операций таким образом, чтобы получился автоматизированный процесс переработки информации с возможно большей степенью непрерывности.

Структурные схемы задач имеют большие преимущества для экономического изложения процессов принятия решений. В них наглядно изображаются все операции и их связи с такой полнотой, что дополнительные объяснения не требу-

ются. Поэтому структурные схемы следует рассматривать как хорошую форму изложения методических вопросов. В таком качестве они будут широко использоваться для изложения сложных закономерностей работы СИО. Кроме того, составление схем является важным этапом проектирования систем и формального описания процессов переработки информации для перевода их на ЭВМ.

Разработка структурных схем по всем задачам (см. табл. 1.1) приводит к получению полного перечня всех документов, которые следует создавать с помощью ЭВМ при наивысшем уровне автоматизации. Наличие такого перечня является непременным условием перспективного планирования и экономического обоснования мероприятий по совершенствованию СИО. При использовании инструмента в гибких производственных системах (ГПС) выполняются два рода функций, связанных с его применением непосредственно на гибком производственном модуле (ГПМ) и с инструментальным обеспечением ГПС в целом.

В общем случае, чем выше уровень автоматизации отдельного ГПМ, тем большее число функций, связанных с использованием инструментальной оснастки, он выполняет в автоматическом режиме и тем выше должен быть технический уровень СИО ГПС. Эффективная работа ГПМ в составе ГПС может быть обеспечена только при соответствующем техническом уровне СИО. Однако представляется нецелесообразным предусматривать высокий уровень автоматизации как СИО в целом, так и отдельных функций инструментального обеспечения для одного или нескольких высокоавтоматизированных ГПМ, если основной состав ГПМ в ГПС имеет более низкий уровень автоматизации.

В то же время для ГПМ сравнительно низкого уровня автоматизации при определенных условиях (большое число ГПМ, серийное или крупносерийное производство продукции и т.д.) может быть целесообразной высокая степень автоматизации выполнения отдельных функций, связанных с подготовкой инструмента. В подобных случаях для таких ГПМ необходимо организовать стыковку с СИО высокого уровня в целях наиболее эффективного использования ГПС в целом. Чем более однороден состав ГПС по уровню автоматизации отдельных ГПМ, тем более эффективно можно использовать СИО.

В зависимости от уровня автоматизации может изменяться не только режим выполнения функций (ручной, автоматический, автоматизированный), но и сам состав функций и способы выполнения тех из них, которые связаны с использованием инструмента (табл. 1.2). При высокой степени автоматизации часть функций СИО может выполняться в автоматическом режиме непосредственно на станке.

### Функции СИО в зависимости от уровня автоматизации

Функция и способ ее выполнения	Режим выполнения функций СИО. Уровни автоматизации		
	1-го	2-го	3-го
Выполнение цикла обработки по жестко заданной программе	А	Р	–
Адаптивное выполнение цикла обработки	–	А	А
Установка инструмента в шпиндель в цикле обработки по программе	А	А	А
Накопление инструментов в одном или нескольких магазинах	А	А	А
Контроль состояния инструментов по ресурсу работы без защиты от аварийных ситуаций	А	–	–
То же, с защитой от аварийных ситуаций	–	А	–
Диагностирование состояние режущей кромки или параметров детали	Р	А	А
Замена (при отказе) участка или полностью режущей кромки	Р	А	А
Замена режущей головки или непосредственно инструмента дублером	Р	А	А
Замена полностью комплекта инструментов	–	А	–
Изменение геометрии режущих элементов при переналадке	–	–	А
Смена режущей головки или непосредственно инструмента при переналадке	Р	Р	А
Настройка инструментов на станке подналадкой в течение периода стойкости	Р	А	А
То же, подналадкой после предварительной настройки вне станка	Р	А	А
То же, настройкой полностью на станке	–	–	А
Входной контроль 100 % инструментов	Р	А	А

*Примечание:* Р, А — ручной и автоматический режимы выполнения функций; «–» — выполнение функций не предусмотрено.

Конструкции режущего и вспомогательного инструмента оказывают значительное влияние на способы и режимы выполнения функций, связанных с использованием на ГПМ. Различные уровни автоматизации ГПМ и СИО должны быть обеспечены соответствующим инструментом.

Рассмотрим подробнее организацию использования инструментальной оснастки на ГПМ.

В ГПМ 1-го уровня автоматизации рабочие и холостые ходы в цикле обработки осуществляются по жестко заданной управляющей программе. В процессе выполнения цикла обработки производится автоматическая смена инструментов в шпинделе из накопителя инструментов, состоящего из одного или нескольких пристановочных магазинов.

Контроль состояния инструментов осуществляется по ресурсу его работы (по числу выполненных циклов обработки), по истечении ресурса работы инструмента подается соответствующий сигнал, после чего оператор-наладчик вручную заменяет его. Кроме того, инструмент может заменяться (также вручную) по фактическому состоянию режущей кромки и технологическим критериям затупления. Режимы резания следует назначать с учетом требуемой надежности работы инструментов. Уровень автоматизации таких ГПМ не позволяет использовать их в режиме «безлюдной технологии».

Для сокращения времени простоев оборудования при замене инструментов целесообразно иметь при станке инструменты-дублиеры, заранее подготовленные, настроенные и приработанные. Особенностью ГПМ 2-го уровня автоматизации является автоматический контроль состояния инструментов по ресурсу работы (с защитой от аварийных ситуаций) или по фактическому состоянию режущей кромки и технологическим критериям затупления. Наличие данных видов контроля состояния инструментов позволяет перейти к их автоматической замене при отказе.

Автоматически осуществляется замена участка или полностью режущей кромки (в инструментах соответствующей конструкции), режущей головки или самого инструмента дублиером, заранее установленным в магазине, полного комплекта инструментов наладки или его части. Замена полного комплекта при отказе любого из входящих в него инструментов производится с использованием сменных магазинов.

Возможность автоматической подналадки инструментов на станке позволяет сократить время их настройки при переналадках и при подготовке дублиеров, а также перетачивать изношенные участки режущих кромок непосредственно на станке. Средства проверки состояния режущих инструментов обеспечивают в ряде случаев автоматизацию их входного контроля непосредственно на станке.

Наличие автоматической подналадки инструментов в сочетании с возможностью их накопления в общем магазине для группы станков, в нескольких совместно функционирующих автономных магазинах или в автономных магазинах, используемых совместно с центральным магазином, позволяет эксплуа-

тировать комплект инструментов или его часть в группе взаимозаменяемых ГПМ, т.е. организовать межстаночный инструментообмен. Это значительно расширяет технологические возможности оборудования, повышает надежность функционирования ГПС в целом и сокращает потребное количество инструмента. При организации межстаночного инструментообмена необходимо предусмотреть возможность перехода на индивидуальное инструментальное обеспечение в аварийных ситуациях.

Поскольку на ГПМ 2-го уровня автоматизации переналадки выполняются вручную, такие ГПМ могут работать в режиме «безлюдной технологии» только без переналадки.

В ГПМ 3-го уровня автоматизации обеспечивается автоматическая переналадка на обработку деталей другого типоразмера или наименования. Настройка инструмента на размер осуществляется автоматически вне станка или непосредственно на станке. В тех случаях, когда автоматическая настройка инструмента на размер на станке невозможна, настройку выполняют вручную в отделении подготовки инструментов. При этом фиксируют и кодируют фактический размер, который затем при поступлении инструмента на ГПМ автоматически считывается и вводится в память устройства ЧПУ станка или в ЭВМ ГПС.

На подобных ГПМ автоматически осуществляется адаптация технологического процесса к изменяющимся условиям обработки. При этом инструменты контролируются автоматически по фактическому состоянию режущей кромки и технологическим критериям затупления, поскольку такой способ контроля обеспечивает наименьшую вероятность поломок и сколов инструмента, что, в свою очередь, сокращает простои ГПМ.

При отказе инструмента осуществляется автоматическая замена участка или полностью режущей кромки, а также автоматическая замена режущей головки или инструмента в целом дублиром.

Автоматическая переналадка ГПМ (с использованием сменных магазинов инструментов) на выпуск другой детали требует предварительной подготовки набора таких магазинов. При этом инструменты, общие для всей группы деталей (торцовые и концевые фрезы, отдельные виды сверл, метчиков и т.д.), неизбежно дублируются в сменных магазинах, что значительно увеличивает расход инструментов и затраты времени на их подготовку. На таких ГПМ наиболее эффективна поштучная, а не покомплектная автоматическая смена инструментов при переналадке.

Наличие автоматической переналадки ГПМ в сочетании с автоматической настройкой и подналадкой инструментов позволяет перейти к межстаночному

инструментообмену не только между взаимозаменяемыми, но и между взаимодополняющими ГПМ. Это означает, что комплект инструментов или его часть может использоваться при выполнении различных операций по различным управляющим программам на нескольких станках. ГПМ 3-го уровня автоматизации способны работать с переналадками в режиме «безлюдной технологии».

При создании СИО разрабатываются и осуществляются организационно-технические мероприятия: подготовка и выдача на рабочие места комплектов инструментальной наладки, включающих в себя заточенный режущий инструмент, мерительный и вспомогательный инструмент для запланированных дета­леопераций; обработка конструкций резцов и геометрии их режущей части в зависимости от материала и конфигурации обрабатываемых деталей, специфических условий резания и условий отвода стружки из зоны резания с тем, чтобы гарантированная стойкость резцов была не менее одной рабочей смены, создание участка для централизованной заточки инструмента; разработка технологических процессов заточки и переточки, определение фактической стойкости инструмента между переточками для каждой дета­леоперации и норм его расхода на 1 000 шт. обрабатываемых деталей, выпуск технологической документации для функционирования СИО (ведомости оснащения карты наладки инструмента и т.д.), расчет потребности в режущем инструменте по нормам его расхода на 1 000 шт. обрабатываемых деталей; путем внедрения АСУ планирования, учета и хранения инструмента.

Типовая схема перемещения инструмента по СИО, а также взаимодействие всех инструментальных подразделений ГПС представлены на рис. 1.2. Комплекты инструментальных наладок для планируемых к запуску дета­леопераций готовят в инструментальном отделении ГПС в соответствии со сменно-суточным заданием, выдаваемым за три дня до запуска, и сопроводительными картами на планируемые дета­леоперации, в соответствии с технологическими задачами по уровню автоматизации отдельных ГПМ, тем более эффективно можно использовать СИО.

В зависимости от уровня автоматизации ГПМ может изменяться не только режим выполнения функций (ручной, автоматический, автоматизированный), но и сам состав функций и способы выполнения тех из них, которые связаны с использованием инструмента (см. табл. 1.2). В ГПМ высокой степени автоматизации часть функций СИО может выполняться в автоматическом режиме непосредственно на самом станке.

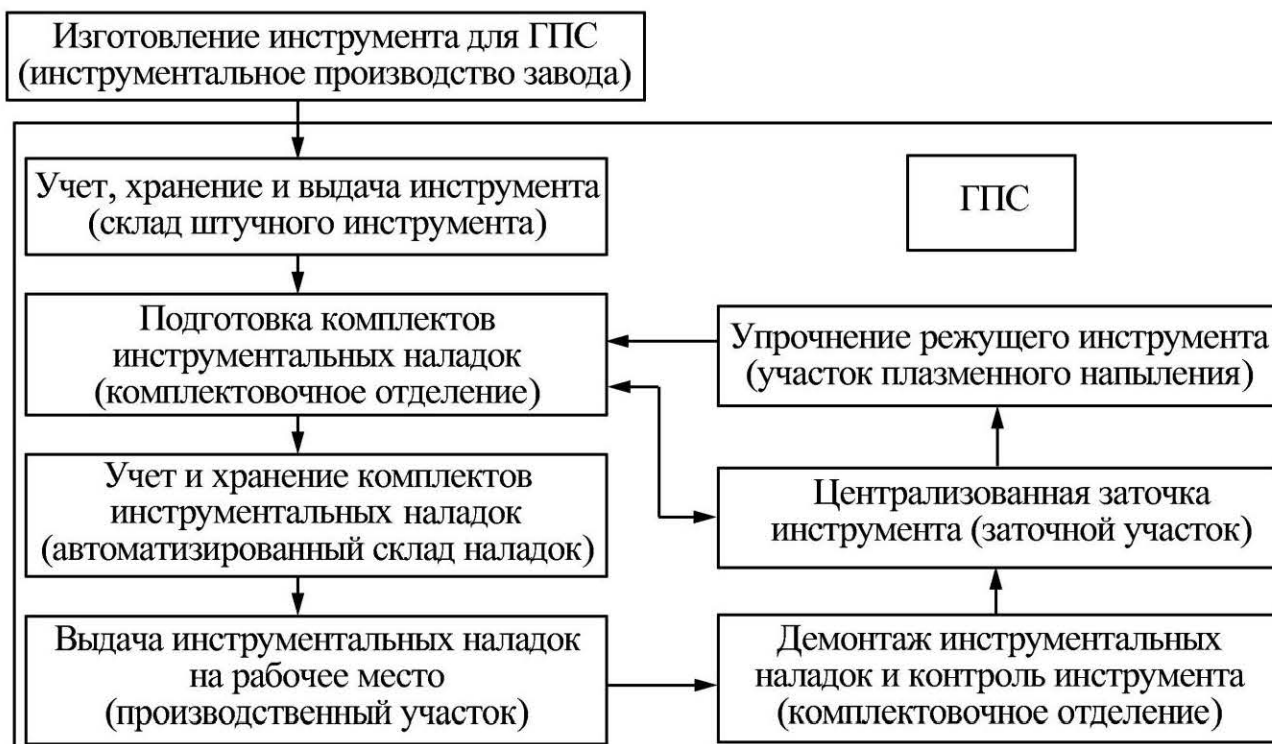


Рис. 1.2. Схема перемещения инструмента в ГПС

### 1.3. Методы выбора инструмента

Варианты методов выбора инструмента при проектировании технологических процессов достаточно разнообразны. Однако среди них выделяются **два основных**:

1) аналитический, при котором выбор осуществляется в результате анализа закономерностей конструкции и технологии применительно к каждой конкретной детали или изделию;

2) аналоговый, в котором выбор происходит в результате корректирования заранее спроектированной технологии для деталей или изделий определенного класса, типа, группы применительно к особенностям конкретного объекта производства.

Между этими вариантами располагается несколько практически используемых методов, в разной степени сочетающих аналитический и аналоговый подходы. Методы проектирования технологических процессов (ТП), воплощенные в проектные решения, предельно четко представляются с помощью структурных схем алгоритмов. Для удобства восприятия всего процесса сразу используют принципиальные схемы алгоритмов, в которых существо излагается компактно на одном листе. Пользуясь ими, можно обсуждать разные методы на уровне специалистов и выбирать наиболее подходящие для применения. До-

ведение методики до машинной реализации достигается раскрытием каждого блока принципиальной схемы частным алгоритмом. Его особенность состоит в полной детализации каждого шага проектирования, а форма представления должна быть приведена к виду, удобному для программирования.

**Аналитический метод выбора инструмента при проектировании технологических процессов.** Принципиальная схема алгоритма приведена на рис. 1.3. Начальные блоки от 1-го до 5-го осуществляют выделение элементарных обрабатываемых поверхностей или собираемых пар деталей, выбор методов обработки или сборки, назначения инструментов для них и оформление переходов. Для решения этих задач используют рекомендации, собранные в технологических справочниках. На этой стадии получают полный набор переходов оптимизированных на основе классификационных рядов. Их применение для выбора оптимального решения позволяет упростить процедуру проектирования за счет исключения полного перебора вариантов инструментов, так как ряды четко ориентируют выбор в направлении наилучших решений, отмеченных высокими номерами классов методов.

Далее (блок б) полученный набор переходов выстраивается в последовательность выполнения обработки по всей детали или сборки по изделию в целом. Для решения этой достаточно сложной задачи используют конструкторские и технологические закономерности. Конструкторские основания заложены в пространственном соединении элементарных обрабатываемых поверхностей и пар собираемых деталей. Они выявляются с помощью построения схем вхождения отдельных поверхностей в общую структуру детали и деталей в общую сборку. Порядок вхождения задается рангом поверхностей и уровнем сборки. Поверхности детали, образующие основную конфигурацию, помечаются первым рангом. Другие поверхности (отверстия, пазы, резьбы, лыски) как бы наслаиваются на него и отмечаются последовательно увеличивающимся номером ранга. Последовательность наслоения через нумерацию рангов переносится на последовательность выполнения переходов, которые создают соответствующие поверхности.

Технологические закономерности построения последовательности переходов выражаются многочисленными правилами, собранными в справочниках, руководящих технических материалах, стандартах. Прежде всего, устанавливают этапы технологических пределов: заготовительного, термохимического, предварительной, основной, окончательной, финишной обработки, перемежающихся термическими, очистными, контрольными операциями, и, наконец, отделочного этапа. Кроме общих используют частные правила, например,



обработку наружных поверхностей круглой детали необходимо вести после изготовления точного отверстия, если заданы жесткие допуски на их взаимное расположение. В таких частных правилах обобщается ценный опыт проектирования оптимальных ТП.

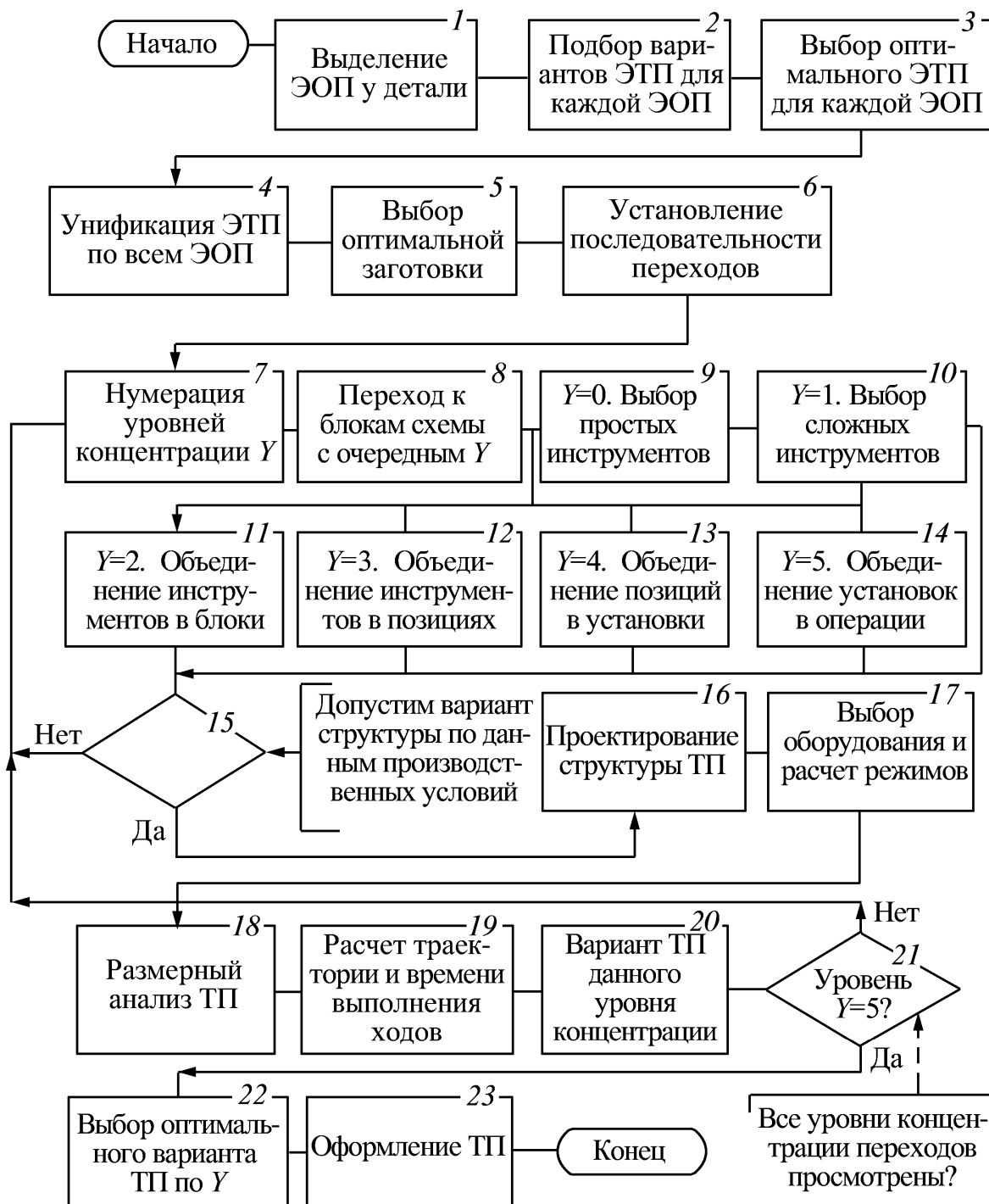


Рис. 1.3. Алгоритм аналитического метода выбора инструмента

при проектировании технологических процессов:

ЭОП — элементарная обрабатываемая поверхность;

ЭТП — элементарный технологический процесс обработки;

У — уровень концентрации технологического процесса; ТП — технологический процесс

Совместное использование конструкторских и технологических закономерностей приводит к расположению всех переходов в единый ТП, построенный на основе дифференциации, так как при этом работа каждого простого инструмента выделяется в отдельную операцию.

Процесс интегрирования начинается в блоках 7–14 концентрацией переходов за счет перехода от простых инструментов к сложным, блочным переходам, далее к позициям и установкам. В результате чего выбирается оптимальная структура инструмента. Приемлемость варианта концентрации для условий конкретного производства контролируется в блоке 15, выбор оптимальной структуры осуществляется в блоке 22 после подготовки материалов по всем уровням, что контролируется блоком 21.

Рассмотренная методика проектирования отличается значительной сложностью. Из содержания блоков следует, что многие из них сложны для перевода на ЭВМ. Поэтому прямоугольники в схеме не обязательно означают автоматическое выполнение работ. Преимущество представленного алгоритма состоит в изложении общей теории проектирования технологии, а недостаток — в сложности машинной реализации.

Принципиальная схема алгоритма выбора инструмента при аналоговом методе проектирования технологических процессов приведена на рис. 1.4 применительно к обработке деталей. С некоторыми несущественными изменениями она охватывает и сборочные процессы. Схема разработана на более высокий уровень автоматизации, чем предыдущая, и поэтому в ней содержатся условные обозначения магнитных дисков, на которых накапливаются исходные данные, элементов оперативной памяти для фиксации промежуточных результатов, машинных документов для распечатки спроектированных ТП. Достижению высокого уровня автоматизации способствует простота процедур метода, которые состоят в корректировании заранее разработанных типовых и групповых ТП. Алгоритм начинается с поиска аналога ТП для конкретной детали (блок 1). Поиск ведется среди типовых и групповых или ранее разработанных ТП. Преимуществом пользуются первые два варианта, так как они рассматриваются в качестве оптимальных образцов.

Как только аналог найден (блок 2), появляется полный набор данных по технологии для проектирования. Смысл его состоит в сравнении чертежа детали с аналогом, в выборе подходящих элементов технологии и в пересчете некоторых параметров режима работы. Начать эту последовательность процедур можно с последнего перехода последней операции, выходные данные которого соответствуют чертежу детали. Это происходит в блоках 4 и 9, затем сравнива-

ются параметры операций и переходов через посредство формирования операционного эскиза обработки детали по схеме образца. Если последняя операция нужна, то идет попереговое сравнение обрабатываемых поверхностей чертежа и операционного эскиза с оставлением тех из них, которые нужны для детали (блоки 10 и 11). Далее процедуры проектирования повторяются для предшествующих операций и переходов до тех пор, пока все они не будут просмотрены на предмет применимости для конкретной детали. В результате в блоках 13 и 14 осуществляется выбор инструментов, расчет режимов резания, траекторий и времени ходов. Для каждого этапа просмотра формируется эскиз предшествующего состояния детали, который как бы заменяет чертеж, бывший конечным результатом последней операции. Это осуществляется в блоке 17, который является связующим звеном между отдельными циклами проектирования переходов и операций. Завершение цикличности просмотра технологии аналога контролируется блоками 15 и 19. На последнем этапе проектирования решается вопрос полноты обработки детали по выбранному аналогу (блок 21) с тем, чтобы не допустить огрехов в созданном ТП. Во всех случаях неочевидности машинного решения к проектированию привлекается технолог (блок 23).

Основное преимущество алгоритма состоит в простоте проектных процедур, а недостаток — в узости области применения, ограниченной разработанными аналогами. Улучшить алгоритм можно за счет усложнения процесса проектирования оптимизированных (образцовых) ТП, принимаемых за аналоги. Они проектируются аналитическим методом.

Сравнение принципиальных схем алгоритмов, приведенных на рис. 1.3 и рис. 1.4, показывает существенное различие методов выбора инструментов. В зависимости от их особенностей определяются и области применения. Аналоговый метод широко используют для деталей и изделий, группируемых по типам. Только имея оптимальные образцы, можно гарантировать оптимальность всей системы ТПП при использовании аналогового проектирования. Аналитический метод используют для новых уникальных изделий, у которых нет аналогов. Особые требования к качеству аналогов приводят к тому, что для них оказывается обязательным применение аналитического метода проектирования. Вся унификация технологии проводится на основе использования аналитического метода.

Технологический процесс унифицируется не только на уровне завершенных процессов механообработки (см. рис. 1.4), но и на уровнях циклов и операций, а также путем унификации технологического оборудования, приспособлений и инструментов. В этом случае изменяется и методика проектирования ТП. Она

строится на сочетании процедур двух рассмотренных предельных методов. Сначала аналитическим методом формируются переходы или операции, а затем аналоговым путем подбираются заранее их типизированные варианты. Алгоритмы таких практических методик по-разному комбинируют два основных подхода, создавая возможность выбора наиболее подходящей для конкретного случая. Соответственно изменяются итоговые характеристики по простоте машинной реализации, оптимальности решений, уровню унификации элементов технологии.

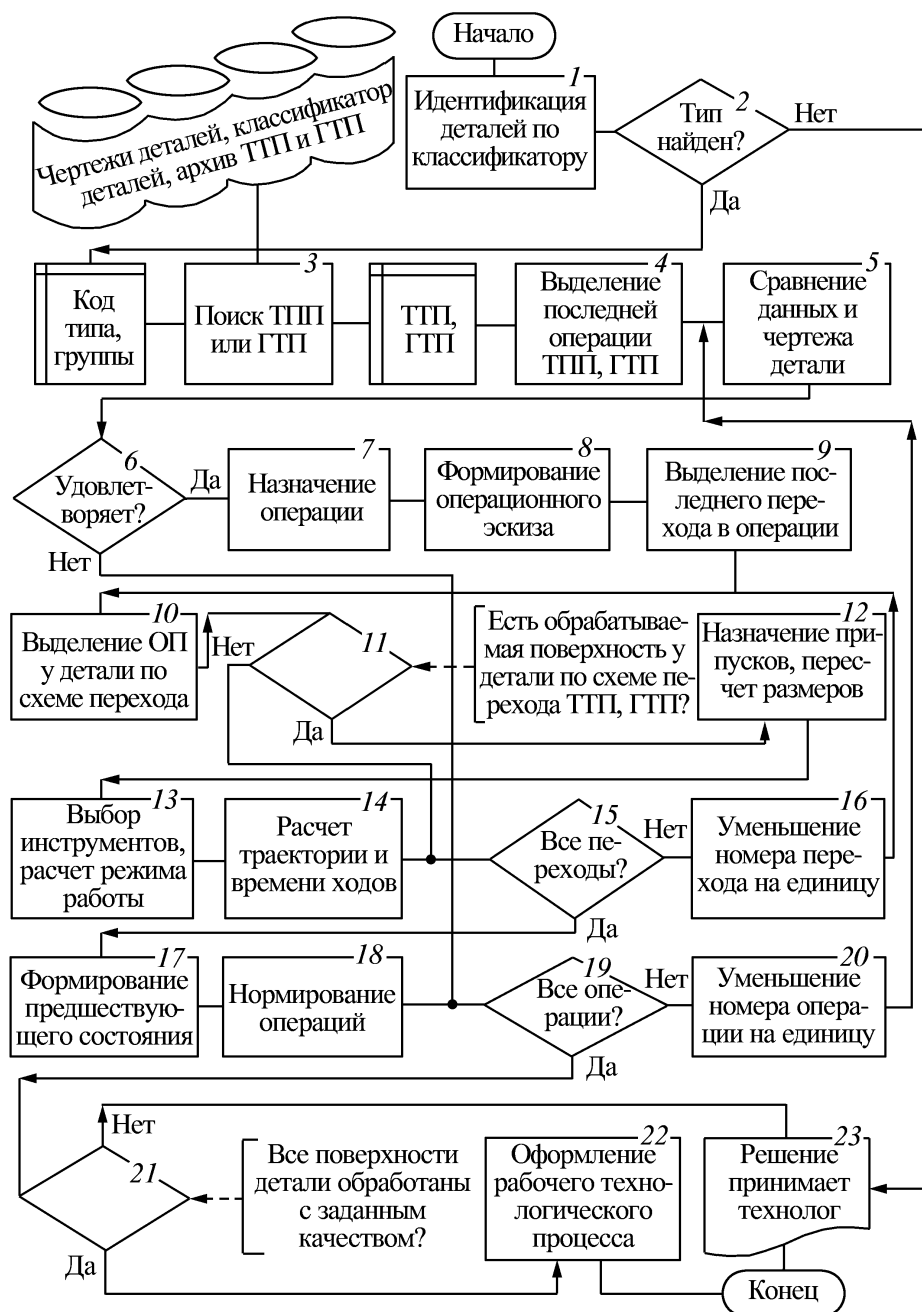


Рис. 1.4. Алгоритм аналогового метода выбора инструмента при проектировании технологических процессов:  
 ТПП, ГТП — типовой и групповой технологические процессы;  
 ОП — обрабатываемая поверхность

Для практической реализации на ЭВМ принципиальных схем алгоритмов проектирования ТП (см. рис. 1.3, 1.4) и выбора инструмента необходимо раскрыть содержание каждого блока, составив частные алгоритмы в удобной форме изложения для последующего программирования. На этом этапе работы условия выбора инструментов и других элементов технологии, а также расчеты режимов, траекторий, эффективности должны быть изложены с предельной детализацией и определенностью процесса переработки информации.

#### **1.4. Типизация технологических циклов обработки резанием**

Сложность и трудоемкость технологической подготовки автоматизированного мелкосерийного производства не позволяет формализовать и автоматически проектировать технологический процесс. Однако если рассматривать изготавливаемую деталь как совокупность конструктивно-технологических элементов (КТЭ), то процесс формализации операционной технологии значительно облегчается. Этот принцип «типизации технологии обработки КТЭ детали» позволяет построить *автоматизированную систему технологической подготовки производства (АСТПП)* деталей.

С помощью АСТПП быстрее и правильнее решаются задачи, указанные выше, в том числе: выбор режущего инструмента; последовательность переходов и проходов; выбор траектории движения инструмента и заготовки; назначение режимов резания в рабочих проходах на всем пути движения; выбор периодов стойкости инструмента многоинструментных наладок последовательного действия и т.п.

Создание АСТПП для обработки деталей общемашиностроительного применения на базе метода проверенных технологических решений для обработки отдельных КТЭ детали с последующим синтезом маршрутно-операционной технологии обработки детали включает в себя следующие *этапы*:

а) разработка формализованной модели представления структуры технологической операции обработки детали с разбиением ее на переходы обработки отдельных КТЭ;

б) исследование формализованной модели структуры операции для выявления ее типовых иерархических структурных составляющих элементов (технологических циклов), реализация которых может быть осуществлена на базе типовых вариантов технологических решений;

в) определение первичных и производных структурных составляющих операции;

г) унификация параметров технологической информации и вариантов типовых технологических решений;

д) разработка конструктивно-технологической классификации элементов деталей и языка кодирования типовых структурных составляющих технологической операции (технологических циклов);

е) определение номенклатуры и алгоритмов первичных и производных структурных составляющих технологической операции (технологических циклов) обработки КТЭ детали;

ж) программно-математическая реализация АСТПП, включающая в себя разработку технологического процессора, обеспечивающего автоматическое проектирование первичных и производных структурных составляющих операции, разработку информационной базы данных, входных и выходных форм информации.

*Структура технологической операции* может быть представлена как сложная иерархическая система, в которой формально описываются отдельные элементы для последующего синтеза модели системы. В дальнейшем это позволяет исследовать и идентифицировать параметры на базе реальных величин, характеризующих технологию обработки деталей.

При построении *модели технологической операции* обработки корпусной детали используют следующие **основные положения**.

1. Корпусная деталь на операции (установе) рассматривается как совокупность (множество) типовых элементарных поверхностей, подлежащих обработке, имеющих определенное положение в пространстве относительно оси шпинделя станка и связанных с системой координат ГПМ. При этом каждой элементарной поверхности в процессе обработки соответствует ряд таких параметров, как качество точности обработки, шероховатость обработанной поверхности, оставляемый припуск и др.

2. Типовой технологический переход рассматривается как определенная законченная часть технологической операции, характеризующаяся типом применяемого инструмента и элементарной поверхностью, образуемой при обработке.

3. Под операцией (операционной или маршрутно-операционной технологией) для ГПМ понимают совокупность (множество) типовых переходов, необходимых для обработки всех элементарных поверхностей детали на данном установе.

4. Каждый типовой переход рассматривается как совокупность (множество) типовых технологических приемов, из которых можно выделить подмножества приемов, определяющих выбор инструмента; траекторий перемещений рабочих органов станка; режимов обработки и необходимых дополнительных технологических приемов (например, включение охлаждения).

5. Каждый типовой прием, в свою очередь, рассматривается как определенный типовой алгоритм, определяющий в конечном итоге последовательность команд управляющего устройства ГПМ, обеспечивающих проведение процесса обработки.

Структура технологической операции может быть разделена на следующие **основные структурные составляющие** (табл. 1.3):

а) *простой технологический цикл* (ПТЦ) — структурная составляющая технологической операции на уровне типового технологического перехода для обработки одного конструктивного элемента детали с заданными технологическими требованиями одним инструментом с помощью определенных технологических приемов-подциклов;


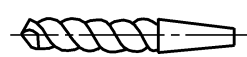






б) *групповой технологический цикл* (ГТЦ) — структурная составляющая технологической операции на уровне многократно используемого одноинструментного перехода ПТЦ для групповой обработки определенного числа одинаковых конструктивных элементов детали;

в) *комбинированный технологический цикл* (КТЦ) — структурная составляющая технологической операции на уровне последовательности (цепочки) нескольких разнотипных одноинструментных переходов ПТЦ, используемых для комплексной обработки одного конструктивного элемента детали;

г) *сложный технологический цикл* (СТЦ) — структурная составляющая технологической операции на уровне многократно используемой последовательности (цепочки) разнотипных одноинструментных переходов ПТЦ, используемых для комплексной групповой обработки определенного количества одинаковых конструктивных элементов детали.

Таблица 1.3

### Структура технологической операции

Составляющие операции в системах управления станком		технологической подготовки	Пример типовой технологической схемы обработки элемента (группы элементов) детали	
Останов	Позиция обработки			
Перемещение от точки к точке	Прием, проход (ход)	рабочий		
		вспомогательный (холостой)		
ПТЦ	Типовой технологический переход для обработки одного элемента детали одним инструментом			

Составляющие операции в системах управления станком		Пример типовой технологической схемы обработки элемента (группы элементов) детали
технологической подготовки	технологической подготовки	
ГТЦ	Множественно используемый переход для одноинструментной обработки группы из «N» элементов детали	
КТЦ	Комбинация разнотипных переходов для обработки одного элемента детали несколькими техно-логическими переходами	
СТЦ	Сочетание переходов для обработки группы из «N» однотипных элементов детали	

**Обозначения:** р.х. — рабочий ход; х.х. — холостой ход.

Модель структуры технологической операции состоит из четырех подсистем, расположенных в порядке их иерархической зависимости.

Эти подсистемы могут быть объединены в **две крупные системы:**

- система укрупненных структурных элементов технологической операции. Из различных сочетаний компонентов этой системы может быть набрана технологическая операция;

- система мелких структурных составляющих технологической операции, различными сочетаниями компонентов которой могут быть набраны ПТЦ.

В иерархической цепи приведенной модели структурные элементы, соответствующие ПТЦ, занимают центральное место на том уровне, при котором появляется возможность комплексного укрупненного решения автоматизированного проектирования технологической операции. С другой стороны, эти же ПТЦ могут быть получены как сочетания технологических приемов (подциклов), реализующих определенные алгоритмы и последовательности команд системы ЧПУ для проведения необходимой обработки. Таким образом, КТЦ, ГТЦ и СТЦ являются производными технологическими циклами.

В основе ПТЦ лежит одноинструментная обработка конструктивно-технологических элементов корпусных деталей. КТЦ представляет собой комбинацию (цепочку) ряда ПТЦ, совокупность которых качественно изменяет состояние элемента детали, которое соответствует техническим требованиям, но не может быть обеспечено.



Такая структура операции позволяет построить технологический процесс по иерархическому блочно-модульному принципу с высоким уровнем автоматизации разработки операционного процесса.

Другим важным условием автоматизации разработки операционного процесса является создание типовых технологических решений, что позволяет выполнить разнообразные технологические требования при использовании ограниченного числа типовых сочетаний по точности и шероховатости поверхности.

Понятие точности включает в себя размерную точность детали, точность ее геометрической формы, расположения, а также требования к структуре поверхностного слоя (шероховатость поверхности).

Анализ опыта обработки резанием показывает, что существует взаимосвязь между допуском на размер и шероховатостью — шероховатость уменьшается при достижении более высокого класса точности обработанной поверхности. Поэтому для каждого допуска на размер (форму) можно установить пределы допускаемых значений шероховатости.

Накладывая наибольшие допускаемые значения шероховатости на область различных допусков на размеры, получают варианты сочетаний параметров точности и шероховатости обработки (рис. 1.5). Полученные варианты сочетаний допуска на размер и шероховатости обработки используются для конструктивно-технологической классификации элементов корпусных деталей и выбора номенклатуры технологических циклов обработки.

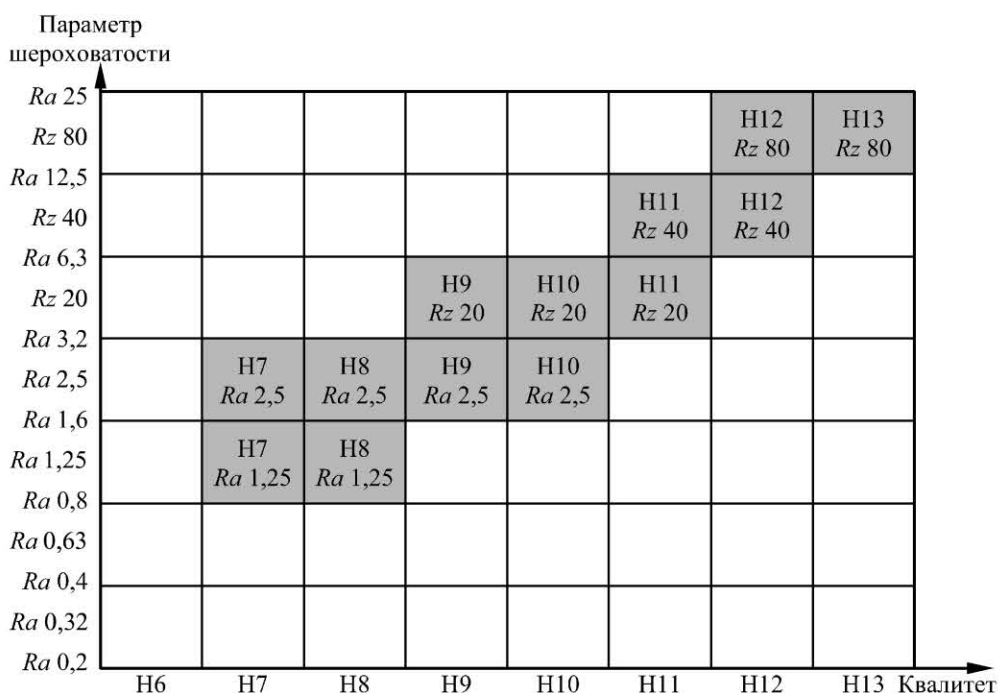


Рис. 1.5. Основные варианты сочетания параметров точности и шероховатости обработки

Благодаря унификации типовых структурных элементов технологического процесса, которые в различной комбинации могут составлять практически любой (до 95 %) технологический процесс, и классификации элементов обшемашиностроительных корпусных деталей, появляется возможность автоматизировать систему подготовки управляющих программ (СПУП).

Элементы классифицированы по конструктивно-технологическому принципу, заключающемся в том, что все многообразие конструкций деталей представляется как конечное число типовых конструктивных элементов — цилиндра, плоскости, паза, отверстия и т.д.

Каждый элемент классификации, т.е. каждая поверхность детали, определяется *тремя параметрами* — видом, группой и типом.

Основные *виды поверхностей*: плоскости, контуры, уступы, пазы, отверстия и резьбы — представлены на рис. 1.6–1.11.

Поверхности каждого вида подразделяются на группы в зависимости от наличия отверстий и уступов: 0 — открытые; 1 — ограниченные с одной стороны; 2 — ограниченные с двух сторон; 3 — замкнутые; 4 — замкнутые и ограниченные с одной стороны; 5 — замкнутые и ограниченные с двух сторон и т.д.

























Группа Тип	1	2	3	4	5	6	7
0	 10	 20	 30	 40	 50	 60	 70
1		 21	 31		 51	 61	 71
2		 22	 32		 52	 62	
3		 23	 33		 53	 63	
4			 34			 64	
5			 35			 65	

Рис. 1.6. Основные группы и типы обрабатываемых плоскостей

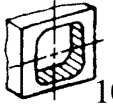
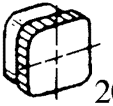
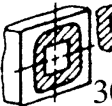



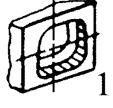
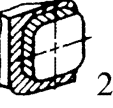
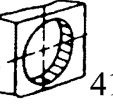

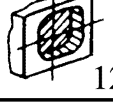

Группа Тип	1	2	3	4	5	6
0	 10	 20	 30	 40	 50	 60
1	 11	 21		 41	 51	
2	 12			 42		

Рис. 1.7. Основные группы и типы обрабатываемых контуров
















Группа Тип	1	2	3	4	5	6	7
0	 10	 20	 30	 40	 50	 60	 70
1	 11	 21	 31	 41	 51	 61	 71
2	 12						

Рис. 1.8. Основные группы и типы обрабатываемых уступов


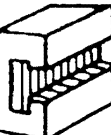

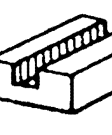
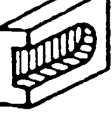
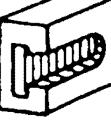








Группа Тип	1	2	3	4
0	 10	 20	 30	 40
1	 11	 21	 31	 41
2	 12	 22	 32	 42
3	 13			 43

Рис. 1.9. Основные группы и типы обрабатываемых пазов

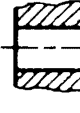

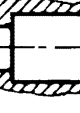
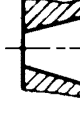

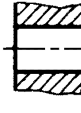
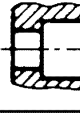

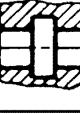









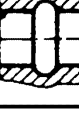
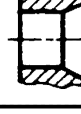
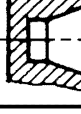
Группа Тип	1	2	3	4	5	6
0	 10	 20	 30	 40	 50	 60
1	 11	 21	 31	 41	 51	
2	 12	 22	 32	 42	 52	
3	 13	 23	 33	 43	 53	

Рис. 1.10. Основные группы и типы обрабатываемых отверстий

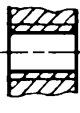
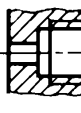

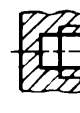
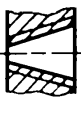


Группа Тип	1	2	3	4	5	6	7	
								
0	10	20	30	40	50	60	70	
	метрическая				} крепежные			
1	11	21	31	41		51	61	71
	трубная							
2	12	22	32	42		52	62	72
	дюймовая							
3	13	23	33	43	53	63	73	
	закругленная				} ходовые			
4	14	24	34	44		54	64	74
	трапецеидальная							
5	15	25	35	45	55	65	75	
	упорная							

Рис. 1.11. Основные группы и типы обрабатываемых резьб

Поверхности каждой группы подразделяются на типы в зависимости от ограничения движения инструмента — справа или слева, сверху или снизу, с выходом или без выхода и др. Обозначение обрабатываемой поверхности записывается цифрами, где первое число номер группы, а второе — номер типа.

Каждая элементарная поверхность характеризуется геометрическими параметрами, например, для открытой плоскости это длина, ширина и расположение точки начала отсчета координат.

В ПТЦ осуществляются относительные перемещения инструмента и детали, необходимые для выполнения типового технологического перехода обработки одного конструктивно-технологического элемента детали с заданными технологическими параметрами (точность, шероховатость, припуск и др.). В ПТЦ входит связанный с выполнением этого перехода набор технологических и вспомогательных приемов (команд управляющей программы), определяющих последовательности, траекторию и скорость перемещений рабочих органов станка, режимов обработки и т.п. Количество и номенклатура ПТЦ зависит от следующих **факторов**:

а) общее число КТЭ в классификаторе, которое, в свою очередь, зависит от числа конструктивных форм элементов поверхностей, положений элементов относительно шпинделя станка при обработке и числа сочетаний технологических требований к ним;

б) число возможных видов и схем обработки, классификатор которых составляется на основании анализа возможностей обработки на основном технологическом оборудовании участка, состава вспомогательного оборудования, оснастки и инструментального оснащения участка, технологических особенностей конкретного предприятия;

в) число типовых переходов, включаемых в цепочки, необходимые для достижения требуемых технологических параметров КТЭ. При определении этих цепочек (последовательностей переходов) также следует учитывать возможности основного технологического оборудования участка (многоцелевых станков), вспомогательного оборудования (инструмента и оснастки) и технологических традиций конкретного предприятия; возможности финишной обработки КТЭ, стыковки типовых переходов ПТЦ по припуску; максимальной унификации ПТЦ, входящих в последовательности.

В табл. 1.4–1.9 приведены варианты построения и кодирования ПТЦ, необходимые для обработки в соответствии с заданными технологическими требованиями к основным видам КТЭ, входящим в конструктивно-технологическую классификацию. Векторами обозначены ПТЦ. Начало и конец вектора соответствует начальному и конечному состояниям КТЭ по точности, шероховатости, припуску и другим технологическим параметрам обработки. Цифры над вектором складываются из чисел нижней строки кода состояния.

## Простые технологические циклы обработки плоскостей

Код состояния Технологические требования	б/о	Обработка с малой точностью												Обработка точная				
		черновая			получистовая									чистовая				
		0	1	2	3	2	4	5	3	6	7	4	8	9	5	6	7	8
Квалитет	–	II13			II12			II11			II10			II9	II9	II8	II8	II7
Параметр шероховатости	–	Rz 80			Rz 40			Rz 40			Rz 20			Rz 20	Ra 2,5	Ra 2,5	Ra 1,25	Ra 1,25
□ X, Y на 100 мм, мм	–	0,4			0,2			0,1			0,06			0,04	0,02	0,01	0,005	0,005
II X на 100 мм, мм	–	0,3			0,15			0,1			0,08			0,06	0,04	0,02	0,01	0,008
Допуск по оси Z, мм	–	0,3			0,2			0,15			0,1			0,08	0,06	0,04	0,02	0,01
Снимаемый припуск, мм	0	8	5	6,5	3	2	2,2	1,5	1	1,2	1	0,8	0,85	0,8	0,5	0,3	0,2	0,15
Оставляемый припуск, мм	8	0	3	1,5	0	1	0,8	0	0,5	0,3	0	0,2	0,15	0	0	0	0	0
Обозначение обрабатываемых поверхностей																		
10, 20, 21, 22, 23, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 40, 50, 51, 52, 53, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 70, 71 (см. рис. 1.6)	11	→																
	12	→																
	13	→																
	22		→															
	24		→															
	25		→															
	33			→														
	36			→														
	37			→														
	44				→													
48				→														
49				→														
55					→													
66						→												
77							→											
88								→										
99									→									
30, 31, 60, 61																		

Условные обозначения: □ – плоскостность; II – параллельность; б/о – без обработки.

## Простые технологические циклы обработки контуров

Код состояния	б/о	Обработка с малой точностью												Обработка точная		
		черновая			получистовая						чистовая			6	7	8
Технологические требования	0	1			2		3			4		5		6	7	8
	0	1	2	3	2	4	3	5	7	4	6	5	8	6	7	8
Квалитет	–	H13			H12		H12			H11		H11		H11	H10	H10
Параметр шероховатости	–	Rz 80			Rz 40		Rz 20			Rz 40		Rz 20		Ra 2,5	Rz 20	Ra 2,5
ИХ на 100 мм, мм	–	0,3			0,2		0,15			0,1		0,08		0,06	0,05	0,04
Непрямолинейность, мм	–	0,15			0,12		0,1			0,08		0,06		0,05	0,04	0,03
Допуск по оси Z, мм	–	0,4			0,3		0,2			0,15		0,1		0,08	0,07	0,05
Снимаемый припуск, мм	0	до 20	до 16	до 18	4	3	2	1,4	1,6	1	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	0,2
Оставляемый припуск, мм	до 20	0	4	2	0	1	0	0,6	0,4	0	0,4	0	0,2	0	0	0
Обозначение обрабатываемых поверхностей																
10, 11, 12, 20, 21, 30, 40, 41, 42, 50, 51, 60 ( см. рис. 1.7)	11															
	12															
	13															
	27															
	24															
	33															
	35															
	37															
	44															
46																
55																
58																
66																
77																
88																

Условные обозначения: // – параллельность; б/о – без обработки.

## Простые технологические циклы обработки уступов

Код состояния Технологические требования	б/о	Обработка с малой точностью											Обработка точная				
		черновая					получистовая						чистовая				
		0	1	3	5	2	4	3	6	8	4	7	5	9	6	7	8
Квалитет	–	H13			H13		H12			H12		H11		H11	H11	H10	H10
Параметр шероховатости	–	Rz 80			Rz 40		Rz 40			Rz 20		Rz 40		Rz 20	Ra 2,5	Rz 20	Ra 2,5
И X на 100 мм, мм	–	0,12			0,1		0,08			0,07		0,06		0,05	0,04	0,03	0,02
Непрямолинейность, мм	–	0,25			0,2		0,15			0,1		0,08		0,06	0,05	0,04	0,03
Допуск по оси Z, мм	–	0,4			0,3		0,2			0,15		0,1		0,08	0,06	0,05	0,04
Снимаемый припуск, мм	0	до 20	до 16	до 19	до 20	до 19	4	3,4	3,6	2	1,6	1	0,8	0,6	0,4	0,4	0,2
Оставляемый припуск, мм	до 20	0	4	1	0	2	0	0,6	0,4	0	0,4	0	0,2	0	0	0	0
Обозначение обрабатываемых поверхностей																	
10, 11, 12, 20, 21, 30, 31, 40, 41, 50, 51, 60, 61, 70, 71 (см. рис. 1.8)																	
Условные обозначения: П – параллельность; б/о – без обработки.																	



## Простые технологические циклы обработки пазов

Код состояния Технологические требования	б/о	Обработка с малой точностью										Обработка точная					
		черновая		получистовая								чистовая					
		0	1	2	2	6	3	4	4	5	5	7	6	8	9	7	8
Квалитет	–	H12		H12		H11		H11		H11		H10			H10	H9	H8
Параметр шероховатости	–	Rz 40		Rz 20		Rz 40		Rz 20		Ra 2,5		Rz 20			Ra 2,5	Ra 2,5	Ra 2,5
ИХ на 100 мм, мм	–	0,25		0,2		0,15		0,1		0,08		0,08			0,06	0,04	0,02
Непрямолинейность, мм	–	0,1		0,8		0,8		0,06		0,05		0,04			0,03	0,02	0,01
Допуск по оси Z, мм	–	0,3		0,2		0,2		0,12		0,08		0,08			0,06	0,04	0,02
Снимаемый припуск, мм	0	до 30	до 27	3	2	до 30	до 28	2	1,6	0,4	0,2	1	0,8	0,8	0,02	0,2	0,2
Оставляемый припуск, мм	до 30	0	3	0	1	0	2	0	0,4	0	0,2	0	0,1	0,2	0	0	0
Обозначение обрабатываемых поверхностей																	
		11															
			12														
				22													
					26												
						33											
							34										
								44									
									45								
										55							
											57						
												66					
													68				
														69			
															77		
																88	
																	99

10, 11, 12, 13, 20, 21, 22, 30, 31, 32, 40, 41, 42, 43 (см. рис. 1.9)

Условные обозначения: П – параллельность; б/о – без обработки.

## Простые технологические циклы обработки отверстий

Код состояния Технологические требования	б/о	Обработка с малой точностью										Обработка точная							
		черновая					получистовая					чистовая							
		0	1	2	2	4	3	5	4	6	5	7	6	8	7	9	8	9	
Квалитет	–	H13		H12		H11		H11		H9		H9		H7		H7		H6	
Параметр шероховатости	–	Rz 80		Rz 40		Rz 40		Rz 20		Rz 20		Ra 2,5		Ra 2,5		Ra 1,25		Ra 1,25	
ИХ на 100 мм, мм	–	0,1		0,08		0,06		0,04		0,03		0,02		0,01		0,006		0,005	
Непрямолинейность, мм	–	0,1		0,08		0,06		0,04		0,03		0,02		0,01		0,008		0,005	
Допуск по оси Z, мм	–	0,15		0,1		0,08		0,06		0,04		0,02		0,015		0,01		0,005	
Снимаемый припуск, мм	0	до 25	до 22	до 25	до 35	3	2,2	1,5	1,3	0,5	0,4	0,2	0,12	0,1	0,005	0,08	0,05	0,05	0,05
Оставляемый припуск, мм	до 25	0	3	0	1,5	0	(1) 0,5	0	(0,6) 0,2	0	(0,3) 0,1	0	(0,2) 0,08	0	(0,1) 0,05	0	0	0	0
Обозначение обрабатываемых поверхностей																			
10, 11, 12, 13, 20, 21, 22, 23, 30, 31, 32, 33, 40, 41, 42, 43, 50, 51, 52, 53, 60 (рис. 1.10)																			
Условные обозначения: П – параллельность; б/о – без обработки.																			

## Простые технологические циклы обработки резьб

Код состояния Технологические требования	Обработка				
	предварительная	окончательная			
		0	1	2	3
Квалитет	H11; H12	H9		H8	H7
Снимаемый припуск, мм	0	до 5	до 4	до 5	до 1
Оставляемый припуск, мм	до 5	0	до 1	0	0
Обозначение обрабатываемых поверхностей					
10, 11, 12, 13, 14, 15, 20, 21,	11	12			
22, 23, 24, 25, 30, 31, 32, 33,			22		
34, 35, 40, 41, 42, 43, 44, 45 (см. рис. 1.11)				32	

При разработке конкретного варианта АСТПП ограничивают номенклатуру ПТЦ, исходя из реальной номенклатуры изготавливаемых деталей.

## ГЛАВА 2. ДОСТИЖЕНИЕ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ, ОБРАБАТЫВАЕМЫХ РЕЗАНИЕМ

### 2.1. Показатели качества

**Показатели качества** — это количественные и (или) качественно установленные конкретные параметры (характеристики) детали, дающие возможность их реализации и проверки.

Следует подчеркнуть, что не все характеристики детали служат показателями ее качества. Например, жаростойкость не является показателями качества детали, предназначенной для сборки токарного станка, но является важнейшим показателем качества лопатки компрессора газотурбинного двигателя.

Немаловажными являются экономические показатели, которые определяют размеры затрат, необходимые для проведения мероприятий, обеспечивающих заданное качество детали.

Среди других показателей следует выделить показатели технологичности, надежности, патентной защиты и др.

Полученная в результате резания деталь оценивается совокупностью параметров, характеризующих ее состояние. К числу этих параметров относятся: шероховатость обработанной поверхности; точность размеров и формы; остаточные напряжения в поверхностном слое и др.

**Шероховатость обработанной поверхности** — отклонение фактического профиля поверхности от номинального.

Шероховатость обработанной поверхности характеризуется высотой неровностей  $Rz$  и средним арифметическим отклонением профиля  $Ra$ .

На шероховатость влияет скорость резания по зависимости, приведенной на рис. 2.1. В диапазоне скоростей от  $v_1$  до  $v_3$  высота микронеровностей наибольшая с максимумом при скорости  $v_2$ , что объясняется наростообразованием.

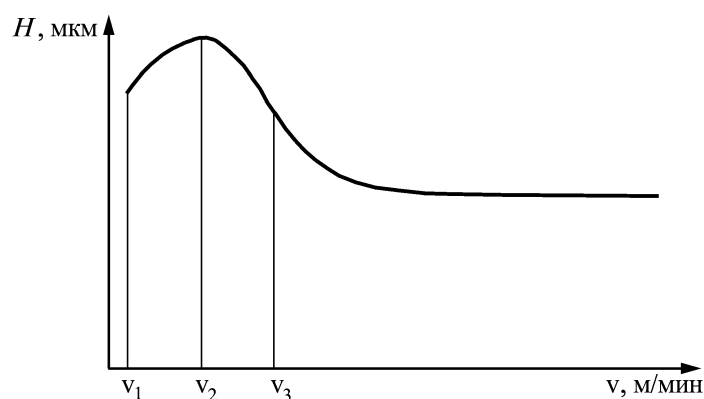


Рис. 2.1. Влияние скорости резания на шероховатость обработанной поверхности

Шероховатость обработанной поверхности — одна из важных характеристик качества детали, которая существенно влияет на ее эксплуатационные свойства.

Для деталей, работающих в условиях изнашивания, интенсивность их износа во многом зависит от действительной площади контакта между поверхностями трения. Площадь будет больше на гладких, менее шероховатых, поверхностях. Это уменьшит удельное давление при трении и повысит износостойкость поверхностей. Влияние среднего арифметического отклонения профиля на износ показано на рис. 2.2.

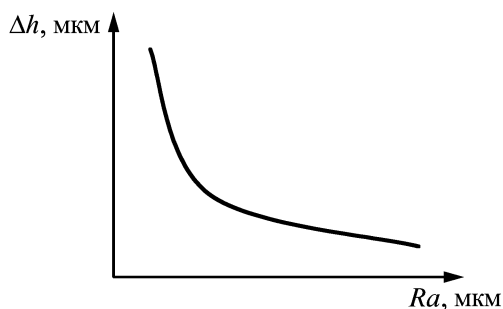


Рис. 2.2. Влияние  $Ra$  на износ детали

Для деталей, работающих в условиях знакопеременных нагрузок, важным параметром профиля является наибольшая высота микронеровностей. У дна впадин концентрируются внутренние напряжения, что при нагружении детали может привести к появлению трещин, снижающих ее прочность. На рис. 2.3 показано влияние  $Ra$  на усталостную прочность детали. Технологический фактор — шероховатость поверхности может уменьшить предел выносливости валов на 10–15 %.

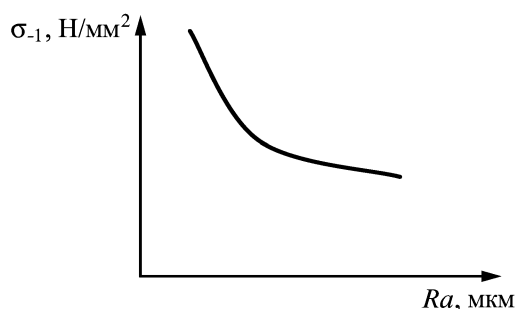


Рис. 2.3. Влияние  $Ra$  на усталостную прочность детали

Впадины микронеровностей являются местом сбора веществ, вызывающих коррозию металла. Поэтому чем больше шероховатость поверхность, тем быстрее разрушается металл (рис. 2.4).

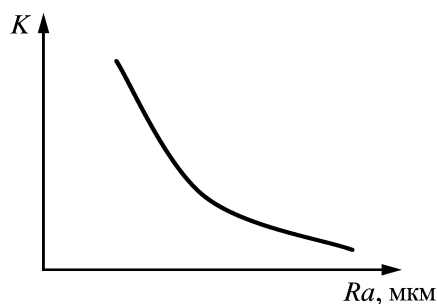


Рис. 2.4. Влияние  $Ra$  на коррозионную стойкость деталей

Высота микронеровностей влияет на прочность посадок при неподвижном соединении двух деталей. Из-за смятия выступов рельефа при запрессовке уменьшается расчетный натяг. В подвижных соединениях от величины шероховатости зависит плавность хода одной детали по другой.

Поэтому для эксплуатационных свойств детали важно обеспечить в процессе ее обработки оптимальную микрогеометрию.

При отладке технологического процесса обработки деталей, назначении режимов резания, обеспечивающих заданные параметры шероховатости, можно использовать формулы [9], устанавливающие связь между  $Ra$  и режимами резания. К причинам, из-за которых в течение времени работы технологической системы шероховатость может повышаться, относятся износ и выкрашивание режущего лезвия инструмента.

Затупление инструмента вызывает:

- образование шероховатой режущей кромки, профиль которой копируется на обработанной поверхности;

- появление нароста, наливов вследствие повышения шероховатости изнашивающейся передней поверхности инструмента; наросты, налипсы создают новый шероховатый профиль фактической режущей кромки, а периодичность образования и разрушения нароста, часть которого остается на обработанной поверхности, приводит к появлению задиров, трещин, повышающих шероховатость обработанной поверхности.

Кроме того, затупление инструмента изменяет динамические процессы при резании, которые влияют на шероховатость обрабатываемой детали.

Предупредить повышение шероховатости в процессе обработки детали за пределы допускового возможно путем диагностирования состояния ТС и, прежде всего, режущего инструмента, а также управления процессом резания, на основе полученных результатов диагностирования.

**Точность размеров и формы** — отклонения фактических размеров и формы изделия от номинальных.

Точность размеров определяется точностью установки инструмента относительно заготовки и износом инструмента при резании.

Точность формы определяется точностью установки заготовки на станке и упругими деформациями материала под действием силы резания.

Как известно, точность деталей, используемых для изготовления механизмов, может быть обеспечена двумя способами: посредством разбраковки уже изготовленных деталей и путем повышения технологической точности в процессе их изготовления. Преимущество второго способа очевидно — резко снижаются потери от брака.

Прогрессивные технологии металлообработки должны использовать второй способ обеспечения необходимой точности — технологические методы обеспечения точности. При изготовлении детали типа «вал» для последующего соединения с «втулкой» (рис. 2.5, а) возникновение отказа по параметру точности на станке, выработавшем часть своего ресурса точности, можно описать следующей упрощенной схемой.

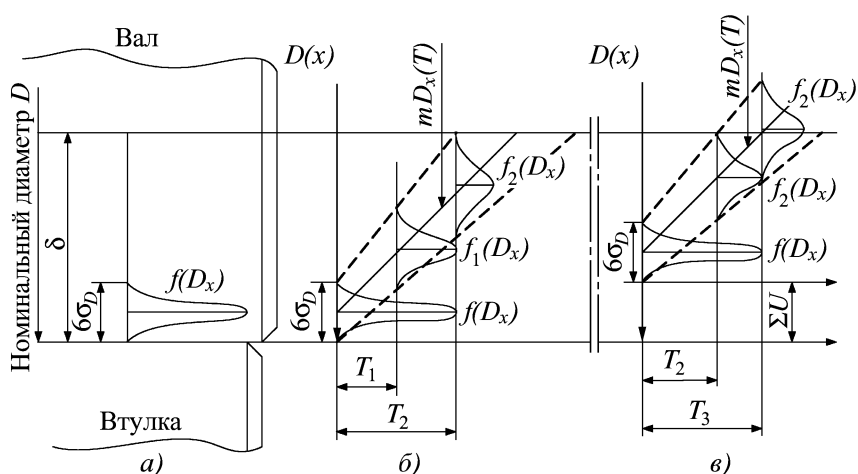


Рис. 2.5. Схема возникновения параметрического отказа технологической системы

На этой схеме показаны:

1) линейная зависимость  $D_x(T)$ , где  $D_x$  — получаемый при обработке размер диаметра вала;  $T$  — время эксплуатации станка;

2)  $mD_x(T)$  — математическое ожидание случайной функции  $D_x(T)$ .

Выход  $mD_x(T)$ , а также случайной функции  $D_x(T)$  за предел допуска  $\delta$  означает отказ ТС.

Для обеспечения резерва на износ вала станок следует настраивать так, чтобы центр группирования размера  $D_x$  обработанных деталей имел положение  $D - 3\sigma_D$ , где  $D$  — номинальный диаметр вала;  $f(D_x)$  — плотность распределения

диаметра обработанных деталей;  $\sigma_D$  — среднее квадратическое отклонение диаметра детали от уровня настройки. Тогда станок (новый или после ремонта) при обработке данной детали обеспечивает ее резерв на износ, в худшем случае равный  $\delta — 6\sigma_D$ , где  $\delta$  — регламентированный допуск.

С течением времени работы ТС в ее элементах возникают различные повреждения, которые нарушают заданную траекторию формообразующего движения инструмента в детали. Появляются систематические и случайные погрешности обработки. Они смещают математическое ожидание поля рассеивания диаметра вала в сторону нижней границы поля допуска и увеличивают  $\sigma_D$ . По истечении времени работы  $T_1$  станка функция плотности распределения диаметра изменяется до  $f_1(D_x)$ . В результате резерв на износ сокращается, снижается главный показатель качества детали — надежность. При  $T_2$  обнаруживается дальнейшая потеря надежности. Поле рассеивания диаметра вала подходит к нижней предельной границе допуска (см. рис. 2.5, б).

Для поддержания исходных параметров качества деталей, т.е. сохранения начальных параметров функции  $f(D_x)$  в течение времени между переналадкой станка, необходимо в процессе обработки деталей компенсировать повреждения в элементах технологической системы и тем самым минимизировать погрешности обработки. Эта задача решается с помощью средств диагностирования.

При длительной эксплуатации станка (показанной графически разрывом временной оси на рис. 2.5, в) в его деталях постепенно накапливаются необратимые повреждения как результат износа деталей, коррозии, релаксации напряжений в них и др. Эти повреждения снижают геометрическую точность, жесткость станка и увеличивают начальную неточность обработки. Резерв точности при обработке данной детали сокращается на  $\Sigma U$ , где  $U$  — погрешность обработки от необратимых повреждений в станке.

На станках, выработавших значительную часть своего точностного резерва, обработать высокоточные детали с большим резервом на износ не представляется возможным. Более того, существенно сокращается наработка  $T_2$ , в течение которой еще мала вероятность появления брака, т.е. деталей с размером  $D$  за пределами поля допуска  $\delta$ .

*Остаточные напряжения в поверхностном слое детали* возникают вследствие неравномерности деформации.

В поверхностном слое материала, подвергнутом касательным деформациям сжатия, при достижении области пластической деформации, возникают *растягивающие* остаточные напряжения. В тонком поверхностном слое мате-



риала, подвергнутом касательным деформациям растяжения при трении об инструмент, возникают *сжимающие остаточные напряжения*.

Растягивающие остаточные напряжения способствуют росту дефектов на поверхности изделия и его преждевременному разрушению при эксплуатации. Сжимающие остаточные напряжения способствуют увеличению сопротивления материала разрушению.

Качество поверхностного слоя связано с эксплуатационными свойствами деталей. Остаточные напряжения, микротвердость и глубина измененного слоя влияют на износостойкость, сопротивляемость усталости и пластическим деформациям, коррозионную стойкость и другие эксплуатационные свойства детали. Поэтому для ответственных деталей, которые должны иметь высокую надежность наряду с точностью и другими параметрами качества, устанавливают требования к качеству поверхностного слоя детали, обусловленные характером действующих на нее нагрузок, тепловым режимом ее работы, взаимодействием с сопряженными деталями и др.

Для обеспечения этих требований проектируют технологический процесс обработки. При изготовлении должны быть получены такие параметры качества детали и соответствующие эксплуатационные свойства, которые обеспечат заданные показатели ее надежности: среднюю наработку до отказа, вероятность безотказной работы и др. Основные эксплуатационные свойства детали определяют свойства металла, назначенного при проектировании детали, и параметры качества, приобретенные при ее изготовлении.

При изготовлении ответственной детали должна быть решена задача надежности, которая формулируется так: на основе зависимостей между показателями надежности детали и характеристиками условий ее применения изготовить деталь с такими эксплуатационными свойствами, при которых обеспечивается требуемый уровень показателей надежности. Необходимо знать зависимости между параметрами качества детали и ее эксплуатационными свойствами; между параметрами технологического процесса обработки и полученными параметрами качества детали.

Такие эмпирические зависимости установлены [9] для различных металлов и методов их обработки и включают в себя зависимости сопротивления усталости детали, с одной стороны, и глубиной и степенью наклепа, остаточными напряжениями, шероховатостью — с другой. Получены зависимости износостойкости детали от параметров ее качества. Эти зависимости позволяют для известного служебного назначения детали сформулировать требования к параметрам качества при ее обработке.

Управлять качеством поверхностного слоя при обработке дают возможность эмпирические формулы, позволяющие рассчитать микротвердость и глубину наклепа, а также шероховатость для принятых режимов, геометрии инструмента и других факторов процесса резания.

Все эти результаты исследований, а также опыт изготовления ответственных деталей накапливаются в базе данных, которые используются при реализации алгоритма достижения требуемых свойств поверхностного слоя детали технологическими методами (рис. 2.6) [53].



Рис. 2.6. Алгоритм получения требуемого состояния поверхностного слоя детали

Алгоритм разработан для изготовления детали с заданными эксплуатационными свойствами, которые соответствуют ее служебному назначению и определяют показатели надежности. Для их обеспечения рекомендуются значения параметров поверхностного слоя готовой детали и формируется технологический процесс ее изготовления, при котором достигаются указанные параметры. Назначаются режимы резания, инструмент, технологическое оборудование, марка СОТС. Рекомендации по ним должны быть в базе знаний или основаны на расчетах по математическим моделям.

При назначении параметров качества нужно учитывать их возможные изменения в процессе эксплуатации детали. Для сохранения размеров трущихся деталей в пределах поля допуска необходимо создать при изготовлении эксплу-

атационный резерв точности. Начальные параметры шероховатости за период приработки детали изменяются до оптимальных при заданных условиях работы значений. Поэтому для сокращения износа в этот период шероховатость следует назначать близкой к оптимальной. Вследствие микропластических деформаций на поверхностях трения может изменяться наклеп.

## 2.2. Экономические критерии качества

Современный уровень развития технологии металлообработки позволяет достичь практически любых показателей качества и необходимой надежности изделия. Следовательно, обеспечить высокую надежность можно не только за счет применения более качественных материалов или изменения конструкции, но и за счет выбора рационального производственного процесса и методов повышения качества деталей. Решение по их выбору необходимо принимать на основе объективных критериев. Таким признанным и распространенным критерием является экономическая эффективность.

В металлообработке эффективным считается процесс, который обеспечивает изготовление детали заданного качества, с необходимой производительностью при минимальной себестоимости. Выбор процесса является результатом сопоставления вариантов по показателям эффективности, к которым относятся параметры качества изделия, производительность и себестоимость изготовления. При этом следует учитывать, что один и тот же технологический процесс, эффективный для одного типа производства, например, серийного, может быть неэффективным для другого типа, например, массового.

Для каждого конкретного типа объектов содержание понятий эффективности и точного смысла показателей эффективности задаются техническим заданием и должны включаться в проектную или нормативно-техническую документацию.

Это относится и к изготовлению конкретных деталей. Так, при получении деталей или заготовок, для которых нет жестких ограничений по параметрам качества, основным показателем эффективности технологического процесса является или производительность, или себестоимость изготовления. При этом следует учитывать, что избыточная производительность может привести к повышению себестоимости обработки по следующим *причинам*:

- повышение производительности предварительной обработки потребует дополнительных затрат за счет повышенного расхода инструмента, энергии и др.;
- избыточное количество деталей необходимо складировать, что также потребует дополнительных затрат.

В отлаженном производственном процессе производительность должна быть такой, чтобы обеспечить подачу заготовки для окончательной обработки точно в срок. В этом случае показателем эффективности становится себестоимость обработки.

При окончательной обработке ответственных деталей высокого качества главная цель процесса — достижение необходимых параметров качества и их воспроизводимости. Качество становится главным показателем эффективности. Получение высокой производительности и низкой себестоимости — вторичные цели. Без достижения главной цели они теряют смысл.

Эффективность производства достигается только тогда, когда она обеспечивается еще на стадии проектирования производственного процесса и реализуется при обработке, включая в себя контроль и испытания. Требования, предъявляемые к каждому этапу, определяются служебным назначением детали. Под служебным назначением понимают четко сформулированную конкретную задачу, для решения которой предназначается изделие. Служебное назначение обеспечивается необходимыми параметрами качества.

Качеству изделий следует уделить особое внимание. В конкурентной борьбе за рынки сбыта успех имеют те производители, которые выпускают продукцию лучшего качества. Поэтому среди отмеченных показателей эффективности производственного процесса качество является часто главным показателем.

### 2.3. Обеспечение надежности деталей

В общем случае деталь характеризуют *три группы параметров качества*.

1. Параметры основных свойств термически обработанного металла, из которого деталь будет изготовлена: твердость, прочность, теплостойкость и др.

2. Параметры, рассмотренные выше: точность размеров, формы и шероховатость поверхностного слоя.

3. Эксплуатационные параметры: износостойкость, прочность, усталостная прочность, коррозионная стойкость и др. (рис. 2.7).

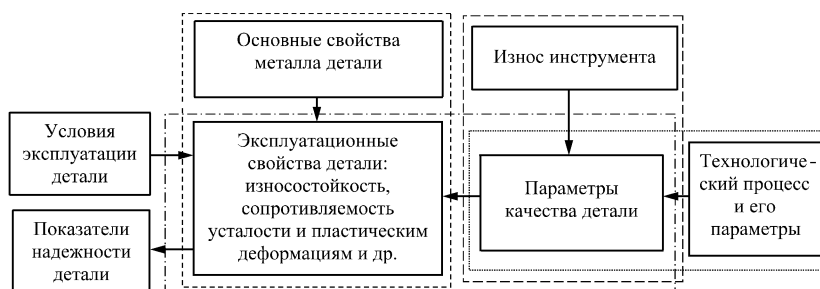


Рис. 2.7. Схема обеспечения надежности детали

Параметры, перечисленные в п. 3, формируются параметрами первых двух групп. В свою очередь, в зависимости от служебного назначения детали ряд параметров третьей группы определяют выбор количественных показателей надежности детали.

Параметры эксплуатационных свойств в отличие от параметров качества первой и второй групп не могут быть определены стандартными метрологическими средствами или способами измерения физических величин. Поэтому их влияние на количественные показатели надежности выявляются в результате исследований или на специально созданных стендах, имитирующих условия рабочего нагружения детали, или в процессе ее эксплуатации.

В результате изучения этого влияния появляется возможность целенаправленно назначать параметры качества обработки, необходимые для заданной надежности детали. С другой стороны, возможно разработать систему диагностирования элементов технологической системы, обеспечивающей заданное качество обработки.

Система обеспечения надежности включает в себя расположенные во временной последовательности подсистемы: проектирование технологического процесса, изготовление, контроль качества изготовленной детали, испытание (исследование) и эксплуатацию детали (рис. 2.8). Этот ряд подсистем относится к изготовлению опытной детали — прототипа и отладки технологического процесса. Параметры качества опытной детали и интегральный параметр качества — надежность, соответствующие требованиям служебного назначения детали при проектировании, конструктор назначает исходя из опыта эксплуатации подобных деталей или результатов предварительных исследований, предшествующих конструированию.

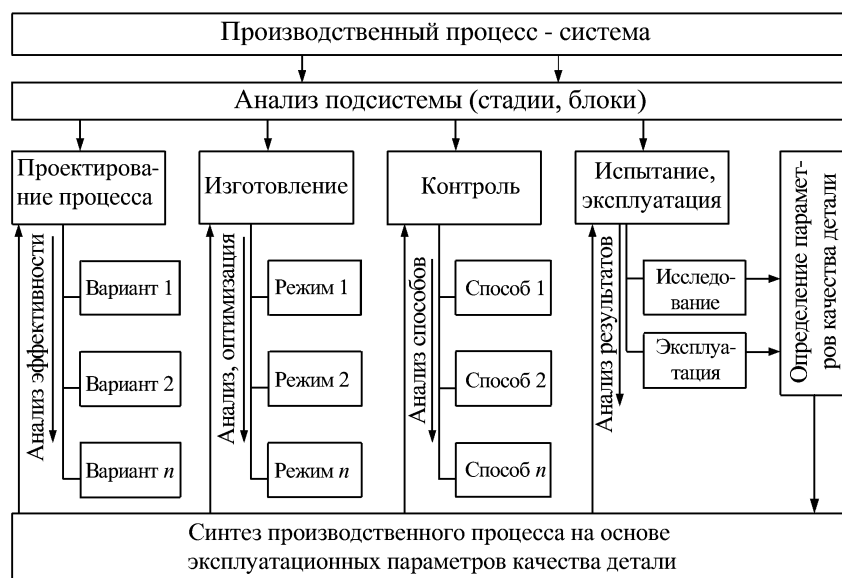


Рис. 2.8. Системный подход к разработке производственного процесса

Окончательные параметры качества для серийных деталей устанавливаются по результатам исследования надежности опытных деталей, их испытаний и эксплуатаций. Для изготовления детали с уточненными параметрами качества поступает информация о внесении изменений в конструкторскую документацию, в технологический процесс и в параметры контроля. Анализ вариантов технологического процесса, режимов обработки, способов контроля приводит к достижению уточненных параметров качества и других дополнительных показателей эффективности в каждой подсистеме. Принятие в них эффективных решений обеспечивает в целом эффективный процесс изготовления детали.

Таким образом, этапы жизненного цикла детали составляют замкнутую виртуальную систему. Внутри нее действуют прямые и обратные информационные связи, направленные на достижение главной цели – изготовление детали с заданными показателями надежности при выполнении ею служебного назначения. Эта цель объединяет все подсистемы.

Методологическими приемами системного подхода являются системный анализ и синтез разрабатываемого процесса. **Анализ** — расчленение процесса на элементы (подсистемы) более доступные для решения конкретных задач, служащих общей цели — достижению эффективности производства. В рамках каждой подсистемы выполняется анализ альтернативных решений. **Синтез** — соединение различных подсистем в единое целое (в систему) на основе достижения необходимых параметров качества деталей. Синтез неразрывно связан с анализом.

Системный подход требует рассматривать эффективность каждого этапа жизненного цикла — каждой подсистемы. Из них складывается эффективность изготовления изделия.

#### **2.4. Повышение качества деталей**

Изготовление серийных деталей на автоматизированном оборудовании производится, как правило, по уже отлаженному технологическому процессу. Однако при этом не всегда удается обеспечить регламентированное качество деталей и другие показатели эффективности. Связано это с тем, что элементы ТС подвергаются в процессе обработки изнашиванию, тепловым, силовым и динамическим воздействиям, которые вызывают соответствующие повреждения в станке, инструменте и приспособлении [8]. Погрешности обработки от этих повреждений добавляются к исходным погрешностям траектории формообразования и настройки станка. При достижении суммарной погрешностью предельного значения наступает отказ ТС по параметру качества детали (параметрический отказ).

В связи с тем, что значения составляющих и суммарных погрешностей являются случайными величинами, как случайны и функции их изменения, исключается возможность их программной компенсации в процессе обработки.

При обработке серийных деталей на автоматизированных станках также должна функционировать система обеспечения заданных параметров качества деталей. Она состоит из ряда подсистем: подсистемы определения параметров качества деталей и повреждений в станке и инструменте, подсистемы принятия решений по результатам выявленных повреждений и, наконец, реализации принятых решений по управлению процессом обработки. Между подсистемами существуют прямые и обратные информационные связи, направленные на достижение главной цели обработки. Информационная связь реализуется системой диагностирования. Все действия в подсистемах, выполняемые в реальном времени обработки, входят в понятие диагностирования ТС.

Системы диагностирования устанавливаются на автоматизированное оборудование, следовательно, диагностирование должно осуществляться в автоматическом режиме. Обеспечивается автоматическое определение состояния технологической системы и ее элементов, автоматическое определение выходных параметров деталей и на основе полученных данных принимается решение по управлению процессом обработки. Реализация этих действий требует использования «интеллектуальных» средств. Интеллектуализация систем диагностирования начинается с изучения и выбора физического процесса, адекватно отображающего состояние объекта диагностирования и датчиков этого процесса, с использования ЭВМ.

Следует отметить, что диагностирование всегда предполагает действие управления. Управление — это не только автоматическое отключение станка при отказах, но, прежде всего, адаптивное управление процессом обработки, обеспечивающее необходимые показатели качества деталей за счет обратной связи в системе диагностирования. Поэтому диагностирование является одним из методов повышения эффективности технологического процесса, надежности обработанных деталей и воспроизводимости их качества.

Получение необходимых параметров качества детали по алгоритму, показанному на рис. 2.6, может быть нарушено вследствие того, что при обработке появляется фактор, существенно влияющий на формирование обработанной поверхности и поверхностного слоя детали. Это износ режущего инструмента. Его влияние показано на рис. 2.7.

Ранее отмечалось влияние износа на точность обработки, причем вследствие случайного характера влияния запрограммировать заранее коррекцию тра-

ектории формообразующего движения на станке не представляется возможным. Также случайно влияние износа на шероховатость обработанной поверхности и параметры качества поверхностного слоя. По этой причине не учитывается износ инструмента в технологических формулах расчета  $Ra$  и  $Rz$ . Характер влияния износа на параметры качества поверхностного слоя детали выявляются экспериментально для конкретных условий обработки.

На рис. 2.9 показано влияние очага износа  $h_3$  на задней поверхности инструмента на микротвердость  $HV$  и остаточные напряжения  $\sigma$ . Влияет на эти параметры и возрастающий по мере изнашивания инструмента радиус округления  $\rho$  его режущей кромки (рис. 2.10). Их влияние объясняется природой формирования поверхностного слоя.

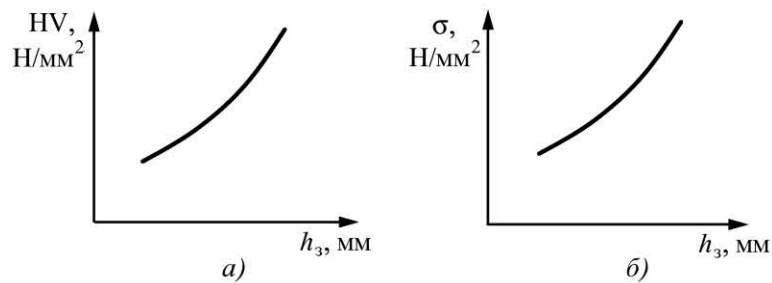


Рис. 2.9. Влияние износа инструмента  $h_3$  на микротвердость (а) и остаточные напряжения (б) в поверхностном слое детали

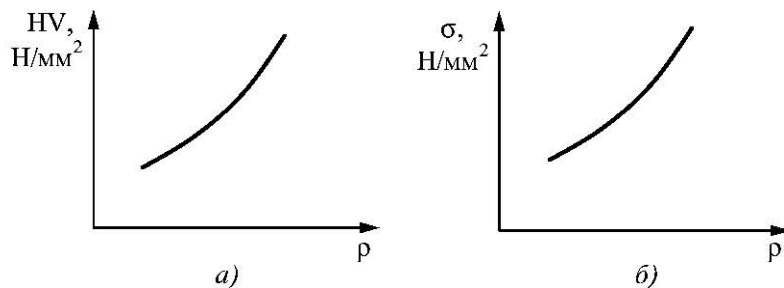


Рис. 2.10. Влияние радиуса округления  $\rho$  на микротвердость (а) и остаточные напряжения (б) в поверхностном слое детали



## ГЛАВА 3. НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Для оценки надежности ТС различного конструктивного исполнения исходным материалом является опыт их эксплуатации в виде большого объема статистических исследований. При этом учитываются возможности использования вычислительной среды, входящей в состав многоуровневой системы управления технологической системой, для моделирования в реальном масштабе времени.

В качестве методологической основы применяют системный анализ, ориентированный на раскрытие целостности ТС и многообразных типов их связей. ТС представляется моделями, для которых принимаются как количественные, так и качественные оценки.

### 3.1. Системный анализ технологических систем

Обращение к методам системного анализа в задачах идентификации устойчивого функционирования ТС обосновывается рядом их особенностей.

Гибкий технологический процесс является конечным множеством априорно неопределенных сочетаний технологических операций, их режимов и переходов. Модели, имитирующие событийные дискретные явления, могут применяться только на срок реализации конкретной гибкой технологии. На практике не удастся построить регулярные процедуры перехода от общих универсальных описаний к конкретным моделям отдельных реализаций гибкого технологического процесса. При этом внутренние свойства ТС в каждой реализации управления могут изменяться. Например, с ростом сил резания из-за нелинейности демпфирующих свойств ТС могут изменяться характеристики ее элементов. Анализ технологических процессов, состоящих из различных операций и технологических переходов, предполагает использование множества разнообразных критериев оценки качества и эффективности, построение которых каждый раз составляет самостоятельную задачу.

Функционирование ТС характеризуется неопределенностью как из-за действия факторов стохастического характера внешней среды, так и со стороны возникающих внутри него случайных процессов. Состояние ТС измеряется с погрешностями по всем координатам векторного пространства состояний. Часть внешних возмущающих воздействий не могут быть измерены в ходе процесса. При разработке совокупности алгоритмов управляющего устройства ТС для спектра гибких технологических процессов обработки резанием предполагаются известными только лишь общие характеристики возмущений и по-

грешностей измерения, а конкретные реализации их непредсказуемы. Ход управляемого процесса, а следовательно, и качество определяются выбранным управлением неоднозначно.

Формализация ТС для обработки резанием крайне затруднительна по следующим *причинам* [8].

1. В структурном отношении эти ТС отличаются многоконтурностью информационных и энергетических связей подсистем, функциональных блоков и управляемых процессов. Современные ТС для многоцелевого технологического назначения строятся по блочной реконфигурируемой структуре, обеспечивающей перестройку на требуемую технологическую компоновку. Например, для совмещения точения, фрезерования, сверления, нарезания резьбы и контрольных операций в одном ГПМ его рабочие органы должны быть многоцелевыми.

2. При построении временных обратных связей (например, введение измерителя параметра шероховатости поверхности обрабатываемой детали) приводит к изменению общей структуры связей, в результате чего реакция ТС в рассматриваемой предметной области становится неадекватной на одни и те же воздействия.

3. Современные ТС обладают большим количеством управляемых координат, измеряемых во времени и пространстве разномасштабно.

В ТС действуют процессы различной физической природы, поэтому каждая моделируемая ситуация должна адекватно отображаться в модели системы. А в этом случае составление целостных описаний становится междисциплинарной проблемой.

К сожалению, теория процесса резания недостаточно разработана в части моделирования нормального функционирования и отказов ТС. Такие теоретические разработки необходимы для создания аналитических моделей резания множества программируемых режимов формообразования. Так как резание является конечным, замыкающим звеном движений рабочих органов металлорежущих ТС и определяет качество формообразования, теоретические предпосылки для создания баз данных по надежности особенно актуальны.

Важной с точки зрения моделирования является непредсказуемость поведения системы, несмотря на изученность ряда входящих в нее подсистем. Это в первую очередь относится к изменению свойств динамической системы ТС при нормальном функционировании составляющих подсистем и блоков. Например, из-за нарушения фазовых соотношений при взаимодействии приводов подач и главного движения могут наблюдаться неустойчивые автоколебания технологической системы, что приводит к параметрическому отказу.

Многолетние исследования рассмотренных свойств [1] позволили установить, что целенаправленное исследование ТС не обеспечено апробированным адекватным математическим аппаратом, хорошо зарекомендовавшим себя на практике.

Имеющийся опыт изучения ТС показывает, что каждый раз необходимо определять процедуры системного анализа и их сочетания применительно к конкретному оборудованию и целям моделирования. Тем не менее существует общая структура системных исследований. Исходным при построении математической модели является вербальное описание, имеющее, как и все этапы системного анализа, целевую направленность. В процессе построения вербальной модели осуществляются: постановка проблемы, анализ исходной информации, формулировка целей моделирования, описание рабочих процессов и функционального взаимодействия подсистем, требуемая формализация. Важной задачей здесь является формулирование целей моделирования и наиболее принципиальных гипотез, которые должны найти отражение в моделях.

Конечной целью системного анализа ТС являются получение и оценка моделей изменения их динамики, определяющей устойчивость функционирования этих систем. От свойств моделей зависят оперативность и адекватность информации. Системный анализ содержит все перечисленные процедуры, но имеет для ТС определенную специфику. Связано это с тем, что вся текущая информация об отказах и восстановлении при использовании моделей надежности получается экспериментально в реальном масштабе времени. Однако в процессе эксплуатации требуется постоянно осуществлять адаптацию моделей отдельных процессов к условиям функционирования ТС с обновлением начальных условий.

### **3.2. Виды повреждений и отказов режущего инструмента**

Исследования и производственный опыт показывают, что значительная, а иногда и большая часть допуска (резерва качества параметра) перекрывается повреждениями в технологической системе, связанными с затуплением режущего инструмента [60]. Помимо размерных погрешностей обработки повышается шероховатость, изменяются показатели качества поверхностного слоя обработанной детали. Повреждения инструмента — это необратимые повреждения, вызванные процессами средней скорости протекания. Они влияют на показатели качества обработки как непосредственно за счет нарушения формы режущей кромки и ее расположения относительно базовых поверхностей детали, так и через влияние на другие *виды повреждений в ТС*:

- тепловые повреждения, так как растут мощности источников тепла в зоне резания с увеличением износа инструмента;
- силовые повреждения, так как повышаются силы по мере затупления инструмента;
- динамические повреждения, так как растет мощность колебаний;
- наростообразование, так как износ инструмента вызывает увеличение размера нароста.

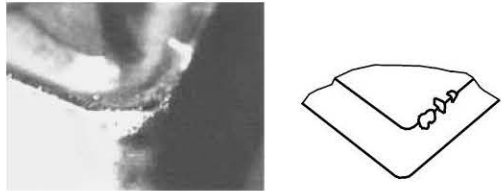
В результате затупление инструмента, в отличие от других рассмотренных повреждений, обязательно приведет к отказу ТС, если не будет выполнена его предупредительная замена. Иногда повреждение режущего инструмента можно наблюдать и не в результате его затупления. Так, при сверлении отверстий на глубину более трех диаметров возможно пакетирование стружки в каналах сверла, что зачастую приводит к силовому повреждению инструмента и отказу ТС. Поэтому при сверлении отверстий в материалах, дающих стружку, неблагоприятную для отвода, необходимо обеспечить формирование стружки, пригодной для удаления ее из зоны резания. Таким образом, **инструмент** — это особый объект технологии металлообработки: разнообразные условия эксплуатации и, следовательно, нагружения его режущей части вызывают многообразные виды повреждений и отказов; скорости изнашивания инструмента значительно выше, чем скорости изнашивания деталей и узлов станка.

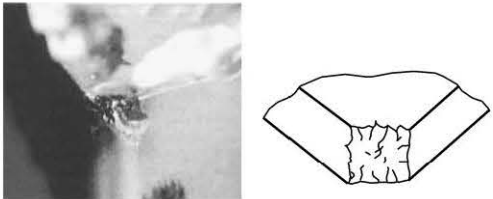

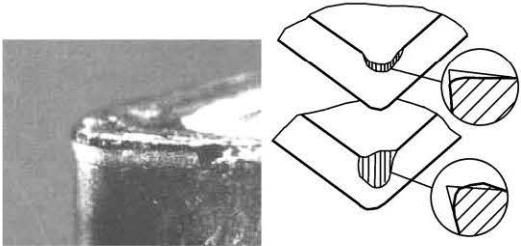
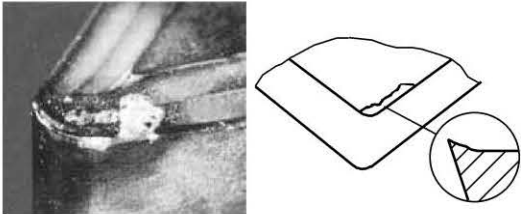
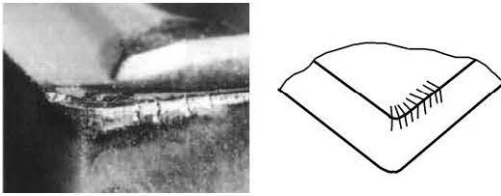
Отказ инструмента может произойти из-за повреждений режущей части деталей механического крепления режущей пластины или корпуса инструмента.

Превалируют отказы режущей части. Они могут быть следующих видов [15] (табл. 3.1).

Таблица 3.1

### Виды отказов режущей части инструмента

<b>1. Хрупкое разрушение</b>	
<b>Выкрашивание</b> режущей кромки — это микросколы режущего лезвия	
<b>Причина</b>	
Повышенная хрупкость режущей кромки. Низкая прочность режущей кромки. Неправильная геометрия. Нарост. Вибрация	
<b>Скальвание</b> режущего лезвия происходит при поломке инструмента в результате повреждения его корпуса или подкладки	

<b>Причина</b>	
<p>Чрезмерный износ.          Инструментальный материал повышенной хрупкости.          Недопустимо высокие режимы резания: глубина, подача.          Вибрации из-за нежесткого закрепления.          Изношенная подкладка.          Пластина меньшего типоразмера</p>	
<p>Неправильный профиль стружколома.          Обрабатываемый материал повышенной вязкости.          Слишком низкая подача и глубина резания</p>	
<b>2. Разрушение вследствие пластической деформации контактной зоны режущего участка</b>	
<b>Пластическая деформация</b> , происходящая в результате деформации режущей кромки и изменения геометрии	
<b>Причина</b>	
<p>Высокая температура.          Главная составляющая силы резания чрезмерно велика.          Низкая твердость.          Неправильно выбран угол заострения режущего клина.          Чрезмерно большой передний угол</p>	
<b>Нарост</b> имеет место при налипании обрабатываемого материала на режущую кромку	
<b>Причина</b>	
<p>Сваривание обрабатываемого и инструментального материалов.          Низкая скорость.          Отрицательная геометрия.          Высокая шероховатость передней поверхности.          Высокое тепловыделение</p>	
<b>Термические трещины</b> (в поперечном направлении к режущей кромке) образуются при воздействии на инструмент переменных температур или от циклического нагрева	
<b>Причина</b>	
<p>Высокие температурные перепады.          Переменное резание.          Неоднородная охлаждающая жидкость.          Переменная твердость обрабатываемого материала</p>	
<b>3. Изнашивание поверхностей режущего участка до величины допустимого износа</b>	
<b>Износ по задней поверхности</b> — это износ инструмента, происходящий в результате трения об обрабатываемую деталь	

<p align="center"><b>Причина</b></p> <p>Высокая скорость резания. Низкая износостойкость режущего элемента. Малая величина заднего угла. Высокая шероховатость задней поверхности. Большой радиус при вершине режущего лезвия. Высокая интенсивность диффузионного износа</p>	
<p><b>Лунка износа</b> образуется на передней поверхности инструмента в результате схода по ней стружки</p>	
<p align="center"><b>Причина</b></p> <p>Высокая интенсивность окислительного процесса. <b>Низкая износостойкость.</b> Высокая температура. <b>Неправильная геометрия.</b> Чрезмерный нагрев</p>	
<p><b>Борозда износа</b> – это износ на режущей кромке, соответствующий глубине резания</p>	
<p align="center"><b>Причина</b></p> <p>Высокая интенсивность окислительного процесса. Низкая износостойкость. Повышенная твердость обрабатываемого материала. <b>Неправильная геометрия.</b> Низкая твердость. Неправильный стружколом</p>	

В связи с тем, что хрупкое и пластическое разрушение связаны с прочностью, а изнашивание — с износостойкостью, предрасположенность инструмента к тому или иному виду отказа, прежде всего, зависит от физико-механических свойств (основных свойств) инструментальных материалов.

При изучении физических основ процесса резания выявляют условия работы режущего инструмента, по которым формулируют требования, предъявляемые к инструментальным материалам. Так, например, высоким напряжениям на поверхностях контактной зоны лезвия, вызывающим контактные пластические деформации, противопоставляется высокая твердость; значительным силам — прочность, а высоким температурам, разупрочняющим инструментальный материал, — его высокая теплостойкость. Предъявляемые требования в большей или меньшей степени обеспечиваются основными свойствами различных инструментальных материалов. Под основными свойствами понимают

свойства, которые должны иметь инструментальные материалы в готовом к работе инструменте. В табл. 3.2 главные из этих свойств приведены для инструментальных материалов, широко применявшихся в прошлом веке. Из табл. 3.2 видно, что инструмент, оснащенный твердым сплавом и режущей керамикой, менее прочен, чем стальной. Поэтому доля отказов первого вида у твердосплавного и керамического инструмента значительно выше. Примерная структура отказов твердосплавных инструментов в производственных условиях показана в табл. 3.3, быстрорежущих — в табл. 3.4.

Таблица 3.2

### Свойства инструментальных материалов

Инструментальный материал	Предел прочности, Н/мм <sup>2</sup>			Твердость, HRA, HRC	Теплостойкость, °С
	при изгибе $\sigma_{изг}$	при растяжении $\sigma_{раст}$	при сжатии $\sigma_{сж}$		
<i>Твердые сплавы</i>					
ВК3, ВК3М	1 176	500	4 270	89,5	900–930
ВК6, ВК6М	1 519	500	4 390	88,5	900–930
ВК8	1 666	500	4 210	87,5	900–930
T30K4	980	500	3 500	92	1 000–1 030
T5K12	1 666	500	3 200	87	1 000–1 030
<i>Безвольфрамовые твердые сплавы</i>					
ТН20	1 050	–	3 430	90	800
КТН16	1 200	–	–	89	800
<i>Быстрорежущие стали</i>					
P18	2 900	1 700	3 800	63–64	620
11M5ФЮ	3 500	–	–	64–65	620
<i>Режущая керамика</i>					
<i>Оксидная</i>					
ЦМ-332	300–350	–	5 000	91	1 200
ВО-13	400–450	–	2 850	92	1 100
<i>Оксидно-карбидная</i>					
В3	650	–	–	93	1 200
ВОК-63	650	–	–	93	1 200
ВОК-71	650	–	–	93	1 200
<i>Оксидно-нитридная</i>					
Кортинит ОНТ-20	640	–	2 250	92	1 200
На основе нитрида кремния Силинит-Р	500–700	–	2 500	94–96	1 200

## Структура отказов твердосплавного инструмента

Инструмент	Материал режущей части инструмента	Материал детали	Вид отказов, %		
			Изнашивание	Хрупкое разрушение	
				Скальвание (поломка)	Вькрашивание
Резцы проходные	ВК8	СЧ 12	19	63	18
	T15K6 T5K10	Конструкционная углеродистая сталь	70–80	10–30	1–7
Отрезные резцы	T15K6	Конструкционная углеродистая сталь	50	34	16
Торцовые фрезы	T5K10	Конструкционная углеродистая сталь	25–30	50	25
	ВК8	СЧ 12			

Таблица 3.4

## Структура отказов инструмента из быстрорежущей стали P6M5

Инструмент	Вид отказов, %		
	Изнашивание	Хрупкое разрушение	Пластическая деформация
Протяжки	87	5	8
Прошивки	95	5	–
Шевер	69	31	–
Фреза червячная	90	2	8
Развертка	95	2	3
Зенкер	79	7	14
Сверло	70	16	14
Метчик	25	12	63
Долбяк	56	20	24
Резец фасонный	84	2	14

Структура отказов инструмента помимо основных свойств инструментального материала зависит также от типа производства, стабильности технологического процесса, начального состояния инструмента.

**Начальное состояние инструмента** — это состояние готового к работе инструмента, характеризующееся следующими параметрами: формой, геомет-



рией, размерами, шероховатостью рабочих поверхностей, а также основными свойствами и структурой инструментального материала.

Параметры начального состояния должны быть оптимальны для заданных условий резания.

### 3.3. Системный подход к инструменту

Высокие требования к надежности инструмента и экономичности его эксплуатации обуславливают необходимость системного подхода.

Применение системного подхода к инструменту основывается на общей теории проектирования [20, 67], системном анализе [39], теории принятия решений [21] и др.

В большинстве случаев такие параметры ТС, как условия эксплуатации инструментов, являются заданными (входными); совокупность инструментов и режимы их эксплуатации — выходными параметрами, а критерии оптимальности (целевые функции) и человеческий фактор — промежуточными, связанными с условиями эксплуатации.

Системный подход предполагает, что не только объект проектирования, но и процесс его создания являются полной системой, обеспечивающей достижение поставленной цели. На рис. 3.1 показан процесс, который рекомендуется при разработке системы инструмента широкого назначения. Этот процесс включает в себя взаимосвязанные этапы, многие из которых часто выполняются недостаточно полно и в отрыве друг от друга.

#### 3.3.1. Анализ условий эксплуатации

На основе изучения статистических данных формируют условия эксплуатации инструмента и характеризующие ее факторы (этап 1, рис. 3.1), анализируют свойства, определяющие качество системы инструмента для работы в этих условиях (этап 2). Далее генерируются идеи, касающиеся конструкторских разработок *трех уровней*:

- а) структуры системы инструмента (совокупности типоразмерных рядов инструментов);
- б) структуры инструмента, входящего в систему;
- в) конструкции каждого модуля, составляющего инструмент (этап 3).

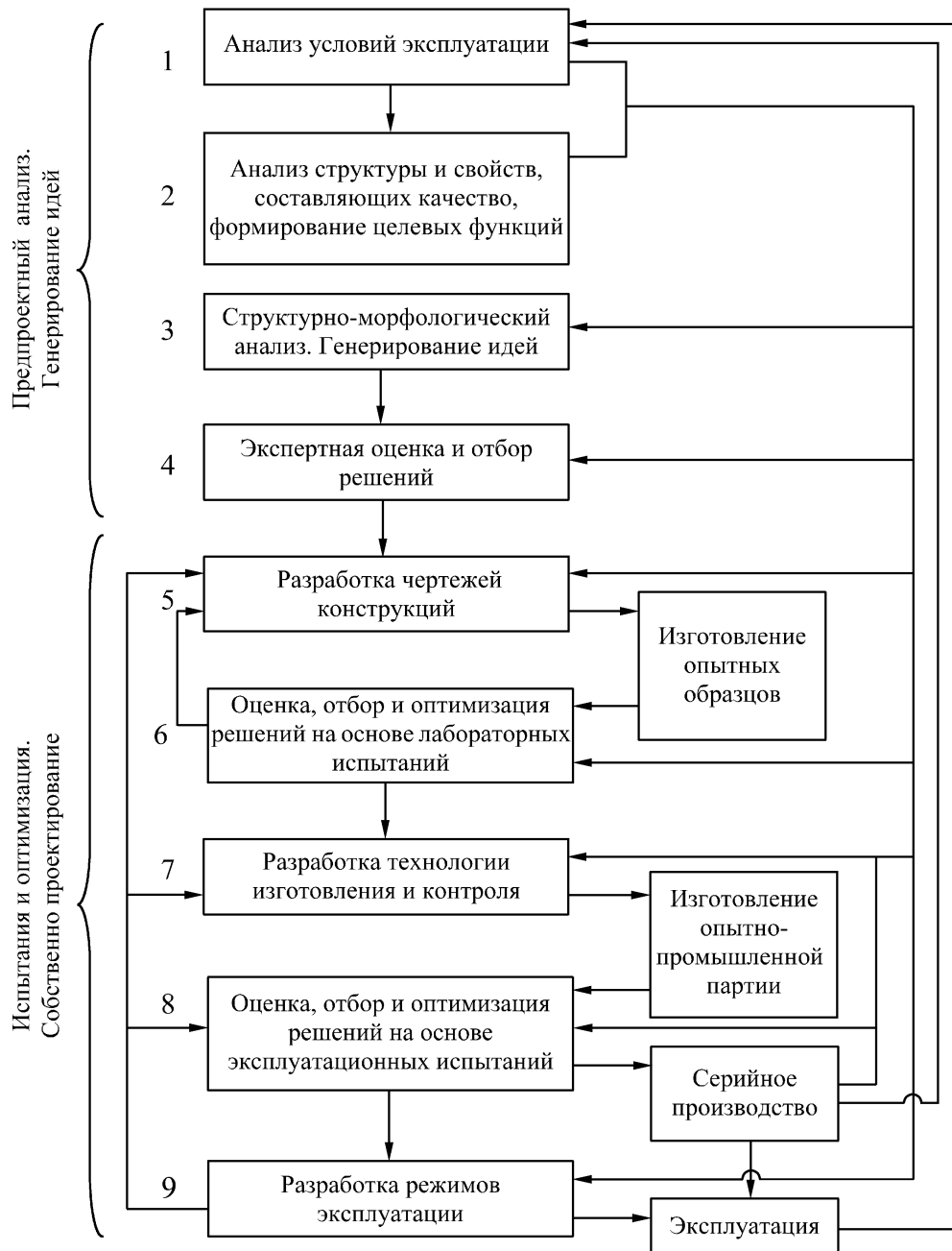


Рис. 3.1. Процесс создания системы инструмента

Эти решения подвергаются экспертной оценке и отбору (этап 4), а отобранные решения после разработки чертежей (этап 5) — лабораторным испытаниям (этап 6), лучшие из них — эксплуатационным испытаниям (этап 8). На этапе 7 решаются технологические вопросы и разрабатываются мероприятия по повышению качества изготовления инструмента. На этапе 9 решаются вопросы рациональной эксплуатации инструмента (определение режимов резания, норм расхода инструмента и разработка организационных мероприятий инструментообеспечения).

Выявление новых решений и усовершенствование выдвинутых ранее происходит на протяжении всей работы, что показано на рис. 3.1 линиями обратных связей.

При разработке системы инструмента широкого назначения необходимым этапом проектирования является интенсивное генерирование идей. В настоящее время предложено более 40 специальных методов поиска новых решений [67]. Среди них ассоциативные методы, наборы контрольных вопросов, синектика и алгоритмы творческого процесса. Часто в начальном периоде работы пользуется метод «мозгового штурма» (*brainstorming*).

Особое место занимает **структурно-морфологический анализ** — неотъемлемая часть проектирования при системном подходе.

Этот анализ состоит из следующих **стадий**: объект проектирования структурируется, составляется перечень признаков, характеризующих как его структуру, так и форму частей, выявляются возможные варианты, рассматриваются их сочетания и осуществляется экспресс-оценка. Это дает полный перебор всех вариантов, выявляет новые, подвергает все варианты классификации, кодированию и оценке и тем самым готовит исходную информацию для автоматизированного проектирования систем инструмента.

Для анализа условий эксплуатации инструмента (этап 1, см. рис. 3.1), используемого на производстве, разработан **метод моментных наблюдений** [59]. Он состоит в том, что в случайные моменты времени обходят станки, на которых применяют анализируемый инструмент, и фиксируют состояние технологического процесса и условия обработки. Время нахождения инструмента в соответствующем состоянии (процесс резания, замена инструмента, простой и т.д.) или время работы в соответствующих условиях (материал и типоразмер детали, состояние поверхности заготовки, глубина резания и т.д.) прямо пропорциональны числу зафиксированных случаев нахождения в этом состоянии или при этих условиях.

Чтобы облегчить выбор минимально необходимого числа регистрируемых факторов (обычно 10–30), целесообразно на основе предшествующего опыта или справочных данных оценить важность факторов для достижения целей проектирования, например, оценить их влияние на наиболее просто определяемые целевые функции.

Пример ранжирования факторов с учетом их влияния на производительность процесса резания при черновой и получистовой обработке заготовок из конструкционных сталей на станках токарной группы приведен в табл. 3.5, в которой ранг – это число, показывающее степень влияния факторов, расположенных в порядке уменьшения их влияния на производительность.

**Ранжирование факторов по степени их влияния  
на производительность резания на токарных станках [44]**

№ п/п	Фактор	Ранг
1	Основной размерный параметр станка	1
2	Отношение максимальной длины к максимальному диаметру заготовки	3
3	Твердость обрабатываемых сталей	2
4	Наличие корки или перерывов в резании	6
5	Глубина резания	5
6	Конструкция резца	4
7	Конструкция режущей пластины	7
8	Главный угол в плане	8

Наибольшее влияние на изменение производительности оказывает *основной размерный параметр станка*. Для токарного станка это наибольший диаметр  $D_c$  устанавливаемой заготовки. Это в основном связано с изменением жесткости и виброустойчивости технологической системы, а также с изменением прочности инструмента. Изменение  $D_c$  для токарных станков от 320 до 2 500 мм увеличивает максимальную глубину резания  $t_{max}$ , допускаемую по виброустойчивости технологической системы в 3,3 раза, подачу  $S$ , определяемую прочностью инструмента, — в 7,6 раза и скорость резания  $v$ , определяемую износостойкостью инструмента, — в 1,5 раза. В результате этого производительность резания может изменяться до 34 раз.

**Метод длительных наблюдений** предназначен для получения данных о зависимости периодов стойкости и числа периодов стойкости от различных факторов. Эти зависимости отражают процессы изнашивания и разрушения режущего инструмента и являются исходными для оптимизации его конструкции. Метод предусматривает непрерывное наблюдение за процессом резания до отказа инструмента и требует присутствия исследователя на рабочем месте. Обычно регистрируется значительно большее число факторов, чем при методе моментных наблюдений (60–90). Характер отказа инструмента регистрируется более детально, чем при анализе списанного инструмента.

Данные об условиях обработки, полученные указанными методами, подвергают группированию, т.е. разделяют на части соответственно определенным значениям дискретных факторов ( $D_c$ , группа обрабатываемых материалов и т.д.) или диапазонам непрерывных факторов (припуски или глубина резания и т.д.). В результате получают матрицу в виде таблицы, которая показывает применимость того или иного инструмента.

Кроме того, учитывают, что система инструмента проектируется не для конкретной детали, а для группы деталей данного производства. Поэтому большое значение имеет анализ структуры ТС и их параметров.

При разработке системы инструмента необходимо проанализировать конструкцию мест крепления инструмента на станках: форму резцедержателей станков токарной группы, конструкции концов шпинделей фрезерной и сверлильно-расточной групп, конструкции устройств автоматической смены инструмента (АСИ).

Данные о заготовке, детали и станке формально являются достаточными, чтобы далее вести проектирование системы инструмента и разработку режимов ее эксплуатации. Однако многие факторы на производстве остаются неизвестными или влияние их трудно объяснить и учесть. Наряду со сбором статистических данных об условиях эксплуатации инструмента собирают сведения о применимости конструкций инструмента и фактических режимах резания. Каждый случай обработки, помещаемый в банк данных, называют прецедентом. Совокупность прецедентов для данной области условий отражает прошлый опыт эксплуатации инструмента, который должен быть использован при проектировании.

При этом целесообразно рассматривать не отдельные распределения параметров режима резания, а их семейства, например семейство распределений глубин резания, подач, сил и мощности резания для станков определенного типоразмера. При этом анализируется не только закон распределения, но и зависимость средних и максимальных значений параметров от основного размерного параметра станка. Эта зависимость необходима для оценки нагрузки на проектируемый инструмент различных размеров, входящий в систему.

Однако рассмотрение распределений одного параметра или даже семейства распределений параметров, так же как и анализ распределений нескольких параметров отдельно, не дают желаемой картины явления. Поэтому вместо кривой распределения целесообразно рассматривать поверхность распределения двух параметров, которая обычно имеет вид купола. Сечения этой поверхности плоскостями с шагом  $N$  с постоянной частотой или плотностью распределения наглядно показывают области применения инструмента.

На рис. 3.2 показаны области применения двух марок твердых сплавов, используемых в проходных резцах на токарных станках. В качестве параметров, характеризующих область применения этих сплавов, выбраны сечение среза  $t \times S_0$ , определяющее силовую нагрузку на резец, и скорость резания  $v$ , обуславливающая тепловую нагрузку.

Области применения очерчены семействами кривых, близких к эллиптическим. В центральной части области лежит модальная кривая, показывающая область наиболее частого использования данного сплава; на периферии — кривая, за пределами которой частота применения сплава весьма мала.

Можно выделить три зоны: I — зона применения сплава Т5К10; (см. рис. 3.2); II — зона применения сплава Т15К6 и III — зона совместного применения сплавов. Наличие большой зоны III свидетельствует о том, что в ряде случаев сплав Т5К10 используют там, где следовало бы применять сплав Т15К6. Обратное предположение маловероятно, так как использование сплава Т15К6 там, где нужно применять сплав Т5К10, вызывает резкий рост числа поломок и делает работу не только неэкономичной, но и крайне затруднительной для рабочего в связи с частой заменой инструмента. Резцами из Т15К6 нередко работают даже в области наибольшей эффективности применения сплава Т5К10 (сечение среза до 2,5 мм<sup>2</sup>), что не позволяет использовать важный резерв роста производительности труда.

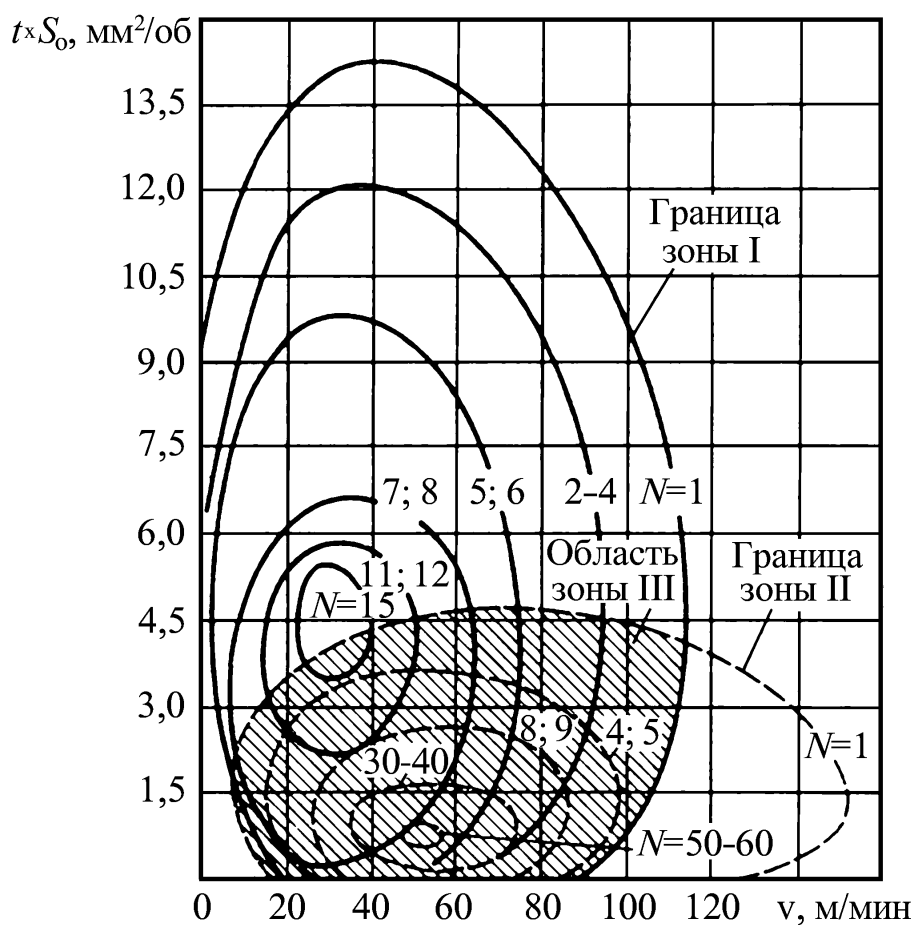


Рис. 3.2. Сечения поверхностей распределения марок твердых сплавов для точения на токарных станках: сплошные линии — для Т5К10; штриховые — для Т15К6 ( $D_c = 200-400$  мм;  $H = 20-40$  мм)

### 3.3.2. Оценка качества системы инструмента

Эффективность системы инструмента характеризуется совокупностью свойств, обуславливающих пригодность к процессу резания с обеспечением заданных форм, размеров и качества поверхностей детали при определенной производительности труда, затратах трудовых, материальных и денежных средств.

Система инструмента относится и к классу продукции, расходующей свой ресурс, и к группе ремонтируемых изделий. Для этой группы изделий рекомендуется оценивать следующие **основные комплексные свойства**: назначение, надежность, технологичность, унификация, эргономические, эстетические и экологические свойства.

Количество свойств, оцениваемых на стадии проектирования с учетом требований полноты и минимальности [59], определяется на основе теории информации, из которой следует, что устанавливать более 13 свойств нецелесообразно.

Свойства, определяющие качество системы инструмента, имеют сложную взаимосвязь [43] и могут быть представлены в виде структуры, которая охватывает наиболее общие свойства (рис. 3.3). Связи между свойствами в этой структуре не поддаются количественному анализу, поэтому структуру свойств целесообразно упорядочить в виде дерева. Такая упорядоченная схема (*дерево свойств*), содержащая самые важные свойства для системы инструмента и предназначенная для ее экспертной оценки на стадии проектирования, представлена на рис. 3.4.

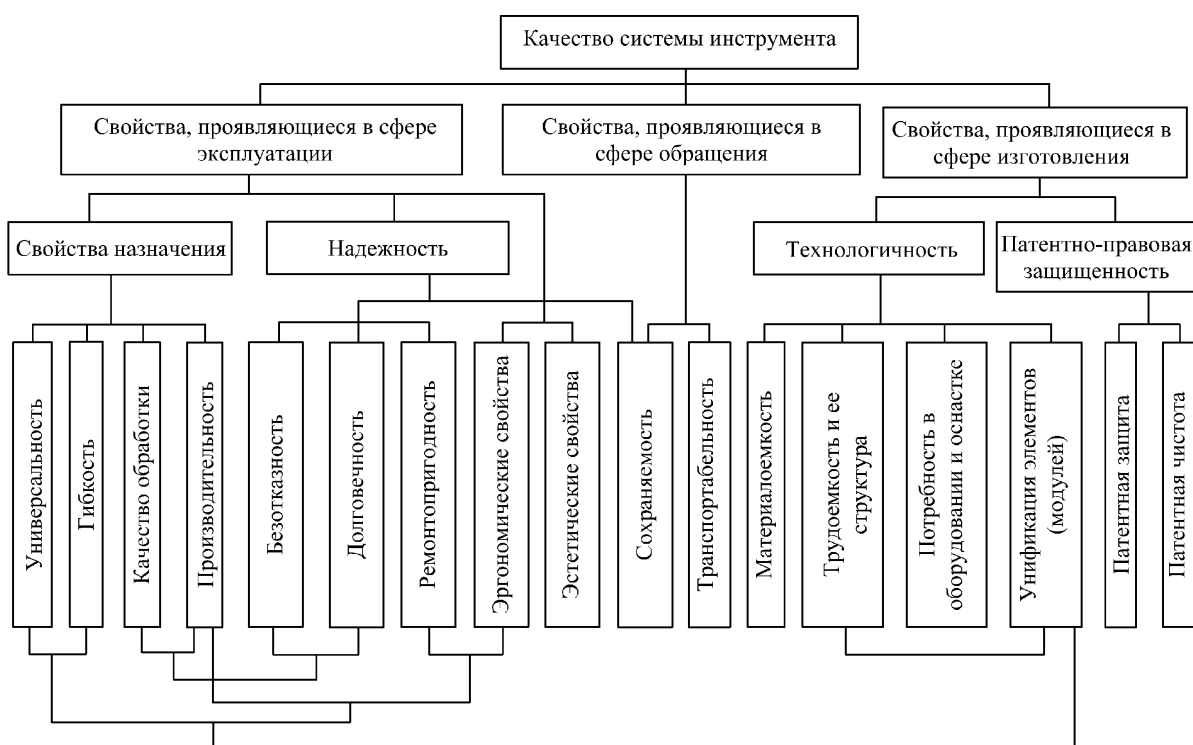


Рис. 3.3. Свойства, определяющие качество системы инструмента

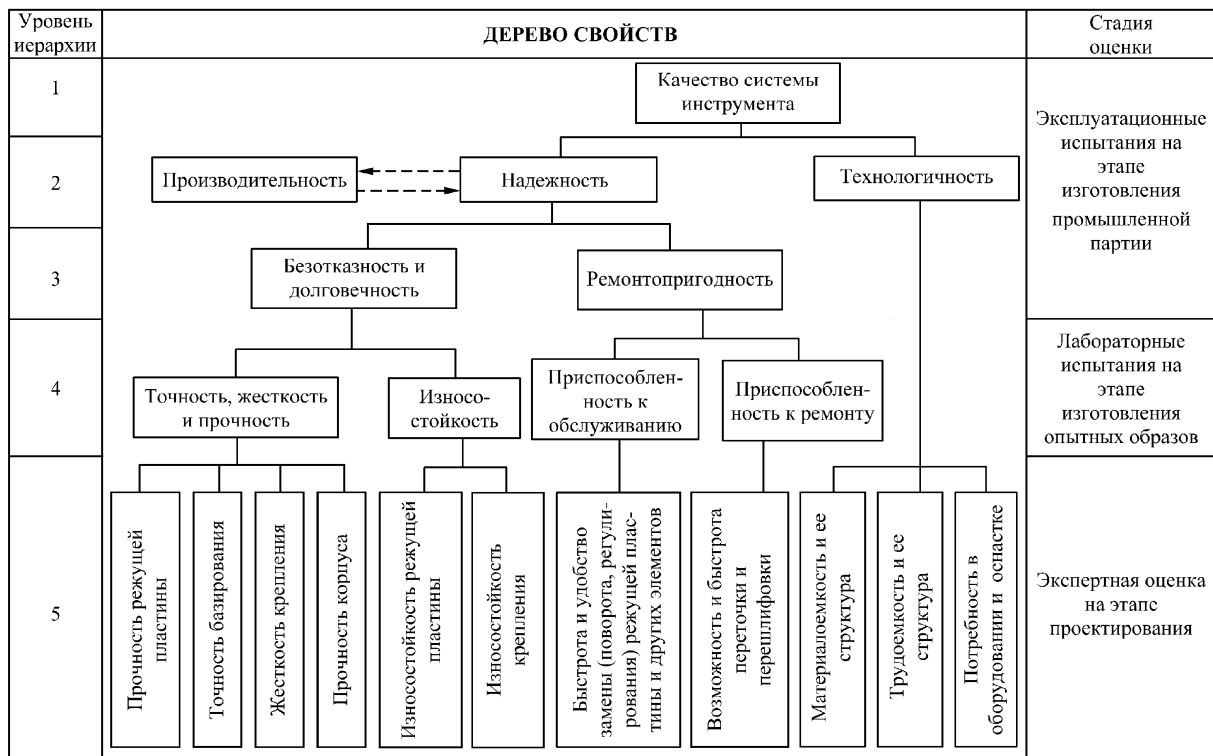


Рис. 3.4. Дерево свойств, составляющих качество системы инструмента

Дерево строится по определенным правилам [2]. Каждое свойство  $i$ -го уровня иерархии влияет наряду со свойствами этого уровня только на одно из свойств  $(i - 1)$ -го уровня и в свою очередь взаимосвязано с определенными свойствами  $(i + 1)$ -го уровня (нумерация уровней ведется от рассмотрения более общих свойств к рассмотрению более узких, частных свойств). Принимается, что свойства одного уровня не связаны между собой. Свойства, которые применительно к данному инструменту и данной задаче анализа нецелесообразно раскладывать на более простые, называют условно простыми.

Свойства *производительности* и *надежности* тесно связаны. Повышение производительности при прочих равных условиях приводит к снижению надежности. Производительность процесса резания (производительность по основному времени), безотказность и долговечность обуславливают одни и те же свойства: точность, жесткость, прочность и износостойкость инструмента. В связи с этим возможны *два способа анализа качества системы инструмента* на стадии проектирования: *по производительности* при постоянной надежности и *по показателям надежности* при одной и той же производительности. В большинстве случаев целесообразно использовать второй способ оценки. В этом случае в трансформированной схеме показатели назначения опускаются (на рис. 3.4 свойство производительности связано со свойством надежности штриховыми линиями).



Свойства *универсальности* и *гибкости* влияют на ремонтпригодность, определяя необходимость и время замены инструмента или его элементов при смене перехода операции; *эргономические* и *эстетические* свойства во многом определяют приспособленность инструмента к смене и наладке. Поэтому в трансформированной схеме для оценки качества инструмента на стадии его проектирования указанные свойства учитываются в ремонтпригодности.

Значительно влияют на технологичность свойства *унификации* инструмента. Поэтому в дереве свойства унификации относятся к трудоемкости изготовления системы инструмента.

Следует отметить, что установленная номенклатура и структура свойств, составляющих качество, в немалой степени зависят от вида системы инструмента, условий ее применения, целей, метода и этапа оценки качества. Так, для расточного инструмента должно главным образом оцениваться качество обработки.

Установление номенклатуры и структуры свойств является первым этапом работы по оценке качества системы инструмента. Однако даже просто перечень свойств с указанием связей между ними сам по себе может служить важным материалом для конструктора при проектировании системы.

Каждое свойство системы инструмента должно характеризоваться соответствующим показателем, причем желательно, чтобы этот показатель был количественным, легко и точно определяемым.

Показателем ремонтпригодности инструмента является среднее время восстановления  $t_{в.ср.}$  У системы инструмента, состоящей из  $N$  элементов, этот показатель зависит от времени восстановления  $t_{вi}$  каждого  $i$ -го элемента конструкции, а также числа его подналадок  $K_i$  за полный период стойкости:

$$t_{в.ср.} = \frac{1}{K_{ср}} \sum_{i=1}^N t_{вi} K_i,$$

где  $K_{ср} = \sqrt{\sum_{i=1}^N K_i^2}$ .

Оценка технического уровня и качества системы инструмента предусматривает сравнение совокупности показателей его качества с соответствующей совокупностью показателей качества *базового образца*. Базовый образец выбирают из существующих систем инструментов, аналогичных оцениваемой по назначению, условиям изготовления и эксплуатации.

Базовыми образцами служат системы инструментов, показатели качества которых в момент оценки отвечают самым высоким требованиям и наиболее эффективны в эксплуатации.

**Базовый показатель качества** — это показатель базового образца. Возможны два подхода: выбирают образец или с наиболее высоким рассматриваемым единичным показателем, или образец с наиболее высоким обобщенным показателем. В практической работе обычно используют второй подход.

Измерения параметров применяют главным образом для оценки качества изготовления инструмента, например, точности изготовления присоединительной поверхности инструмента.

Испытания являются основным методом определения показателей качества. Результаты *лабораторных и стендовых испытаний* используют главным образом для оценки образцов, а также для контроля серийно изготавливаемого инструмента. Результаты *эксплуатационных испытаний* применяют на стадии изготовления промышленных партий нового инструмента, а также для оценки качества в процессе эксплуатации.

Обеспечение качества системы инструмента имеет первостепенное значение для реализации заложенных в ней потенциальных возможностей и воплощается в виде обратных связей, действующих как внутри, так и между этапами обеспечения качества инструмента (проектирование, изготовление, эксплуатация). Информация, полученная путем испытаний на этапе проектирования, используется для выбора оптимального варианта и совершенствования конструкции системы инструмента, технологии изготовления и режимов ее эксплуатации (см. рис. 3.1), данные контроля на этапе изготовления — для повышения технологичности конструкции, технологического обеспечения качества, аттестации инструмента. Результаты диагностирования применяются для организации соответствующих воздействий на конструкцию, технологию и регламенты эксплуатации инструмента.

*Оценка качества инструмента на этапе проектирования* осуществляется в основном в результате испытаний, причем наибольшее распространение получили лабораторные испытания, целью которых является оценка износостойкости, жесткости, виброустойчивости и других эксплуатационных свойств инструмента. Испытания проводят с моделированием нагрузки или в процессе резания.

*Испытания моделированием* обеспечивают дифференцированную оценку влияния различных факторов (величины и направления силы, температуры, амплитуды, частоты и т.д.) на надежность инструмента, допускают высокую степень форсирования, позволяют экономить станочное время и обрабатываемый материал. Наиболее просты *статические испытания* на прочность, для которых созданы специальные испытательные машины. Так, прочность режущей кромки

определяют путем вдавливания алмазной призмы. Критерием прочности служит величина нагрузки, при которой появляются микротрещины в углах отпечатка.

Прочность инструмента при прерывистом резании целесообразно оценивать путем *динамических испытаний*. По режущей кромке наносят удар свободно падающим закаленным стержнем, ось которого располагают перпендикулярно кромке. Мерой прочности служит наименьшая высота падения стержня, при которой кромка получает повреждения. Разработаны установки, которые имитируют условия нагружения при прерывистом резании, а зависимость вероятности выкрашиваний от количества ударов характеризует прочность режущей кромки инструмента.

*Испытания износостойкости по диагностическим признакам* требуют существенных затрат, но дают большее соответствие результатам эксплуатации, что предполагает их широкое распространение. Испытания прочности проводят при непрерывном и прерывистом резании. Оценка прочности режущей части инструмента в этом случае позволяет оптимизировать углы заострения режущей кромки.

Прочность режущего инструмента оценивают определением времени работы (стойкости) до разрушения при увеличенной подаче. Подача должна быть такой, чтобы разрушение инструмента наступило раньше, чем износ достигнет принятой величины. Для оценки относительной прочности режущей части инструмента в процессе резания определяют разрушающую (ломающую, предельную) подачу, достижение которой вызывает разрушение режущей части инструмента при постоянных значениях глубины и скорости резания. Доступность метода и наличие необходимого оборудования дают возможности проводить такие испытания на любом предприятии [63].

Прочность инструмента оценивают в процессе резания с непрерывно возрастающей толщиной среза (постоянная подача и переменная глубина резания за счет врезания) с соблюдением постоянства геометрических параметров. При этом толщина среза определяется глубиной резания, непрерывно возрастающей в процессе испытаний.

При испытаниях с подачами, близкими к нормативным, осуществляют форсирование испытаний путем наложения колебаний на инструмент с помощью специального устройства. Стойкость до разрушения при испытаниях с наложением колебаний определяют, обеспечивая постоянство амплитудно-частотной характеристики во время испытаний, например, за счет увеличения вылета резцов. Испытания на прочность проводят также путем точения шестигранных заготовок или заготовок с большим количеством радиальных отверстий.

В связи с большим количеством методов испытаний инструмента их классифицируют и отбирают наиболее эффективные для включения в систему испытаний.

Оценка качества групп методов испытаний сборных твердосплавных резцов с высотой сечения державки 10–50 мм на основе имеющейся информации, а также экспериментальная проверка отобранных в результате экспертизы способов создания и изменения нагрузки (рис. 3.5) показали, что наиболее целесообразными являются форсированные испытания на прочность методом ступенчато-возрастающей подачи.

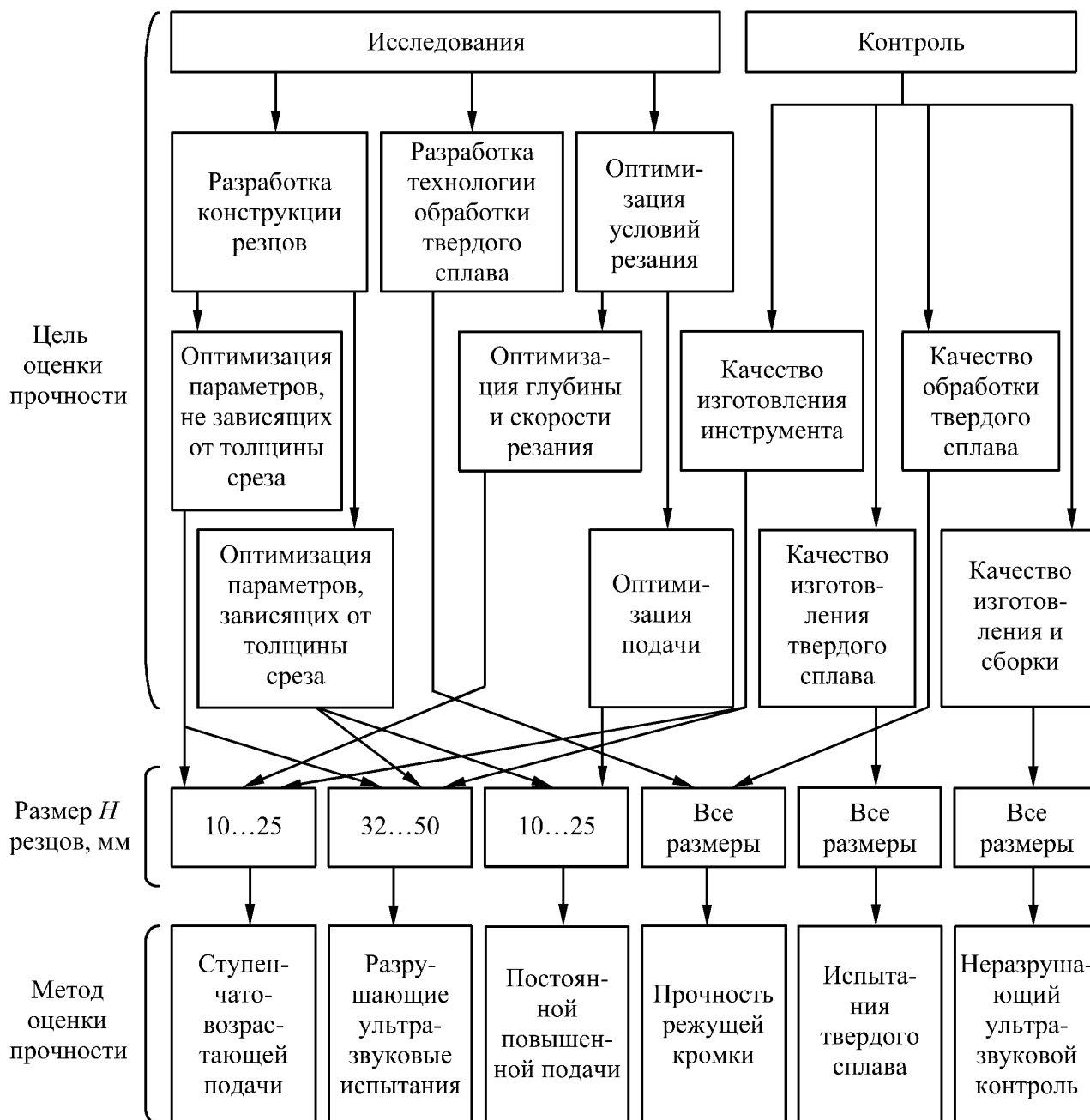


Рис. 3.5. Методы оценки прочности сборных резцов с твердосплавными СПП

Важным рычагом повышения качества изготовления инструмента является совершенствование методов и системы его контроля. Для *неразрушающего контроля инструмента* предложены измерения геометрических параметров режущей части, твердости, коэрцитивной силы, цветная дефектоскопия и другие методы [47]. Входной неразрушающий контроль твердосплавных пластин измерением парамагнитной восприимчивости позволил резко уменьшить число отказов в начале работы [70]. Разбраковку пластин осуществляют также по величине термоЭДС, связанной с содержанием углерода, нестабильность которого определяет разброс режущих свойств пластин.

*Система контроля качества* систем инструмента при его изготовлении направлена на решение трех задач: повышение технологичности конструкции; технологическое обеспечение качества и аттестация отдельных партий. Исследования в соответствии с общей теорией надежности показывают, что эксплуатация изделий «по состоянию», по их фактическим ресурсам (качествам), обеспечивает значительную экономию.

Применительно к системам инструмента этот резерв используется недостаточно. Для его реализации необходимо решить две задачи: по результатам контроля установить представительный показатель качества конкретной партии и в зависимости от величины этого показателя рассчитать поправочные коэффициенты на условия эксплуатации, позволяющие с максимальной эффективностью использовать данную систему с присущим ей уровнем качества.

*Организация рациональной эксплуатации* систем инструмента включает три этапа: прогнозирование надежности до начала эксплуатации; оптимизация расходования ресурса инструмента непосредственно во время эксплуатации; использование результатов эксплуатации для обеспечения обратной связи с этапом анализа условий эксплуатации (см. рис. 3.1).

Первый этап обеспечения рациональной эксплуатации системы инструмента определяет его надежность, являющуюся базой для назначения режимов резания, производительности автоматизированного производства и других показателей. На этом этапе важно учесть статистические аспекты надежности инструмента [35, 44].

### ***3.3.3. Особенности инструмента для автоматизированного производства***

Специфическими чертами эксплуатации системы инструмента в автоматизированном производстве (АП) являются сложная структура отказов, существенная нестационарность нагружения, высокие требования к надежности [34, 55].

В этой связи прогнозирование надежности инструмента в АП включает в себя: определение структуры отказов, учет нестационарности нагружения, расчет показателей надежности.

*Отказы инструмента* условно подразделяют на: устранимые (переточкой или переустановкой режущего элемента) и неустраимые (ремонт технически невозможен или экономически нецелесообразен), полные (требующие немедленного прекращения резания) и неполные (возможно кратковременное резание).

К *полным неустраимым отказам* инструмента относится разрушение элементов крепления, например: поломка деталей сборного инструмента, поломка режущей пластины (по сечению), скол режущей пластины (по режущему клину). Эти отказы внезапные, т.е. их появление не связано с предшествующим ухудшением эффективности работы инструмента.

К *полным устранимым отказам* относятся: выкрашивания режущих кромок, пластическая деформация контактной зоны, износ поверхностей контакта. Эти отказы обычно носят характер постепенных, т.е. их появлению предшествует изменение таких параметров, как сила и температура резания, размер и шероховатость обработанной поверхности, амплитудно-частотный спектр вибраций и т.д. К *неполным отказам* относятся: выкрашивания поверхностей и трещины режущей пластины, износ, смятие и трещины деталей крепления. Они не исключают возможности резания, а играют роль диагностических признаков, при появлении которых вероятность полного отказа резко возрастает. Структура отказов включает относительные доли (вероятности) каждого типа отказа [63].

Усложнение структуры отказов инструмента в АП обусловлено повышением уровня его сборности, универсальности и расходования ресурса. Конструкция системы инструмента для АП, как правило, сложная, с большим числом деталей, точных и сложнопрофильных соединений [35]. В связи с этим инструмент приобретает дополнительные «слабые» места, которые в процессе эксплуатации получают повреждения, приводящие к отказам. Повышение универсальности инструмента предусматривает его работу на разных глубинах резания и подачах, а также возможность «смены ролей» главной и вспомогательной режущих кромок, что усложняет структуру отказов за счет появления повреждения и затем отказов различной локализации.

Требования экономичности АП и полноты использования всех его ресурсов часто являются факторами, определяющими целесообразность расширения его сферы. Применительно к инструменту это означает полное использование нагрузочной способности инструментального материала не по одному, а по си-

стеме критериев, например: износостойкость, вязкая прочность, хрупкая контактная прочность, хрупкая объемная прочность. Как показывает практика, подавление какого-либо физического процесса, приводящего к отказу, возможно лишь за счет такого снижения производительности резания, которое делает АП неэкономичным. При наличии доминирующего вида отказа — нормального износа, некоторая небольшая доля и других отказов, вызванных конкурирующими физическими процессами (ползучесть, усталость, малоцикловое термоциклическое разрушение), является признаком достаточно полного расходования ресурса инструмента.

Таким образом, усложнение структуры отказов инструмента в АП вызвано увеличением количества его элементов, испытывающих отказы, появлением отказов различной локализации в пределах режущей части, возникновением отказов различной физической природы. В этой связи необходимо определить и учесть в дальнейших расчетах структуру отказов инструмента. Имеется ряд подходов к решению этой задачи. Для учета сложной структуры отказов при расчете надежности инструмента можно использовать не обычно принятые двухпараметрические законы распределения стойкости, а суперпозиции двух или больше распределений [21].

Для *определения показателей надежности* используют статистические методы, например, моделирование процесса выхода из строя инструмента методом Монте-Карло [73]. Обработка функции распределения стойкости на ЭВМ заключается в вычислении случайной последовательности возможных реализаций стойкости; метод имеет широкие возможности и может применяться для оптимизации режимов испытаний, расчета потребности в инструменте и других задач.

Для *определения собственно структуры отказов* используется статистический метод распознавания Байеса [58, 61], позволяющий учитывать как априорную информацию (результаты эксплуатации аналогичного инструмента), так и диагностическую (измерение определенных величин признаков отказа).

При помощи датчиков силы резания [37] можно поддерживать последнюю постоянной, меняя подачу при колебаниях припуска, твердости заготовки и других факторов. Возможно адаптивное управление по комплексу силовых и температурных факторов [66].

Изменение режимов эксплуатации в зависимости от срока службы инструмента производится на основе нелинейной модели накопления повреждений. Если справедлива линейная модель, то целесообразно на протяжении периода стойкости поддерживать нагрузку постоянной, при этом наработка максимальна. Если линейная модель, как это чаще всего имеет место, неспра-

ведлива, поддержание постоянного уровня нагрузки нецелесообразно. В этом случае эффективность может быть повышена путем изменения нагрузки в соответствии с накоплением дефектов инструмента. Направление и оптимальная степень такого изменения определяются коэффициентами нелинейной модели, найденными путем лабораторных испытаний на износостойкость и прочность.

Для твердосплавных резцов оптимизацией режимов резания является их повышение по мере нарастания случаев повреждений инструмента [64]. Аналогичное решение предложено для снижения рассеивания стойкости [18]. Следует отметить, что в адаптивных системах управления со стабилизацией силы резания при износе резца режимы снижаются, что приводит к неоптимальному расходованию ресурса инструмента. При чистовой обработке ресурс инструмента может быть существенно повышен путем применения подналадки [5].

Элементом системы эксплуатации инструмента является критерий его замены. Инструмент может быть заменен в связи с внезапным отказом, постепенным отказом или исчерпанием назначенной наработки. Примером диагностического признака может служить сила резания: если ее значение выходит за установленные пределы, диагностируется внезапный отказ (аварийная замена), если становится равным определенному значению — постепенный отказ (замена по программе). Диагностирование осуществляют: в процессе резания путем измерения силы, момента на шпинделе, тока или мощности двигателя главного привода, путем пробного резания, регистрации силы в момент начала резания [18], с использованием акселерометров, методом акустической эмиссии в звуковом [51] и ультразвуковом [51] диапазонах, путем определения температуры резания с помощью термопар [4], соотношения составляющих силы резания [74], спектральным анализом силы резания, радиоактивным контролем, измерением температуры стружки, контактного сопротивления между инструментом и деталью и другими методами. Вне процесса резания состояние инструмента определяют с помощью механических, пневматических [66], оптических [18], индуктивных [66], емкостных [60] и других датчиков (рис. 3.6).

Информация о результатах эксплуатации инструмента содержит статистические характеристики, получаемые путем автоматического накопления и обработки информации об отказах инструмента в системе управления АП, и физические характеристики, получаемые путем анализа отказавших экземпляров инструмента (рис. 3.7). Система сбора, анализа и документирования результатов процесса резания непосредственно на рабочем месте может быть реализована с помощью ЭВМ и упрощенных интеллектуальных терминалов. Такая система позволяет корректировать режимы резания. Информация об отказах



инструмента представляет собой матрицу, содержащую номер инструмента, код критерия замены (достижение назначенной наработки, постепенный преждевременный отказ, внезапный преждевременный отказ), отработанную долю назначенной наработки, признаки отказа.

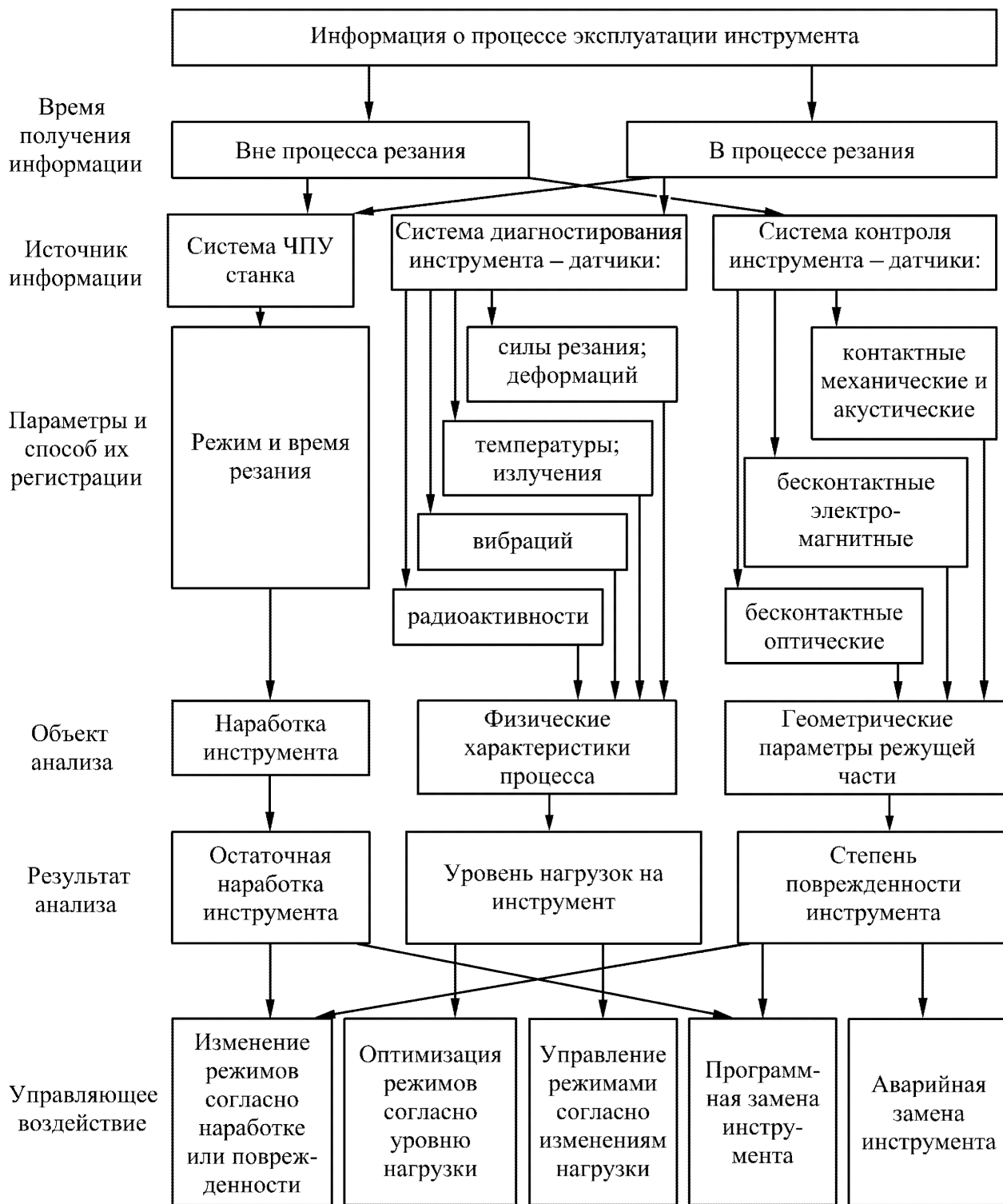


Рис. 3.6. Схема адаптивного управления процессом эксплуатации инструмента

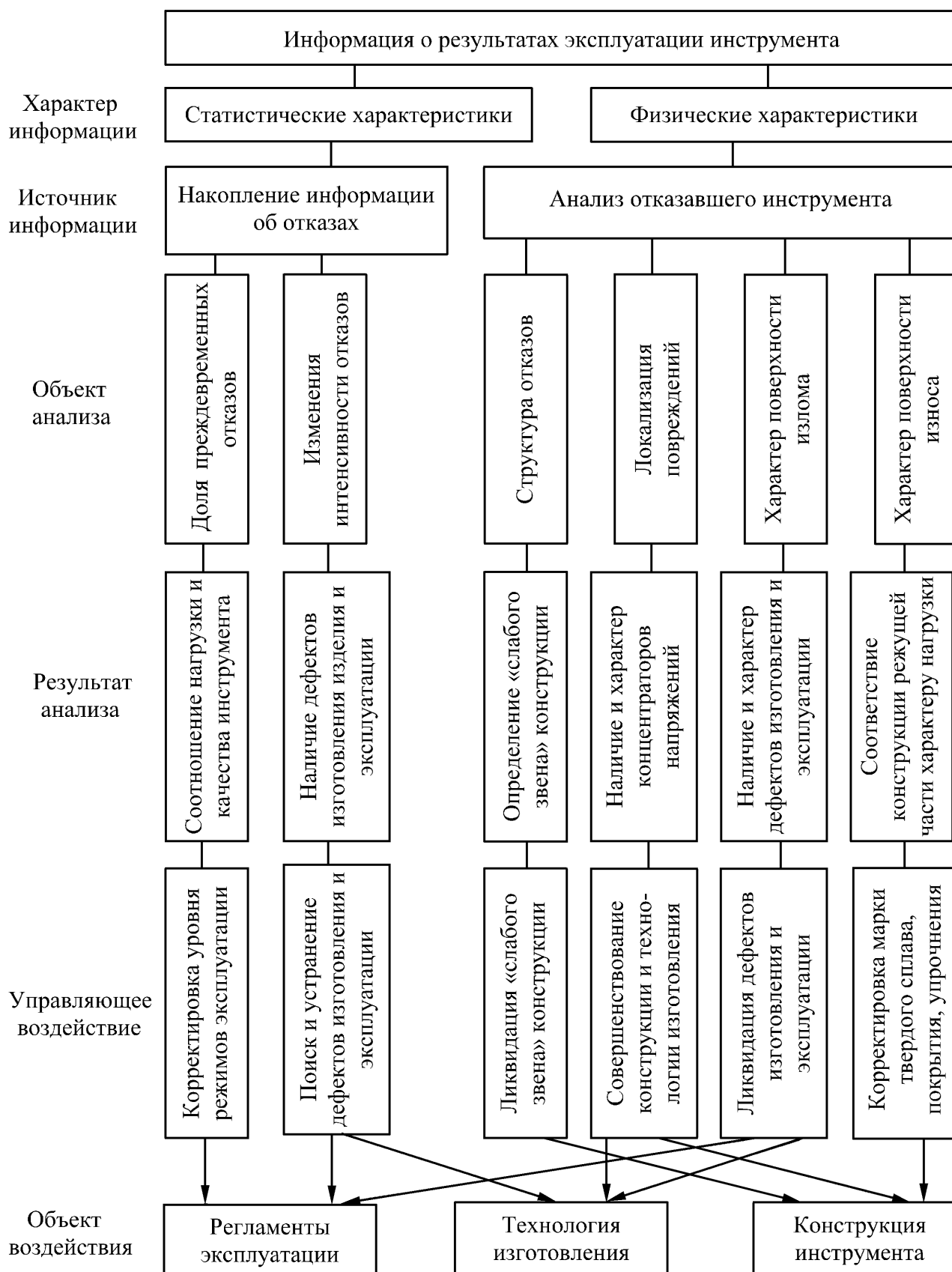


Рис. 3.7. Использование информации о результатах эксплуатации инструмента

## ГЛАВА 4. СОВРЕМЕННЫЕ РЕЖУЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

Во многих областях машиностроения, в частности в аэрокосмической и автомобильной промышленности, все чаще применяют конструкционные материалы с особыми свойствами. Такими свойствами являются малый износ в вызывающей коррозию среде, высокая теплостойкость, повышенная механическая прочность и малая удельная плотность. Разработаны такие материалы, как коррозионностойкие и высоколегированные стали, чугуны с шарообразным графитом, комбинированные слоистые материалы из легких металлов, а также сплавы на базе Ni и Ti.

Изготовление деталей из этих материалов требует соответствующей технологической подготовки. Время обработки сокращается за счет комплексной и многосторонней обработки за один установ. Высокоскоростная обработка повышает производительность из-за более высокой мощности резания. Сверх того, уменьшение силы резания приводит к улучшению качества обработанной поверхности. Из-за необходимости защиты окружающей среды сокращается использование смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС), которые в обработке резанием выполняли задачи отвода тепла и стружки.

В связи с этим появилась «сухая» обработка и смазка минимальным количеством специальных средств, которые уже осуществляются в 20 % случаев обработки резанием. Внедрение новых технологий напрямую связано с дальнейшим развитием модификаций режущих твердых сплавов и режущей керамики, а также совершенствованием методов нанесения износостойких покрытий.

На рынке обрабатываемого инструмента происходит постепенный отказ от поставок отдельных инструментов с переходом на предложение полной концепции обработки. Эта тенденция проявляется как в работе крупных инструментальных фирм, имеющих единую партнерскую сеть, так и в работе небольших предприятий, которые ранее осуществляли продажи и сервис только для собственных изделий. Предоставление обширных пакетов услуг сегодня является условием успешного сбыта инструмента. Потребитель выигрывает от получения подобных пакетов услуг, так как получает исчерпывающую информацию не только по концепции и применению комплекта обрабатываемого инструмента, но и по планированию, оптимизации технологического процесса и по другим услугам, связанным с применением закупленного инструмента.

Поэтому при поиске эффективной системы инструментального обеспечения необходимо в равной степени использовать как усовершенствованные конструкции инструмента, инновационные инструментальные материалы и покры-

тия, так и оригинальные концепции экономически эффективной обработки разнообразных конструкционных материалов.

В процессе обработки металлов резанием рабочие поверхности инструментов подвергаются интенсивному воздействию высоких контактных давлений и температур, а взаимодействие с обрабатываемым материалом и реагентами из окружающей среды приводит к протеканию интенсивных физико-химических процессов — адгезии, диффузии, окисления. Чтобы инструменты могли сопротивляться этим процессам и действующим на них нагрузкам, инструментальные материалы должны соответствовать целому комплексу требований.

**Твердость.** Для того чтобы инструмент без контактной пластической деформации мог срезать необходимые объемы обрабатываемых материалов, твердость инструментальных материалов  $HV_{им}$  должна значительно (более чем в 2,5 раза) превосходить твердость обрабатываемых материалов  $HV_{ом}$ . Поэтому одним из главных требований, предъявляемых к инструментальным материалам, является их высокая твердость. Однако чрезмерное увеличение твердости, как правило, приводит к увеличению хрупкости. Поэтому в зависимости от условий обработки существует оптимальное соотношение между твердостью инструментального и обрабатываемого материалов, обеспечивающее приемлемое соотношение твердости и других механических характеристик инструментальных материалов.

**Прочность и ударная вязкость.** Способность инструментов сопротивляться разнообразным напряжениям (изгибу, кручению, растяжению), а также динамическим нагрузкам без хрупкого разрушения и пластического деформирования определяется их прочностью и ударной вязкостью. Поэтому инструментальные материалы должны обладать достаточными значениями механической прочности при изгибе, растяжении и кручении, а также ударной вязкости.

**Теплостойкость.** Это свойство определяет способность режущих инструментов сохранять свою твердость при повышенных температурах, возникающих в процессе резания. Именно от теплостойкости инструментальных материалов в первую очередь зависит максимально допустимая скорость резания, с которой могут работать инструменты. С учетом необходимости использования инструментальных материалов в условиях периодического изменения температуры (например, прерывистое резание) инструментальные материалы должны быть малочувствительны к циклическим изменениям температуры.

**Износостойкость.** Чтобы режущие инструменты могли сопротивляться удалению частиц с их рабочих поверхностей при взаимодействии с обрабатываемыми материалами, инструментальные материалы должны обладать высокой

износостойкостью. Этот показатель является комплексным свойством и зависит от всех вышеперечисленных свойств — твердости, прочности и теплоустойкости.

**Теплопроводность.** Способность отводить тепло с контактных поверхностей инструмента с целью снижения вероятности перегрева его режущих кромок является важным условием для нормальной работы режущих инструментов. Поэтому инструментальные материалы должны обладать достаточной теплопроводностью.

**Сродство с обрабатываемым материалом.** Необходимым условием достижения высоких режущих свойств инструментов является низкая физико-химическая активность инструментальных материалов по отношению к обрабатываемым материалам. Поэтому кристаллохимические свойства инструментальных материалов должны существенно отличаться от соответствующих свойств обрабатываемых материалов. Степень сродства сильно влияет на адгезионно-усталостные, окислительные процессы, изнашивание рабочих поверхностей инструментов и качество обработанных поверхностей.

**Технологичность.** Под технологичностью понимается комплекс свойств (например, шлифуемость), характеризующих поведение инструментальных материалов при изготовлении режущих инструментов. Технологичность определяет возможность использования марки инструментального материала в конструкции конкретного режущего инструмента. Например, материалы, обладающие плохой шлифуемостью, неудобны при изготовлении и переточке сложнопрофильных инструментов, а слишком узкий интервал закалочных температур материала при термообработке может привести к браку и т.д.

**Экономичность.** Наряду с рассмотренными физико-механическими, кристаллохимическими и технологическими свойствами немаловажной характеристикой инструментальных материалов является их экономичность, которая в основном зависит от химического состава инструментальных материалов. Введение большого количества дорогостоящих легирующих элементов (вольфрама, кобальта, тантала, ниобия и т.п.) существенно увеличивает стоимость инструментальных материалов.

Для удовлетворения перечисленных требований применяют четыре группы инструментальных материалов, каждая из которых подразделяется на несколько подгрупп (рис. 4.1). Ни один из этих инструментальных материалов не является универсальным и занимает свою нишу в соответствии с показателями вязкости, изгибной прочности, износо- и термостойкости (рис. 4.2).



Рис. 4.1. Состав групп инструментальных материалов



Рис. 4.2. Показатели режущих материалов

## 4.1. Быстрорежущие стали

В России быстрорежущие стали по ГОСТ 19265-73 обозначаются буквами, соответствующими карбидообразующим и легирующим элементам (Р — вольфрам, М — молибден, Ф — ванадий, К — кобальт). За буквой следует цифра, обозначающая среднее содержание элемента в массовых процентах (содержание хрома до 4 % в обозначениях марок не указывается). Стали, изготовленные методом порошковой металлургии (так называемые порошковые стали), имеют в обозначении две буквы МП. Например, порошковая сталь марки Р12М3К5Ф2-МП содержит 12 % W, 3 % Mo, 2 % V и 5 % Co.

Применяемые быстрорежущие стали делятся на группы нормальной и повышенной производительности [11].

В современных технологиях обработки металлов резанием используют следующее соотношение инструментальных материалов:

45 % — быстрорежущие стали;

40 % — твердые сплавы;

15 % — сверхтвердые материалы.

Промышленное производство быстрорежущих сталей осуществляется методами открытой дуговой выплавки и порошковой металлургии.

Производится широкая гамма порошковых быстрорежущих сталей (ПБС), отвечающих требованиям ГОСТ 28393-89: Р6М5Ф3-МП, Р7М2Ф6-МП, Р12МФ5-МП, Р6М5К5-МП, Р9М4К8-МП и Р12М3К5Ф2-МП.

Исследования режущих свойств, проведенные институтами ВНИИинструмент, НИИЖД и ЦНИИТМАШ показали, что использование режущего инструмента из ПБС позволяет повысить его стойкость в 1,5–2 раза по сравнению с аналогичным инструментом из традиционных быстрорежущих сталей.

Связано это с тем, что технология производства быстрорежущих сталей традиционным способом предусматривает получение слитков методом открытой дуговой выплавки с последующей их деформацией методамиковки, прокатки и калибровки.

В результате быстрорежущие стали характеризуются достаточно крупным зерном аустенита (9 или 10 баллов) и карбидной неоднородностью, иногда с признаками грубой карбидной ликвации. Это приводит к снижению пластичности сталей, усложняет технологию их производства, делает деформационный передел многостадийным, с высокими потерями металла. Особенно усложняется производство сложнелегированных сталей Р9М4К8 и Р12М3Ф2К8.

За рубежом большую долю сортамента инструментальных сталей, в том числе быстрорежущих, получают методом электрошлакового переплава (ЭШП).

Технологическая схема получения слитков методом ЭШП включает выплавку металла в электродуговой печи, получение электродов и их электрошлаковый переплав. Благодаря условиям кристаллизации металла в водоохлаждаемом кристаллизаторе и специальному рафинированию степень развития карбидной неоднородности и загрязненности неметаллическими включениями примерно в 2 раза ниже по сравнению с металлом, полученным открытой дуговой выплавкой.

Эффективным способом улучшения технологических и эксплуатационных свойств быстрорежущих сталей, особенно сложнолегированных, является метод порошковой металлургии (МПМ).

#### ***Основные пределы МПМ:***

а) выплавка и распыление жидкого металла с получением порошка заданного химического и фракционного состава;

б) компактирование порошка в капсулах методом горячего газостатического прессования;

в) деформация компактов методамиковки, прокатки или калибровки.

Благодаря такой технологии достигается высококачественная структура с однородным распределением мелкодисперсных карбидных фаз, что обеспечивает более высокие технологические и механические свойства ПБС, и в результате — повышенную в 1,5–2,0 раза стойкость инструмента по сравнению с инструментом из сталей, произведенных по традиционной технологии.

Особенность МПМ позволяет за счет высокой скорости кристаллизации порошков, распыленных из жидкого состояния, повышать легированность твердого раствора быстрорежущих сталей, увеличивая в них количество карбидов путем введения в расплав жидкого металла карбидообразующих элементов. Это дает возможность получения инструментальных материалов с повышенным содержанием ванадия: в штамповых сталях — до 16 %, а в быстрорежущих — до 8 %. Ванадий образует высокотвердые износостойкие карбиды, что повышает работоспособность инструмента. Такое направление легирования быстрорежущих сталей и повышения износостойкости инструмента является в современной металлургии одним из основных. Следует отметить, что в традиционных быстрорежущих сталях содержание ванадия не превышает 4 %, так как дальнейшее увеличение количества этого элемента приводит к появлению значительной карбидной неоднородности и, как следствие — к падению технологической пластичности стали. Во время изготовления инструмента из стали с крупными карбидами ванадия (VC) резко ухудшается его шлифуемость абразивными кругами из электрокорундов.



Порошковые быстрорежущие стали с повышенным содержанием ванадия лишены этого недостатка за счет равномерного мелкодисперсного распределения такого типа карбидов. После закалки структура порошковых сталей характеризуется мелким зерном аустенита (11 или 12 баллов), отсутствием разноструктурности и крупных карбидных фаз. После окончательной термической обработки (закалка + отпуск) порошковые стали приобретают структуру мелкокристаллического мартенсита с равномерно распределенными карбидами размером 2–3 мкм.

Большая объемная доля мелкодисперсных карбидов и высокая насыщенность твердого раствора легирующими элементами (W, Mo, V и др.) обеспечивают высокий уровень теплостойкости инструмента, что увеличивает способность сопротивляться температурному воздействию на режущие кромки в процессе резания [19].

Порошковые быстрорежущие стали рекомендуются для изготовления методом профильного шлифования сложного многолезвийного инструмента: протяжек, шеверов, метчиков, червячных и фасонных фрез, долбяков и т.п.

Наибольший эффект от применения высоколегированных быстрорежущих сталей, полученных МПМ, достигается при резании труднообрабатываемых материалов. Примерами могут служить резцы для отрезки слитков и режущие пластины для порезки заготовок колесных пар. Эти инструменты изготавливаются из сталей высокой износостойкости и красностойкости марок P12MФ5K6-МП и P12M3K5Ф2-МП. За длительный период эксплуатации этих инструментов достигнуто увеличение гарантированной стойкости на 50–100 % по сравнению с тем же инструментом из стали P18.

Наиболее перспективными для внедрения на машиностроительных предприятиях являются следующие **марки стали**:

– сталь повышенной износостойкости с рациональной схемой легирования P6M5Ф4-МП взамен универсальных сталей широкого назначения типа P6M5Ф3-МП и P7M2Ф6-МП;

– стали высокой износостойкости и красностойкости, легированные ванадием (3–6 %) и кобальтом (5–10 %): P12MФ5K6-МП, P10M2Ф5K8-МП и P6M7Ф6K10-МП взамен высоколегированных сталей типа P6M5K5-МП, P9M4K8-МП и др.;

– стали высокой вторичной твердости с улучшенной шлифуемостью, так называемые сверхбыстрорежущие стали P2M10ФK8-МП, P6M5Ф3K8-МП взамен высоколегированных сталей типа P12M3K5Ф2-МП и P9M4K8-МП.

Технологические свойства и области применения ПБС приведены в табл. 4.1.

### Характеристики порошковых быстрорежущих сталей

Марка	Характерные физико-механические свойства	Шлифуемость	Область применения
P6M5Φ4-МП	Высокая прочность на изгиб. В 1,5–2,5 раза более высокая стойкость по сравнению с аналогичными марками, произведенными традиционным способом	Удовлетворительная, но лучше, чем у стали P6M5	Фрезы и сверла для черновой и получистовой обработки жаростойких высокопрочных сплавов типа ХН77ТЮР
P9M4K8-МП P12MΦ5K6-МП		Хорошая	Фрезы, сверла, зенкеры и др. для обработки жаростойких сплавов пониженной обрабатываемости
P12M3K5Φ2-МП P2M10ΦK8-МП		Хорошая	Для протягивания жаропрочных сталей
P6M5K5-МП		Удовлетворительная	Для обработки низко- и среднелегированных сталей (фасонное точение, сверление, развертывание, зенкерование, фрезерование)

### 4.2. Твердые сплавы

Основным инструментальным материалом являются твердые сплавы на основе высокотвердых и тугоплавких карбидов вольфрама, титана, тантала и ниобия, соединенных металлической связкой из кобальта. Общее количество твердосплавных инструментов, применяемых в механообрабатывающем производстве, достигает 40 %, с их помощью снимают до 85 % стружки.

Под названием «твердый сплав» поставляют режущие материалы, которые изготавливаются методами порошковой металлургии из твердых материалов (в первую очередь, карбидов) и так называемых связующих металлов. Порошки карбидов смешивают с порошком кобальта, прессуют в изделия необходимой формы и спекают при 1 400–1 550 °С в защитной атмосфере или в вакууме. При спекании кобальт плавится и растворяет часть карбидов, что позволяет получать плотный материал, на 80–97 % состоящий из карбидных частиц. По мере нарастания количества связки (с 3 до 20 %) снижается твердость сплава, но повышается его прочность.

Главную роль с точки зрения твердости играет карбид вольфрама (WC). В технике обработки резанием довольно большое значение имеют также карбид

титана (TiC), карбид тантала (TaC) и карбид ниобия (NbC), которые используют для улучшения теплостойкости и замедления диффузии.

В качестве связующего в основном применяется кобальт и дополнительно разработаны новые связки с целью улучшения определенных свойств, как например, для повышения твердости, прочности при сжатии и изгибе, модуля упругости и др.

Наиболее важной новейшей разработкой для повышения твердости у твердых сплавов WC–Co является особо- и ультрамелкозернистые твердые сплавы с зернами WC размером от 0,5 мкм и содержанием Co 6–16 % по массе. Производство высококачественных ультрамелкозернистых сплавов стало возможным благодаря тому, что одновременно с ними производителями материалов разработаны порошковые материалы соответствующего размера, формы зерен и распределения зерен по крупности. При этом выдерживаются высокие требования к чистоте компонентов.

Все частички карбидов в особомелкозернистых твердых сплавах в отличие от стандартного сырья имеют практически круглую форму, что благоприятно сказывается на равномерной структуре спекаемого материала и возможностях формования.

Порошкообразный материал WC производится преимущественно традиционным путем редукции паравольфрама аммония, оксида аммония или кислоты аммония, последующего смешивания вольфрамовой стали с углеродом и карбюризации смеси под водородом при 1 400–2 000 °С. Самые мелкозернистые виды порошков, изготовленных таким образом, имеют размер зерен около 0,2 мкм. Возможность дальнейшего уменьшения размера зерен заключается в прямой карбюризации WO<sub>3</sub> и Co.

Еще один метод изготовления чрезвычайно мелкозернистого порошка состоит в преобразовании солей металлов. При этом методе предыдущая фаза Co–W в воде смешивается с вольфрамовой кислотой и сушится распылительным методом. Эта смесь преобразуется в реакторе методом псевдосжижения при температуре ниже 1 000 °С путем соединения с частицами WC–Co размером несколько нанометров. На основе этих порошков WC с диаметром зерен 0,2 мкм удастся изготовить твердые сплавы с размером зерен WC 0,2–0,3 мкм.

Наряду с использованием мельчайших порошков при производстве особо- и ультрамелкозернистых твердых сплавов большое значение имеет введение добавок для торможения роста зерен, как, например, VC, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, (Ta, Nb)C. Торможение роста зерен добавкой VC — самое действенное и приводит к высокой твердости и абразивной устойчивости. Воздействие добавок Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> на

твердость невелико, но с их помощью можно достигать особенно равномерной структуры с хорошей прочностью на излом. Добавки (Ta, Nb)C способствуют образованию сплавов с хорошей вязкостью; отрицательным фактором является уменьшение прочности на изгиб при увеличении концентрации.

Поскольку процесс роста зерен при агломерации начинается еще до начала образования жидкой фазы, уже на подготовительной стадии принимают меры по равномерному распределению элементов торможения роста зерен. На продвинутой стадии процесса агломерации гомогенное распределение Co помогает равномерному распределению добавок карбидов. Их концентрация насыщения в связующей фазе может быть достигнута точным контролем общего содержания углерода. Препятствие росту зерен возникает в связи с тем, что карбиды добавки во время процесса агломерации блокируют активные центры роста кристаллических зерен WC и тем самым нарушают процессы растворения и осаждения WC. Эффективность карбида тем больше, чем выше его концентрация и подвижность в связующей фазе.

При использовании твердых сплавов необходимо многообразие их свойств, например, если в одном месте поверхность инструмента подвержена износу, то в другом месте она подвержена изгибу. Это привело к разработке так называемых градиентных твердых сплавов с переменной структурой на основе WC-Co с добавками TiC и/или TaC, у которых микроструктура различна в разных местах.

Это позволяет производить твердые сплавы с контролируемыми структурными и термическими свойствами. Возникающие при охлаждении расплава напряжения ввиду разности коэффициентов теплового расширения компонентов хорошо затухают из-за последовательных переходов в микроструктуре. Изготовление градиентных структур осуществляется с управлением диффузии в контролируемой газовой атмосфере в процессе спекания, причем образование градуированных пограничных зон сильно зависит от количества добавок TiC/TaC. Градиентные твердые сплавы применяют в качестве субстрата покрытия для улучшения вязкости.

Твердые сплавы производят в виде пластин (сменных с механическим креплением и напайных), которыми оснащаются режущие инструменты (резцы, сверла, фрезы и др.). В больших количествах изготавливается осевой инструмент (концевые фрезы, сверла и т.п.) методом вышлифовки из цельных твердосплавных заготовок. Инструменты, выполненные из твердых сплавов, обладают высокой твердостью 80–92 HRA (74–77 HRC), износостойкостью и высокой теплоустойчивостью (до 800–1 000 °C) и по своим эксплуатационным свойствам

значительно превосходят инструменты из быстрорежущих инструментальных сталей (БРС).

Российский стандарт ГОСТ 3882–74 (в ред. 1991 г.) регламентирует *три группы твердых сплавов*: вольфрамовые (однокарбидные), титановольфрамовые (двухкарбидные) и титанотанталовольфрамовые (трехкарбидные). Их марки, состав и физико-механические свойства приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

**Марки, химический состав и свойства  
спеченных твердых сплавов**

Группа сплавов	Марка (ГОСТ 3882–74)	Химический состав, %				Предел прочности $\sigma_{изг}$ , Н/мм <sup>2</sup>	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Твердость, HRA
		WC	TiC	TaC	Co			
Вольфрамоко- бальтовые	ВК6	94	–	–	6	1519	14,6–15,0	88,5
	ВК6ОМ	92	–	2	6	1274	14,7–15,0	90,5
	ВК8	92	–	–	8	1666	14,4–14,8	88,0
Титановольфра- мовые	Т30К4	66	30	–	4	980	9,5–9,8	92,0
	Т15В6	79	15	–	6	1176	11,1–11,6	90,0
	Т14К8	78	14	–	8	1274	11,2–11,6	89,5
	Т5К10	85	5	–	10	1421	12,4–13,1	88,5
Титанотантало- вольфрамовые	ТТ7К12	81	4	3	12	1666	13,0–13,3	87,0
	ТТ8К6	84	8	2	6	1323	12,8–13,3	90,5

*Вольфрамокобальтовые сплавы (WC–Co)* имеют наибольшую прочность, но более низкую твердость, чем сплавы других групп. Они сохраняют теплоустойчивость до 800 °С. Массовая доля карбидообразующих элементов в этих сплавах определяется разностью между 100 % и массовой долей связки (цифра после буквы К), например, сплав ВК4 содержит 4 % кобальта и 96 % WC.

*Титановольфрамовые сплавы (WC–TiC–Co)* имеют более высокую теплоустойчивость (до 900–1 000 °С) и твердость. Это связано с тем, что карбид вольфрама частично растворяется в карбиде титана при температуре спекания с образованием твердого раствора (Ti, W)C, имеющего более высокую твердость, чем WC. Структура карбидной фазы зависит от соотношения WC и TiC в шихте. В двухкарбидных (WC+TiC) сплавах цифра после буквы карбидообразующего элемента определяет массовую долю карбидов этого элемента, следующая цифра — массовая доля связки, остальное — массовая доля карбида вольфрама (например, сплав Т5К10 содержит 5 % TiC, 10 % Co и 85 % WC).

**Титанотанталовольфрамовые сплавы (WC–TiC–TaC–Co)** образуют третью группу. В этих сплавах структура карбидной основы представляет собой твердый раствор (Ti, Ta, W)C и избыток WC. Сплавы этой группы отличаются высокими прочностными характеристиками и, как следствие, лучшей, чем сплавы других групп, сопротивляемостью вибрациям и выкрашиванию. В трехкарбидных сплавах цифра после букв ТТ означает массовую долю карбидов титана и тантала. Цифра за буквой К — массовая доля связки, остальное — массовая доля карбида вольфрама. Например, сплав ТТ8К6 содержит 6 % кобальта, 8 % карбида титана, 2 % карбида тантала и 84 % карбида вольфрама.

Из табл. 4.2 видно, что даже при одинаковом содержании кобальта свойства твердых сплавов существенно различаются. Это происходит из-за разницы в размерах зерен карбида вольфрама. С уменьшением размера зерен твердость, износостойкость и, как следствие, сопротивление абразивному износу возрастают, а прочность, наоборот, снижается. Эти зависимости используют для создания сплавов с требуемыми свойствами. В современных твердых сплавах размер зерен карбидной фазы может изменяться от 15 до 0,1 мкм.

#### 4.2.1. Области применения твердых сплавов

В зависимости от обрабатываемого материала и вида образующейся стружки в соответствии со стандартом ISO инструментальные материалы подразделяют на 6 групп резания — Р, М, К, N, S и H, каждая из которых обозначается определенным цветом (табл. 4.3). В свою очередь группы резания подразделяют на группы применения, которые обозначают буквой (группа резания) и числовым индексом (группа применения). Чем больше индекс группы применения, тем ниже твердость и износостойкость твердого сплава и допускаемая скорость резания, но выше прочность (ударная вязкость), допускаемая подача и глубина резания.

Таблица 4.3

#### Группы резания по стандарту ISO 513

Группа (цвет маркировки)	Основная область применения
Р (синий)	Обработка материалов, дающих сливную стружку, в основном сталей
М (желтый)	Обработка коррозионностойких сталей и сплавов, дающих как сливную стружку, так и стружку скалывания
К (красный)	Обработка чугунов, дающих стружку скалывания
N (зеленый)	Обработка алюминиевых и медных сплавов

Группа (цвет маркировки)	Основная область применения
S (коричневый)	Обработка труднообрабатываемых материалов (жаропрочные стали и сплавы, титан и его сплавы)
H (серый)	Обработка закаленных сталей и литейных чугунов

Меньшее значение числового индекса группы применения соответствует чистовым операциям, когда от твердых сплавов требуется высокая износостойкость и малая прочность, а большой индекс соответствует черновым операциям, т.е. когда твердые сплавы должны иметь высокие прочностные свойства. В связи с этим каждая марка имеет свою предпочтительную область применения, в которой она обеспечивает максимальные работоспособность сплава и производительность процесса обработки.

Для обозначения мелкозернистых твердых сплавов в России или ставится буква М в конце марки (см. табл. 4.2) либо применяется обозначение марки буквами МС с последующей цифрой 1 для группы резания Р, цифрой 2 — для группы М и 3 — для группы К.

Основные марки твердых сплавов серии МС и заменяемые ими стандартные твердые сплавы приведены в табл. 4.4.

*Таблица 4.4*

#### **Марки твердых сплавов серии МС и соответствующие марки по ГОСТ 3882–74**

Марка твердого сплава		Марка твердого сплава	
по ТУ 48-19-308	по ГОСТ 3882–74	по ТУ 48-19-308	по ГОСТ 3882–74
МС313	ВК6	МС146	T5K10
МС318	–	МС121	T14K8
МС312	ВК6М	МС111	T15K6
МС306	ВК6ОМ	МС101	T30K4
МС212	–	МС1460	ТТ7К12
МС321	–	МС221	ТТ10К8Б
МС347	ВК8	МС2210	ТТ10К8БГТ
МС241	–	МС137	ТТ20К9

В табл. 4.5 в качестве примера представлена номенклатура твердых сплавов без покрытий, выпускаемых ОАО «Кировградский завод твердых сплавов» (КЗТС), ООО Фирма «АЛГ», ООО «Сандвик–МКТС» (все — Россия) и зарубежными изготовителями.

## Марки твердых сплавов без покрытия для точения

Группы резания и применения	КЗТС (Россия)	Сандвик МКТС (Россия)	АЛГ (Россия)	Iscar (Израиль)	Seco Tools (Швеция)	Mitsubishi Carbide (Япония)	Korloy (Южная Корея)	Kennametal (США)	Pramet (Чехия)	
P	P01	T30K4	–	PT05	–	–	ST05	–	–	
	P10	T15K6 TC125T	S1P	PT10	IC70	–	ST10	P10	–	
	P20	T14K8 MC121	SMA	PT22	IC70 IC50M	–	UTi20T	ST20	K125M TTM	S26
	P30	T5K10 TC125T MC146	SM30	PT31	IC50M IC54	–	UTi20T	ST30N	GK R600 TTR	S30
	P40	TT7K12	S6	PT40	IC54	–	–	ST46	G13	S45
M	M10	BK6OM	H10A	PM22	–	890	–	–	K313	HF7
	M20	TC125T ВП322 MC221	H13A	PM33	IC08	HX 883	UTi20T	U10	K68 KMF K125M TTM	–
	M30	BK8	H10F SM30	PM33	IC08 IC28	–	UTi20T	U20	K600 TTR	S45
	M40	BK8 TT7K12	S6	PM40	IC128	–	–	U40	G13	–
K	K01	–	H1P	PK01	–	–	HTi05T	H02	K605	–
	K10	BK6OM	H1P H10 HM	PK10	IC20	890	HTi10	H01	K10 K313 KF1 KM1	–
	K20	MC321 BK6	H13A	PK20	IC20 IC10	890 HX 883	UTi20T	H10	K715 KMF	HF7
	K30	BK8	–	PK30	IC10 IC28	883	UTi30T	G10	THR	–
N	N01	–	H10 H13A	–	–	–	–	–	K605	–
	N10	–	–	–	IC20	890 H15	HTi10	H01	K10 KF1 K110M THM	–
	N20	MC321	–	PK152	–	HX KX 883	–	–	K715 KMF	HF7
	N30	–	–	–	–	H25	–	–	G13 THR	HF7
S	S01	–	–	–	–	–	RT9005	–	–	–
	S10	ВП322	H10 H10A H10F H13A	PK10	IC20	890	RT9005 RT9010	H01	K10 K313 THM	HF7
	S20	MC221	–	PK20	IC20	890 HX	RT9010 TF15	H10	K715 KMF	–
	S30	–	–	PT58	IC28	–	TF15	G10	G13 THR	–



Группы применения указываются ориентировочно, так как ряд марок твердых сплавов могут хорошо работать в нескольких группах применения и даже в разных группах резания. Обычно производители предлагают на рынке **два вида твердых сплавов**:

а) специализированные марки для определенного обрабатываемого материала и типа операции (черновая, чистовая), которые обеспечивают наибольшую производительность обработки;

б) универсальные марки для обработки различных материалов и типов операций, которые во всех возможных случаях обеспечивают достаточную производительность и стойкость.

Для массового и крупносерийного производства характерно применение специализированных марок. Однако большая номенклатура специализированных марок твердых сплавов приводит к увеличению затрат на хранение и обслуживание, а также велика вероятность ошибок при замене сплавов. При обработке часто сменяемых малых партий деталей из различных материалов используют универсальные марки твердых сплавов. В этом случае сокращаются затраты на переналадку станков, хранение и обслуживание инструментов. Однако при этом производительность и стойкость универсальных марок на 10–25 % ниже, чем у специализированных [56].

#### ***4.2.2. Твердые сплавы с износостойкими покрытиями***

Для повышения работоспособности твердосплавных инструментов используют методы нанесения на них износостойких покрытий [15, 16].

Сменные режущие пластины (СРП) из твердых сплавов с износостойкими покрытиями позволяют повысить скорости резания на 20–40 % при той же стойкости или увеличить в 1,8–5 раз стойкость инструментов при той же скорости, что и у пластин без покрытий. Имеются некоторые ограничения при эксплуатации твердосплавных пластин с нанесенными покрытиями. Их нельзя применять для чернового прерывистого резания из-за выкрашивания и сколов режущих кромок. Из-за увеличения радиуса скругления режущей кромки пластин (до 40 мкм) в процессе нанесения покрытия ограничивается их применение для чистовых операций.

Покрытия, наносимые на инструменты, обычно представляют собой нитриды, карбиды, карбонитриды и оксиды тугоплавких металлов —  $Al_2O_3$ , TiN, TiC, TiCN, TiAlN и др. На рис. 4.3 представлены характеристики твердости (HV) и температуры окисления ( $T_{ок}$ ) некоторых соединений, используемых в качестве покрытий.

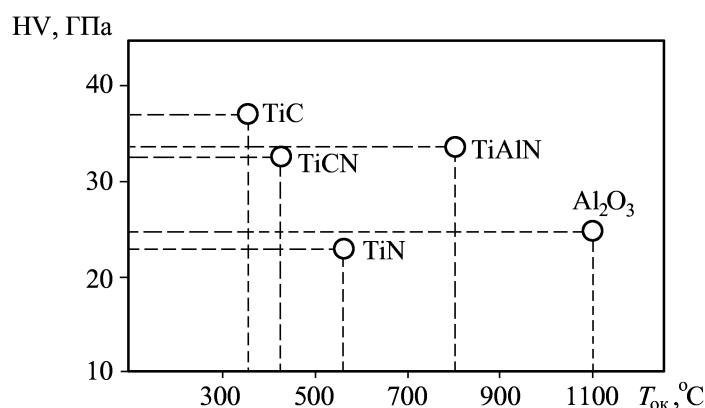


Рис. 4.3. Характеристики соединений, используемых в качестве покрытий

В настоящее время в производстве инструмента используют два основных метода нанесения износостойких покрытий: метод химического осаждения покрытий из газовой фазы Chemical Vapour Deposition (CVD) и метод физического осаждения покрытий в вакууме Physical Vapour Deposition (PVD).

К разновидностям метода CVD относятся: высокотемпературное осаждение покрытий — high-temperature (HT-CVD) и среднетемпературное осаждение покрытий — medium-temperature (MT-CVD). Методы CVD и PVD различаются по температуре нанесения покрытия и давлению (рис. 4.4). С их помощью можно получать различные по составам покрытия для разных областей применения. Методами CVD в основном получают покрытия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiN, TiC и TiCN.

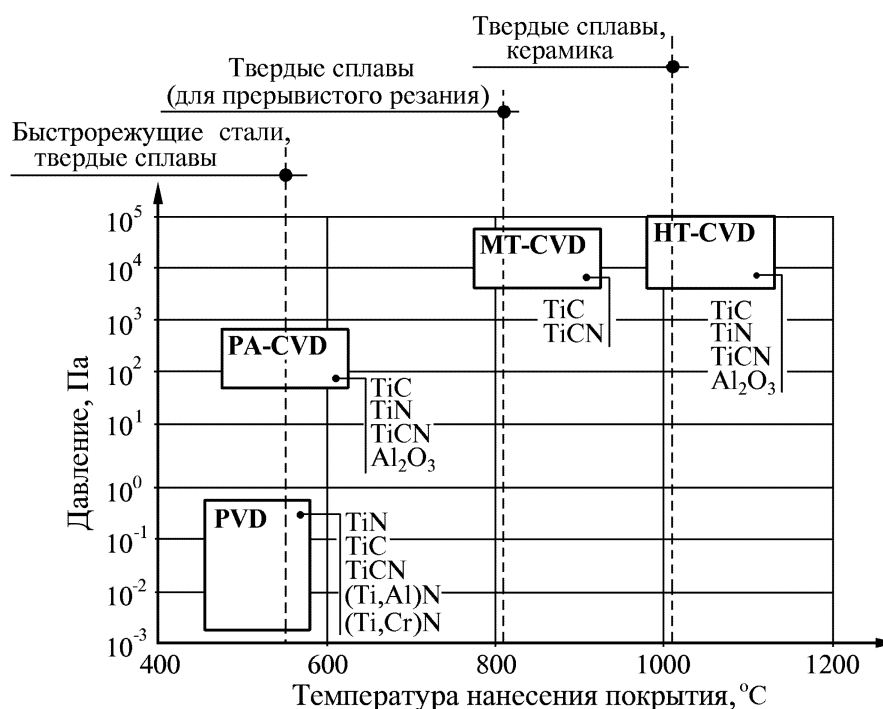


Рис. 4.4. Условия формирования покрытий CVD- и PVD-методами

Существенное значение для стойкости режущих кромок, передних и задних поверхностей имеет материал основы (подложки) для нанесения покрытия. Применение одинакового по параметрам метода нанесения покрытий для различных по характеристикам основ из твердых сплавов приводит к большому разбросу показателей стойкости. Поэтому разработке специальных твердых сплавов для подложек изготовители инструмента уделяют особое внимание.

Например, исследования [23] четырех СРП формы CNMG 120404 из твердых сплавов с одним и тем же по составу покрытием, нанесенным по методу CVD, марок UC6010 (Mitsubishi Carbide), NC320 (Korloy), GC415 (Sandvik Coromant) и CT15 (ООО «Сандвик-МКТС»), относящихся к одной группе применения, показали существенное различие в износостойкости (рис. 4.5).

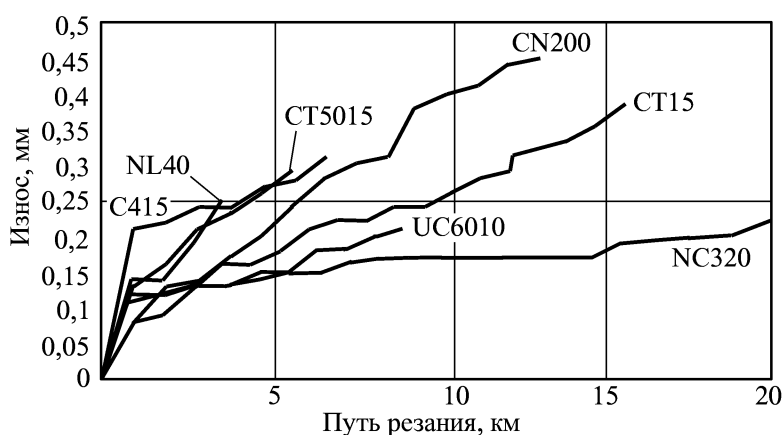


Рис. 4.5. Зависимости износа от пути резания для СРП разных изготовителей

При нанесении покрытий на основе карбидов и карбонитридов тугоплавких металлов на твердосплавные инструменты методом НТ-CVD происходит диффузия кобальта (частично и вольфрама) из твердого сплава в покрытие. В результате этого на границе раздела покрытие — твердый сплав формируется очень твердая, но хрупкая фаза толщиной до 4 мкм.

Для предотвращения хрупкого разрушения в процессе фрезерования в условиях циклических нагрузок и при обработке труднообрабатываемых сплавов на основе никеля используют метод МТ-CVD. Этот метод реализуется при температурах 780–850 °С, когда формирование хрупкой фазы не происходит.

Эксплуатационные испытания (табл. 4.6) торцовых фрез диаметром  $D_f = 100$  мм с СРП из сплава Т15К6 с покрытием TiCN, нанесенным методом МТ-CVD, показывают, что при обработке стали 45 без СОТС со скоростью резания  $v = 120$  м/мин, подачей  $S_z = 0,1$  мм/зуб и глубиной резания  $t = 1$  мм стойкость возрастает в 1,76 раза по сравнению с инструментом без покрытия.

### Результаты эксплуатационных испытаний торцовых фрез

Способ нанесения	Без покрытия	НТ-CVD	МТ-CVD
Стойкость инструмента, мин	100	74	176
Причина отказа	Износ	Выкрашивание	Износ

Температура, превышающая 750 °С, при которой формируются покрытия методами НТ-CVD и МТ-CVD, исключает возможность их применения на инструментах из быстрорежущих сталей. Для устранения этого ограничения используют метод химического осаждения покрытий с плазменным сопровождением (РА-CVD), который реализуется при температурах 550–650 °С.

Помимо однослойных покрытий TiN, TiC и TiCN широко используются и многослойные покрытия. Типичным представителем таких покрытий является покрытие TiC–TiCN–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Наружный слой из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> служит своеобразным термоизолирующим барьером и снижает окисление инструментального материала при повышенных температурах резания. Карбид титана TiC обладает кристаллохимической совместимостью с твердосплавной подложкой, а карбонитрид титана TiCN повышает прочность адгезионной связи между инструментальным материалом и наружным слоем покрытия.

Кроме состава покрытия очень важной характеристикой является его толщина. С одной стороны, ее рост благоприятно сказывается на повышении износостойкости рабочих поверхностей инструмента, с другой — приводит к заметному увеличению количества дефектов в покрытии, снижению прочности сцепления покрытия с инструментальным материалом и уменьшению способности покрытия сопротивляться хрупкому разрушению. Поэтому при нанесении покрытий на инструменты, эксплуатирующиеся в условиях прерывистого резания, например, при фрезеровании, когда покрытие должно сопротивляться циклическим нагрузкам, его толщина, как правило, не превышает 6–7 мкм, в то время как при точении этот показатель может достигать 15 мкм.

В табл. 4.7 представлены рекомендации по выбору составов износостойких покрытий, наносимых на твердые сплавы производства КЗТС методом CVD в зависимости от выполняемой операции. Как видно из представленных данных, нанесение покрытий позволяет увеличить стойкость инструментов в 1,8–5 раз или существенно повысить производительность обработки при исходной стойкости.

Таблица 4.7

### Составы износостойких покрытий, наносимых CVD-методами

Операция	Материал основы	Рекомендуемые покрытия	Суммарная толщина покрытия, мкм	Оптимальная скорость резания для инструмента, м/мин		Коэффициент увеличения стойкости
				без покрытия	с покрытием	
Точение	T5K10	TiC-TiCN-TiN	8	150	200	3-5
	T30K4	TiC-TiCN-TiN	8	180	240	
	TT8K6	TiN-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiCN	10	200	250	
Фрезерование	TT7K12	TiC-TiCN-TiN	6	100	150	2,5-3
	T5K10	TiN-TiC-TiN	6	140	200	
Точение, фрезерование	BK6	TiC-TiCN-TiN	6-8	120	180	3-5
	TT7K12	TiC-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6-8	160	220	
Точение, фрезерование	BK6	TiC-TiCN-TiN	6-8	120	150	2-2,8
	TT8K6	TiN-TiC-TiN	6-8	150	180	
Точение	BK6	TiC-TiCN-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8	20	45	1,8-2,5
	BK8	TiC-TiCN-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10	25	60	

PVD-методы нанесения покрытий универсальны с точки зрения получения гаммы однослойных, многослойных и композиционных покрытий на основе нитридов, карбидов, карбонитридов, оксидов и боридов тугоплавких металлов. Они позволяют реализовывать процессы нанесения покрытий при температурах 500–600 °С, что обеспечивает нанесение покрытий на быстрорежущие стали, твердые сплавы и керамику.

Твердые сплавы серии MC обладают повышенной стойкостью (в 1,5 раза) по сравнению со стойкостью твердых сплавов, выпускаемых по ГОСТ 3882–74.

Сопоставление твердых сплавов с покрытиями CVD и PVD для токарной и фрезерной обработки приведены в табл. 4.8–4.11.

Таблица 4.8

### Сопоставление твердых сплавов с покрытием CVD для токарной обработки

Группы резания и применения	КЗТС (Россия)	Sandvik Coromant (Швеция)	Iscar (Израиль)	Kennametal (США)	Seco Tools (Швеция)	Mitsubishi Carbide (Япония)	Korloy (Южная Корея)	Pramet (Чехия)	Walter (Германия)	
P	P01	–	GC4005	–	KC9110 TN7005	TP1000	UE6005	NC3010	6620	WTA23
	P10	MC2215	GC4005 GC4015 GC3115	IC9150 IC9015	KC9110 TN7005 TN7010	TP1000 TP2000 TP200 TX150	UE6005 UE6010 UE6020	NC3010 NC310	6630	WAP20 WAP25

Группы резания и применения	КЗТС (Россия)	Sandvik Coromant (Швеция)	Iscar (Израиль)	Kennametal (США)	Seco Tools (Швеция)	Mitsubishi Carbide (Япония)	Korloy (Южная Корея)	Pramet (Чехия)	Walter (Германия)	
	P20	ТС1Т MC1465	GC4015 GC4025 GC2015 GC3025 LC	IC9150 IC9025	KC9125 TN7015	TP2000 TP200	UE6010 UE6020 UC6010	NC3120 NC3015	6630	WTA33 WAP30
	P30	ТС1Т MC1465	GC4025 GC4035	IC9250 IC656 IC9054	KC8050 KC850 TN7025	TP3000 TP300 TP400	UE6035 UH6400 US735	NC3020	6640	WTA43
	P40	MC1465	GC4035 GC235	IC9350 IC9054 IC635	KC9040	TP400 TP40	UE6035 UH6400 US735	NC3030 NC500H	6640	WTA51
M	M10	MC3215	GC2015	IC9250	TN7010	TP200	US7020	–	6630	WAP30
	M20	ТС1Т MC1466	GC2025	IC9250 IC9025	KC9225 TN7015 TN7525	TP200 TP300	US7020	NC9020	6630	WAP30
	M30	ТС1Т MC1465	GC2135 GC235	IC9350 IC9025	KC9040 KC8050 TN7025	TP 300 TP 400 TP40	US735	NC3030	6640	WTA43
	M40	–	GC235	IC9350	KC9240 KC9240	TP400 TP40	US735	–	–	–
K	K01	–	GC3205 GC3210	IC9007	–	TX100	UC5105 UC5005	NC305K	–	WTA13
	K10	ВП3115 MC2215	GC3005 GC3015	IC9150 IC418 IC428	KC9315 TN5015 TN7010	TX100 TX150	UC5115 UC5015 UE6010	NC6110	6620	WAP25
	K20	ВП3115	GC3215 GC3205	DT7150 IC9015	KC9325 TN5020 TN7015	TP200 TX150	UE6010 UC6010	NC6010 NC6110	6630	WTA53
	K30	ВП3325	GC3215	–	KC8050 KC9040 TN7025	TP200	–	NC6110 NC315K	6640	–

Таблица 4.9

### Сопоставление твердых сплавов с покрытием CVD для фрезерования

Группы резания и применения	КЗТС (Россия)	Sandvik Coromant (Швеция)	Iscar (Израиль)	Kennametal (США)	Seco Tools (Швеция)	Mitsubishi Carbide (Япония)	Korloy (Южная Корея)	Pramet (Чехия)	
P	P10	MC2216 ТС1F	–	IC4100	–	T200M T250M	–	–	
	P20	ТС1F	GC4020	IC4100 IC520M	–	T250M T350M T25M	F7030	NCM325	5026
	P30	ТС1F	GC4030	IC4050 IC450	KC	T250M T350M T25M	F7030	NCM335	5026
	P40	MC1465H	GC4030	IC4050 IC635	–	T350M	–	–	–
M	M20	MC1466	–	–	KC925M	T250M T25M	F7030	–	5026
	M30	MC1465	–	–	KC930M	T350M T25M	F7030	NCM335	–

Группы резания и применения	КЗТС (Россия)	Sandvik Coromant (Швеция)	Iscar (Израиль)	Kennametal (США)	Seco Tools (Швеция)	Mitsubishi Carbide (Япония)	Korloy (Южная Корея)	Pramet (Чехия)	
К	К10	MC3215	GC3020	IC4100 IC4010	KC915M	–	F5010	NCM310K	–
	К20	MC3215	GC3020	DT7150 IC4100	KC925M	–	F5020	NCM320K	5026
	К30	MC3216	GC3040	IC4050 IC450	KC930M	–	–	–	–

Таблица 4.10

**Сопоставление твердых сплавов с покрытием PVD  
для токарной обработки**

Группы резания и применения	КЗТС (Россия)	Sandvik Coromant (Швеция)	Iscar (Израиль)	Kennametal (США)	Seco Tools (Швеция)	Mitsubishi Carbide (Япония)	Korloy (Южная Корея)	Pramet (Чехия)	Walter (Германия)	
P	P10	MC121H T15K6H	GC1010	IC507	KC732 KC5010 KC5510	CP200	VP10MF	–	8016	WXK10
	P20	MC121H T14K8H	GC1020 GC1025	IC507 IC220 IC308 IC908	KC732 KC730	CP250	VP15TF VP20MF	–	8016	WXK10
	P30	MC146H T5K10H	GC1025	IC308 IC280 IC908 IC328 IC3028	KC732 KC730	CP500	VP15TF VP20MF	PC2030	8030	WXM25 WXM35
	P40	MC146H TT7K12H	GC1020 GC2145	IC328 IC3028 IC354	KC720	CP500	–	–	8040	WXM35
M	M10	MC221H BK60MH	GC1005 GC1025	IC507 IC907	KC5010 KC5510	CP200	VP0MF	PC8010	8016	WXK10
	M20	MC221H ВП322H	GC1020 GC1025	IC507 IC908 IC1028	KC8050	CP200 CP500	VP15TF VP20MF	–	8030	WXM35
	M30	MC321H BK8H	GC1020 GC2035	IC328 IC3028 IC1028	KC5025 KC5525 KC710	CP500	VP15TF VP20MF	PC9030	8040	WXM35
	M40	MC146H TT7K12H BK8H	GC2145	IC328 IC3028	–	–	–	–	–	–
K	K10	BK60MH		IC507 IC907	KC5010 KC5510	CP200	–	PC205K	8016	WXK10
	K20	MC321H BK6H	GC1020	IC308 IC908	–	CP200 CP250	VP15TF	PC215K	8016	WXK25
	K30	MC321H BK8H	GC1025	IC328 IC3028 IC1028	–	CP500	VP15TF	–	8030	WXM25
S	S10	–	GC 1025		KC5410 KC5010 KC5510	CP200 CP250	VP05RT VP10RT	PC8010	8016	–
	S20	–	–	–	KC5025 KC5525	CP250 CP500	VP10RT VPTF	–	8030	–
	S30	–	–	–	–	–	VP15TF	–	8040	–

**Сопоставление твердых сплавов с покрытием PVD  
для фрезерования**

Группы резания и применения	КЗТС (Россия)	Sandvik Coromant (Швеция)	Iscar (Израиль)	Kennametal (США)	Seco Tools (Швеция)	Mitsubishi Carbide (Япония)	Korloy (Южная Корея)	Pramet (Чехия)	Walter (Германия)	
P	P10	T15K6H	GC1015	IC903	KC705M	–	–	–	8016	WXM22
	P20	T14K8H MC137H	GC1020	IC900 IC910 IC908	KC732M KC525M	F25M	VP15TF	PC3525	8026	WXM22
	P30	MC146H T5K10H	GC1025 GC1120	IC900 IC250	KC721M	F25M F30M	VP15 TF VP30RT	PC3530	8040	WXM35
	P40	TT7K12H	GC2030	IC900	KC725M KC720	F40M T60M	VP30RT	PC3535 PC3545	8040	WXM35
M	M10	–	GC1025	IC903	KC715M	–	–	–	8016	WXM22
	M20	ВП332H MC221H	GC2030	IC903 IC900	KC522M KC525M	F25M	V15PTF	–	8026	WXM22
	M30	MC146H	GC2030	IC928	KC725M KC735M	F30M F40M	VP15TF	PC9530	8040	WXM35
	M40	–	–	IC328	–	–	VP30RT	PC3545	–	–
K	K01	–	–	IC900	–	–	VP30RT	–	8016	WXM22
	K10	BK60MH	–	IC903	KC510M	–	–	PC205K	8016	WXM22
	K20	BK6H	–	IC910 IC950	KC520M KC522N KC525M	–	–	PC6510 PC215K	8026	WXM22
	K30	MC321H BK8H	–	IC328 IC910	KC725M	–	VP15TF	–	8040	WXM35
S	S10	–	GC1025	IC900	KC510M	–	VP15TF	PC8520	8016	WXM22
	S20	–	GC2030	IC903	KC522M KC525M	–	VP15TF	PC8520	8026	WXM26
	S30	–	GC2030	IC328 IC903	KC725M	F40M	–	–	–	–
H	H10	–	GC1025	IC903	–	F15M	VP15TF	–	8016	–
	H20	–	–	–	–	F15M	VP15TF	–	–	–

#### 4.2.3. Ультрамелкозернистые твердые сплавы

Изменение требований к инструментальному материалу (появление новых обрабатываемых материалов, требование постоянного роста производительности и т.д.) приводит к непрерывному развитию самих твердых сплавов, причем меняется как структура самого сплава, так и состав покрытий.

В области структуры основной тенденцией является уменьшение зерна твердосплавного порошка. За прошедшие несколько лет размер зерна твердого сплава сократился более чем в 5 раз.

В результате уменьшения зерна существенно повышаются технологические свойства твердого сплава, в первую очередь твердость и изгибная прочность (вязкость сплава). Повышение изгибной прочности увеличивает прочность



режущей кромки, в результате уменьшается износ, вызванный выкрашиванием. Другим следствием уменьшения размера зерна является возможность получения более острой кромки с меньшим углом режущего клина и меньшим радиусом скругления. В результате снижаются силы резания и температуры в зоне контакта. При температуре около 600 °С повышается твердость сплава, что сокращает абразивный износ. С уменьшением размера зерна снижается теплопроводность твердого сплава и увеличивается количество тепла, уходящего в стружку. Благодаря возможности изменить геометрию клина можно снизить действие механизма износа, вызванного температурой – налипание материала и диффузия.

Сегодня основную долю применяемых твердых сплавов составляют мелкие и мельчайшие сплавы с размером зерна 1,3–0,8 мкм.

Приведенные свойства ультрамелкозернистых сплавов делают их особо привлекательными в тех областях, где из-за высоких сил резания и температур требуется особо острая кромка. К таким областям относится фрезерование закаленных сталей с ограниченным применением СОТС.

В табл. 4.12 приведено сопоставление марок ультрамелкозернистых твердых сплавов в специальной группе резания Z по НСО.

Таблица 4.12

### Сопоставление марок ультрамелкозернистых твердых сплавов

ISO		Mitsubishi Carbide (Япония)	Sandvik Coromant (Швеция)	Korloy (Южная Корея)	Seco Tools (Швеция)	Sumitomo Electric (Япония)	Toshiba Tungaloy (Япония)	Kyosega (Япония)	Dijet (Япония)	Hitachi Tool (Япония)
Классификация	Обозначение									
Z	Z01	ZH104 SF10 MF10	6UF 8UF PN90	–	–	F0	F MD08F	–	FZ02 FB10	NM08
	Z10	HT110 MF20	H6FF 12UF	FS1 FCC FG2	890	F1 AFU	M MD10 MD05F	FW30	FZ10 FZ15 FB15 FB20	MM15
	Z20	TF15 UF30	N6F H10F	FA1	890 883	AF0 SF2 AF1	MD15 EM10 MD20	–	FZ15 FB15 FB20	BRM20 EF20N
	Z30	–	–	–	883	A1 CC	UM	–	FZ20 FB20	NM25

### 4.3. Керметы

Керметы (безвольфрамовые твердые сплавы) спекают из карбидов титана (TiC), ниобия (NbC) или карбонитрида титана (TiN) с использованием никель-молибденовой или молибденовой связок.

Керметы обладают следующими *свойствами*:

- повышенная устойчивость против высокотемпературной коррозии и окисления;
- малая растворимость в железе и повышенная химическая инертность (неокисляемость), что обеспечивает повышенную износостойкость в условиях коррозионного и диффузионного изнашивания;
- малая теплопроводность, что позволяет исключить использование СОТС;
- большой коэффициент термического расширения, что усиливает термическую усталость в условиях частых смен температуры;
- пониженная прочность, пластичность и упругость.

Керметы применяют при обработке заготовок из чугуна, углеродистых, коррозионностойких и жаростойких сталей и сплавов. Керметы эффективны при обработке сталей повышенной твердости, однако при обработке закаленных сталей не применяются. Высокоэффективны при обработке алюминиевых сплавов с низким содержанием кремния. Не рекомендуется применять инструмент, оснащенный керметами, при обработке цветных металлов.

Современные керметы используются для изготовления инструмента, предназначенного для чистовой и получистовой обработки на операциях точения, сверления, фрезерования, нарезания резьбы и прорезания канавок.

Для керметов оптимальная скорость резания на 20–60 % превосходит скорость резания стандартную для ТС без покрытия групп применения K01–K20 и P01–P20. Возрастающие требования к экологичности механообработки и применение в связи с этим «сухой» обработки дали новый импульс развитию керметов.

В настоящее время созданы керметы, которые содержат особотвердые частицы Ti(C, N) с добавками Ta, W и Mo в связующей матрице из Co и Ni. В отличие от структуры обычных твердых сплавов, в которых карбиды титана TiC присутствуют в форме сфер, а карбиды вольфрама WC — в форме многогранников, в керметах зерна Ti(C, N) имеют только круглую форму. Поэтому прочность современных керметов, содержащих нитриды, сопоставима с обычными твердыми сплавами группы P.

Эффективность применения керметов существенно зависит от правильности подготовки инструментов, выбора режимов резания и условий обработки. В целом же опыт внедрения керметов показывает, что при выпуске заданной номенклатуры изделий и обеспечении стабильного уровня показателей качества, до 25 % общего объема выпуска вольфрамовых твердых сплавов могут быть заменены на керметы.

Безвольфрамовые твердые сплавы по сравнению с вольфрамовыми сплавами имеют меньше прочность на изгиб, но выше твердость, обладают низкой схватываемостью со сталями. Инструменты из этих сплавов работают по сталям практически без наростообразования, что и предопределяет область их применения (чистовое и получистовое точение и фрезерование малолегированных, углеродистых сталей, чугуна и цветных сплавов). Износостойкость в 1,2–1,5 раза выше, чем у сплавов группы ТК.

В табл. 4.13 представлены сведения о некоторых марках керметов по ГОСТ и ТУ, их химическом составе, физико-механических свойствах и областях применения.

Таблица 4.13

### Физико-механические свойства и области применения отечественных керметов

Марка	Содержание основных компонентов, %					Плотность, г/см <sup>3</sup>	Предел прочности $\sigma_{изг}$ , Н/мм <sup>2</sup>	Твердость, HRA	Группа применения
	TiC	TiCN	NbC	Ni	Mo				
ТН20	79	–	–	15,0	6,0	5,5–6,0	1 050	90,0	P10–P20 K10–K20
КНТ16	–	74	–	19,5	6,5	5,5–6,0	1 200	89,0	P10–P20 K10–K20
НТН30	52	–	10	19,5	10,5	6,0–6,5	1 323	89,5	P10–P20 K10–K20
ЦТУ	–	56	9	23	12	6,2–6,8	1 274	89,5	P20–P30
ТВ4	–	56,3	1	–	8,7	6,3–6,7	1 323	89,0	P20–P30

Керметы отличаются высокой твердостью, окалиностойкостью, имеют низкий коэффициент трения по стали и пониженную склонность к адгезионному взаимодействию с обрабатываемым материалом, что уменьшает износ инструментов по передним и задним поверхностям, обеспечивает низкую шероховатость обработанных поверхностей и высокую размерную точность.

В то же время керметы имеют более низкий, чем у стандартных твердых сплавов, модуль упругости, а следовательно, и сопротивление упругим и пластическим деформациям, меньшую теплопроводность и ударную вязкость, поэтому они хуже сопротивляются ударным и тепловым нагрузкам.

Указанные свойства определяют области рационального применения керметов при обработке материалов резанием — главным образом для чистовой и получистовой обработки углеродистых и легированных конструкционных сталей с высокой скоростью резания и относительно небольшими сечениями среза.

Сопоставление марок керметов, выпускаемых ведущими производителями режущих материалов, приведены в табл. 4.14.

Таблица 4.14

## Сопоставление марок керметов

Обработка	ИСО		Mitsubishi Carbide (Япония)	Sandvik Coromant (Швеция)	Kennametal (США)	Seco Tools (Швеция)	Iscar (Израиль)	Sumitomo Electric (Япония)	Toshiba Tungaloy (Япония)	Kyosera (Япония)	Dijet (Япония)	Hitachi Tool (Япония)	Korloy (Южная Корея)	CeramTec (Германия)
	Классификация	Обозначение												
Токарная	P	P01	AP25N	CT5005	KT125 HTX	–	IC20N IC520N	T110A T2000Z	NS520 AT520 GT520	TN30 PV30	LN10 CX50	CH350	CN100	SC8015
		P10	AP25N NX2525	CT5015 CT525 GC1525	KT175 HT2	CM	IC20N IC520N IC530N	T1200A T2000Z	NS520 AT520 AT520	TN60 TN6020 PV60 PV7020	LN10 CX50 CX75	CY350 CZ1025 CZ25	CN10	SC7035
		P20	AP25N UP35N NX2525 NX335	GC1525	PS5 KZ205	CM	IC20N IC75T IC30N IC520N IC530N	T1200A T2000Z T3000Z	NS530 AT530 GT530	TN90 TN6020 PV90 PV7020	CX50 CX75	CH550 CZ1025	CN20 CN2000	SC7015
		P30	VP45N	–	–	–	IC75T IC30N	T3000Z	NS530	–	–	–	–	CN30
	M	M10	NX2525 AP25N	CT5015 CT525 GC1525	KT125 KT175	CM	–	T110A T2000Z	NS520 AT530 GT530	TN60 TN6020 PV60 PV7020	LN10 CX50	CH350	–	SC15
		M20	NX2525 AP25N	GC1525	KT175 HT2 PS5	–	–	T1200A T2000Z	NS530	TN90 TN6020 PV90 PV7020	CX50 CX75	CY550 CZ1025	–	SC40
		M30	–	–	KZ205	–	–	T3000Z	–	–	CX75	–	–	–
	K	K01	AP25N NX2525	CT5015	HTX	–	–	T110A T2000Z	NS520 AT520 GT520	TN30 PV30	LN10	–	–	–

Обработка	ИСО		Mitsubishi Carbide (Япония)	Sandvik Coromant (Швеция)	Kennametal (США)	Seco Tools (Швеция)	Iscar (Израиль)	Sumitomo Electric (Япония)	Toshiba Tungaloy (Япония)	Kyosera (Япония)	Dijet (Япония)	Hitachi Tool (Япония)	Korloy (Южная Корея)	CeramTec (Германия)	
	Классификация	Обозначение													
Обработка		K10	AP25N NX2525	CT5015 CT525	KT315	–	–	T1200A T2000Z	NS520 AT530 GT530	TN60 TN6020 PV60 PV7020	LN10	CH350	CN100	SC8015	
		K20	AP25N NX2525	–	–	–	–	T3000Z	–	–	CX75	–	CC115	SC7015	
Фрезерование	P	P10	NX2525	–	KT195M KT530M	C15M	IC30N	–	TN60	CX75	–	CN100	–		
		P20	NX2525	CT530	KT195M KT530M HT7 KT605M	C15M	IC30N	NS530 NS740	TN60 TN100M	CX75 CX90	CH550 CH7030 CH570	CN20	SC60		
		P30	NX4545	–	–	–	IC30N	NS540 NS740	–	CX90 CX99	–	CN30	–		
	M	M10	NX2525	–	–	–	C15M	IC30N	–	–	TN60	–	–	–	–
		M20	NX2525	CT530	KT195M KT530M HT7 KT605M	C15M	IC30N	–	NS530	TN60 TN100M	CX75 CX90	CH550 CH7030 CH570	–	SC60	
		M30	NX4545	–	–	–	–	–	T250A	NS540 NS740	–	CX90 CX99	–	–	SC60
	K	K01	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
		K10	NX2525	–	–	HT5	–	–	–	–	TN60	CX75	–	CC115	–
		K20	NX2525	–	–	–	–	–	–	–	–	CX75	–	CC115	–

При выборе марки твердого сплава для конкретных производственных условий необходимо решить задачу оптимизации по одному из **критериев**:

- а) минимальная стоимость одной режущей кромки;
- б) минимальная себестоимость обработки конкретного изделия;
- в) максимальная стойкость;
- г) минимальная стоимость эксплуатации закупленного комплекта инструмента, включая восстановление режущих свойств и приобретение дополнительных комплектующих.

На машиностроительных предприятиях России широко используются инструменты, оснащенные СРП, как отечественного, так и зарубежного производства. СРП очень разнообразны по составам твердых сплавов и покрытий, конфигурации передних поверхностей и режущих кромок. Это позволяет выбрать наиболее приемлемый вариант, обеспечивающий требуемые функциональные показатели процесса обработки при минимальных затратах и назначить оптимальные режимы обработки для получения заданного качества обрабатываемого изделия. Однако информация о зарубежном инструменте носит зачастую рекламный характер, что осложняет принятие правильного решения. Поэтому потребитель чаще отдает предпочтение инструментам наиболее известных фирм, что не всегда обосновано. В связи с этим практический интерес представляет сопоставление режущих свойств СРП различных производителей, которые имеют одинаковую группу резания, группу применения по ИСО и форму по ГОСТ 19042–80 (в ред. 1991 г.).

В [23] приведены результаты такого сопоставления, которые были получены в лабораторных условиях при непрерывном точении стали 45Х (280 НВ) без применения СОТС. Главной задачей при проведении экспериментов являлась оценка износостойкости керметов.

Закрепляли СРП из керметов в резцовые державки с главным углом в плане  $\varphi = 90^\circ$ . Точение проводили при подаче  $S_o = 0,15$  мм/об и глубине резания  $t = 0,1–0,5$  мм. За критерий затупления был принят линейный износ по задней поверхности. Результаты экспериментов в виде зависимостей износа от пути резания представлены на рис. 4.6. Из полученных зависимостей следует, что кермет марки СТ5015 фирмы Sandvik Coromant по износостойкости уступает кермету марки CN200 южно-корейской фирмы Kogloy, несмотря на то что для последнего предпочтительной является группа применения P01.

В работе [68] обобщен производственный опыт использования СРП из керметов и из твердых сплавов с износостойкими покрытиями на заводах «Тяжпромарматура» (г. Алексин) и «Завод РТО» (г. Щекино).

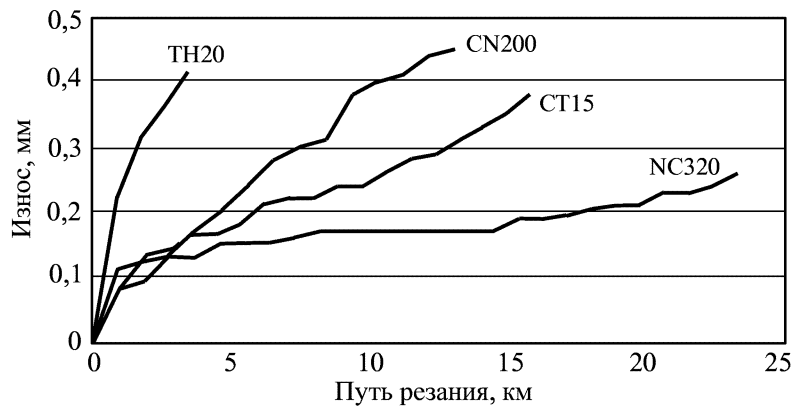


Рис. 4.6. Зависимость износа от пути резания для режущих материалов разных марок

На рис. 4.6 приведены зависимости линейного износа по задней поверхности от пути резания. Из опубликованных материалов видно, что износостойкость кермета CN200 при скорости резания  $v = 230$  м/мин существенно превосходит износостойкость пластины из кермета TH20 Узбекского комбината тугоплавких и жаропрочных материалов (г. Чирчик).

Для сравнения представлены зависимости для СРП из твердых сплавов с износостойкими покрытиями CVD марок CT15 и NC320 при тех же режимах резания. Как видно, стойкость этих СРП выше, однако, как установлено в [68], по шероховатости обработанной поверхности детали они уступают СРП из сплава CN200. Следовательно, чистовая обработка деталей резцами, оснащенными СРП из кермета, в данных условиях является более предпочтительной, несмотря на меньшую стойкость.

Для обработки коррозионно-стойкой стали 08X18H10T на «Заводе РТО» в результате производственных экспериментов были рекомендованы СРП формы CNMG 120404 из твердого сплава NC320 с покрытием CVD с геометрией передней поверхности «HF» фирмы Korloy, которые обеспечивают удовлетворительное стружкодробление в относительно широком диапазоне глубин резания и подачи.

Приведенные примеры показывают, что для правильного выбора СРП из твердых сплавов различных фирм и, в частности, выбора формы их передних поверхностей необходимым условием являются производственные и лабораторные испытания. Затраты на эти испытания быстро окупаются за счет последующего роста эффективности механической обработки.

#### 4.4. Режущая керамика

Преимущества высокоскоростного резания могут быть достигнуты только при условии создания инструментов с принципиально новым уровнем

свойств. Этим объясняется повышенное внимание машиностроителей к новым видам режущей керамики и оснащенных ею инструментов. Их рациональное применение способно обеспечить не только рост технико-экономических показателей металлообработки, но и прорыв в создании новых конкурентоспособных машин. Развитие этих инструментов направлено на прецизионную лезвийную обработку, удовлетворение требований экологических норм и экономию дефицитных металлов.

В современной отечественной промышленности потенциальные преимущества режущей керамики реализуются в очень узкой области применения, в первую очередь из-за несоответствия большей части имеющегося технологического оборудования требованиям эксплуатации инструмента, оснащенного режущей керамикой. Во-вторых, это происходит из-за устойчивых представлений заводских технологов о низкой прочности и природной хрупкости керамик в принципе, которые определяют высокую вероятность внезапного разрушения инструмента. В результате в настоящее время объем режущей керамики, применяемой в отечественной металлообработке, не превышает 2–3 % от общего числа инструментов. И это несмотря на большой дефицит высокопроизводительных инструментов в отраслях, производящих современную технику из труднообрабатываемых материалов.

Достижения в деле совершенствования режущей керамики так велики, что она все более вытесняет твердые сплавы и даже сверхтвердые материалы при обработке ковких, отбеленных и серых чугунов, жаропрочных и титановых сплавов, относящихся к группам обработки резанием К и S по ИСО.

Активно ведутся работы по созданию новых или усовершенствованию известных марок керамики с целью повышения их прочностных характеристик. К таким разработкам относится керамика, армированная (вискеризованная) «нитевидными кристаллами» SiC или легированная  $TiB_2$ ,  $ZrO_2$ ,  $Y_2O_3$  и другими компонентами. Кроме того, наряду с совершенствованием составов керамики, для повышения ее эксплуатационных характеристик в промышленности используют различные способы нанесения износостойких покрытий и совершенствование технологий прессования СРП.

В табл. 4.15 приводятся сведения о типах и составах современной режущей керамики, а на рис. 4.7 показано их место в группе инструментальных материалов для высокоскоростной обработки.

В табл. 4.16 представлены марки и области применения режущей керамики, предлагаемой на рынке инструмента.



### Типы и составы современной режущей керамики

Тип	Наименование	Состав
1	Оксидно-карбидная (смешанная)	$Al_2O_3 + Ti (C, N)$
2	Оксидная (белая)	$Al_2O_3 + ZrO_2$
3	Нитридная (силинит)	$Si_3N_4$
4	Нитридная с покрытием CVD	$Si_3N_4 (TiN + Al_2O_3 \text{ или } TiCN + TiN)$
5	Сиалон	Si-Al-O-N
6	Армированная (вискерованная)	$Al_2O_3 + SiC$
7	Оксидная с покрытием	$Al_2O_3 + ZrO_2 (TiC)$
8	На основе карбида титана	TiC

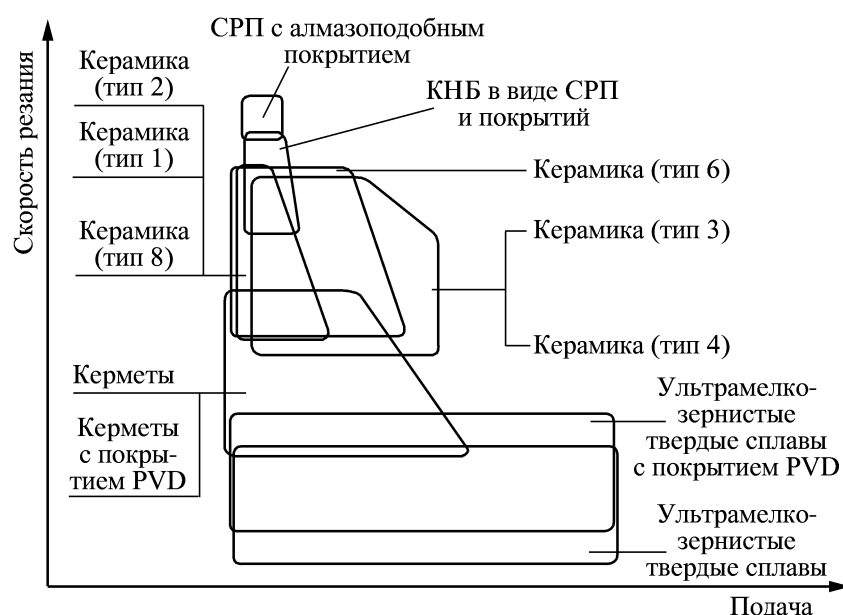


Рис. 4.7. Характеристика режущих материалов для высокоскоростного резания

### Марки и области применения режущей керамики

Тип	Марка	Группа применения	Область применения
<i>Sandvik Coromant</i>			
1	CC650	K01–K05	Чистовая обработка серого и отбеленного чугунов, закаленных сталей и жаропрочных сплавов
2	CC620	K01	Высокоскоростная обработка серых чугунов
3	CC6090	K01–K20	Черновая обработка в благоприятных условиях, высокоскоростная получистовая обработка серого чугуна
4	GC1690	K10	Черновая, получистовая и финишная обработка чугунов
5	CC6050	H10	Обработка поверхностно закаленных материалов

Тип	Марка	Группа применения	Область применения
6	CC670	S10–S20; H10	Обработка жаропрочных и титановых сплавов и материалов высокой твердости в тяжелых условиях
<i>Kennametal</i>			
1	KY1615	K01-K10	Чистовая обработка серых чугунов
3	KY3500	K10-K30	Высокоскоростная обработка серого чугуна, возможна обработка по корке при прерывистом резании
4	KY3400	K10-K30	Высокоскоростная обработка чугунов с шаровидным графитом, особенно в условиях тяжелого прерывистого резания
5	KY2100	S10	Обработка (черновая и чистовая) жаропрочных сплавов
6	KY4300	S10; K10	Обработка жаропрочных сплавов, обработка высокопрочных чугунов
7	KY4400	H10; K01	Обработка закаленных материалов (до 65 HRC), чистовая обработка серых чугунов
<i>CeramTec</i>			
1	SH2	K10; H10	Прерывистое точение серого чугуна в тяжелых условиях
1	SH3	H10	Точение жаропрочных сплавов
2	SN60	K10	Черновая, получистовая обработка чугунов
2	SN80	K20	Высокоскоростное точение серого чугуна, возможна обработка по корке
5	SL606	K05–K20	Чистовое и получистовое точение серого чугуна
5	SL608	K20	Черновое точение чугунов (серого и с шаровидным графитом)
5	SL658	K20–K30	Черновое точение чугунов с шаровидным графитом с высокой скоростью
5	SL858C	K01–K20	Чистовое фрезерование чугунов (серого и с шаровидным графитом) с высокой скоростью. Применяется для чернового фрезерования
<i>NTK</i>			
1	HW3	K05–K20	Точение и растачивание серого чугуна
3	SX9	K10–K30; S10–S20	Прерывистое точение серого чугуна в тяжелых условиях. Точение жаропрочных сплавов
3	SX2	K10–K30; S10; H10	Черновое фрезерование серого чугуна. Фрезерование жаропрочных сплавов. Обработка закаленных материалов (до 65 HRC)
6	WA1	K05–K20; S01–S10; P01–P05	Черновое и чистовое точение и фрезерование серого чугуна. Точение жаропрочных сплавов. Высокоскоростное точение стали. Точение отбеленного чугуна
7	HC5	K10; H10	Точение и растачивание серого чугуна. Точение закаленных сталей (до 65 HRC)
8	HC6	K20	Высокоскоростное точение серого чугуна с СОТС. Получистовое и чистовое точение ковкого чугуна

Традиционно керамика применялась для обработки чугунов и обработки закаленных сталей в благоприятных условиях. Современная керамика позволя-

ет обрабатывать твердые материалы в неблагоприятных условиях (например, при черновом прерывистом резании), существенно повысить эффективность обработки современных труднообрабатываемых чугунов, а также вывести на новый уровень производительности обработку жаропрочных сплавов.

*Оксидно-карбидная (смешанная, или «черная») керамика* на основе  $Al_2O_3$  с добавками предназначена для чистой, полужесткой и прерывистой обработки ковких, высокопрочных, отбеленных, модифицированных чугунов, сталей, закаленных до 30–55 HRC и 56–65 HRC; кроме того, оксидно-нитридная керамика ОНТ-20 (кортинит) рекомендуется для обработки сплавов на основе меди.

Керамические режущие пластины на основе  $Al_2O_3-TiC$  (тип 1) очень устойчивы к воздействию высоких температур. Уменьшенная пластическая деформация обеспечивает широкий диапазон использования, в том числе для чистой обработки закаленных материалов. Сфера применения: точение и растачивание серого чугуна; точение жаропрочных сплавов и твердых материалов (с твердостью ниже 65 HRC).

*Оксидная (белая) керамика* (тип 2) предпочтительнее при точении заготовок из ферритных ковких чугунов и незакаленных конструкционных сталей при скоростях резания свыше 250 м/мин (сверхтвердые материалы в этом случае не работоспособны).

Керамические режущие пластины, состоящие в основном из оксида алюминия с высокой степенью чистоты, обладают очень плотной мелкозернистой структурой и имеют высокий уровень износо- и трещиностойкости. Сфера применения: точение и растачивание серого чугуна; точение фасок на трубах. С целью совершенствования керамики применяют ее объемное легирование оксидами иттрия, магния и циркония, нитридом титана и др. Роль последних заключается в образовании жидких фаз, интенсифицирующих уплотнение материала и препятствующих росту зерна при высокотемпературном спекании. Например, при изготовлении оксидной керамики на основе  $Al_2O_3$  добавление  $ZrO_2$  в количестве 16 % позволяет повысить прочность на изгиб в среднем на 8 %.

*Нитридная керамика на основе  $Si_3N_4$  (силинит)* предназначена для обработки чугунов и отожженных конструкционных и инструментальных сталей. Она уступает в скорости резания оксидной керамике на основе  $Al_2O_3$  при обработке деформируемых сплавов на основе алюминия и закаленной стали. При обработке серого чугуна силинит (тип 3) уступает нитриду бора. Керамические режущие пластины, состоящие в основном из нитрида кремния  $Si_3N_4$ , обладают великолепной ударной вязкостью и износостойкостью и демонстрируют стабильность во время черновой обточки и фрезерования чугуна при использова-

нии СОТС. Проявляют при черновом точении высокую надежность. Сфера применения: черновое точение и фрезерование серого чугуна; черновое точение и фрезерование жаростойких сплавов.

Для снижения хрупкости и повышения вязкости, теплопроводности и стойкости к тепловому удару распространение получило армирование оксида алюминия  $Al_2O_3$  высокой степени чистоты нитевидными частицами материала с высоким модулем упругости, например, SiC, имеющими прочность до  $4\ 000\ Н/мм^2$  (до 30–40 % по массе). Коэффициент теплового расширения  $Al_2O_3$  (8,2–8,9 мкм/м·К) выше, чем SiC (4,4–4,7 мкм/м·К). Из-за этой разницы после горячего прессования происходит эффект зажима волокон SiC в матрице  $Al_2O_3$ , и создаются остаточные сжимающие напряжения. Трещиностойкость оксидной керамики  $Al_2O_3$  после армирования SiC может увеличиться в 1,5 раза.

Степень повышения прочности и твердости *армированной (вискерованной)* режущей керамики (тип 6) определяется большим числом факторов. Наибольшее влияние оказывают объемная доля, размеры (отношение длины к диаметру) и свойства нитевидных частиц. Поэтому получение заданных свойств на границе раздела  $Al_2O_3$ –SiC в условиях невысокой стабильности свойств нитевидных частиц при температурах спекания затруднительно. Сфера применения армированной керамики: черновая и чистовая обточка и фрезерование серого чугуна; токарная обработка жаростойких сплавов; высокоскоростное точение стали; токарная обработка отбеленного чугуна.

Необходимо отметить, что стоимость инструмента, оснащенного СРП из армированной керамики, на 30 % выше по сравнению с керамическим инструментом типов 1, 2 и 3. Поэтому ее применение экономически выгодно только в определенных областях, например, при обработке жаропрочных никелевых сплавов. Так, при чистовой обработке детали из инконеля 718 с применением армированной керамики машинное время сократилось с 45 до 14 ч. Скорость резания составила 1 300 м/мин (при подаче 0,1 мм/зуб), что примерно в 100 раз выше скорости, используемой ранее для обработки этого материала.

Керамика «Сиалон» (Si–Al–O–N) (тип 5) несколько уступает по прочности армированной керамике, поэтому применяется в основном для предварительно обработанных заготовок. Но благодаря тому, что «Сиалон» отличается более высокой термостойкостью и химической инертностью, пластины из него характеризуются равномерным и прогнозируемым износом без проточин и выкрашиваний. Это позволяет увеличить глубину резания и уровень подач по сравнению с армированной керамикой.

Марка СС6065 из керамики «Сиалон» компании Sandvik Coromant впервые предложена для таких переходов операций фрезерования, требующих прочности режущей кромки, как прямое врезание в контур. Пластины из СС6065 могут быть экономичной заменой режущих пластин из армированной керамики. Эту марку режущей керамики следует предпочесть в том случае, когда имеет место износ, связанный с разрушением режущих кромок, вызванный неравномерностью припуска или изменениями направления обработки при изготовлении деталей сложной формы.

СС6060 — новая марка керамики «Сиалон» компании Sandvik Coromant, обладает высокой стойкостью к образованию износа в виде проточки. Она должна применяться в благоприятных условиях работы, когда фреза и заготовка достаточно жесткие. Износостойкость этой марки керамики обеспечивает удаление больших объемов материала с открытых поверхностей предварительно обработанных заготовок. Керамика СС6060 увеличивает производительность за счет больших глубин резания и увеличенных подач. Однако при врезании в карманы и углубления желательнее использовать оптимизированные траектории.

При фрезеровании жаропрочных сплавов целесообразно использовать СРП круглой формы из вышеназванных марок керамики. В этом случае удастся достичь скоростей резания 800–1 000 м/мин при подачах 0,07–0,12 мм/зуб. Зачастую это равносильно увеличению удельного съема металла в 100 раз по сравнению с твердосплавными фрезами. Обработка ведется без СОТС, поэтому ограничением в использовании высокоскоростного фрезерования является опасность перегрева тонких стенок изделия или прижога обрабатываемой поверхности. Для промежуточных стадий обработки, где удаляется наибольшая часть припуска, керамика «Сиалон» в настоящее время самая производительная.

Важным направлением в области создания современной режущей керамики является создание градиентных структур. *Градиентная керамика* представляет собой многослойную режущую пластину, состоящую, например, из чередующихся слоев керамики на основе  $Al_2O_3$  или  $Si_3N_4$  и слоев твердого сплава. Толщина каждого слоя (их количество обычно варьируется от двух до семи) составляет 0,1–3 мм. Такой инструментальный материал обладает всеми достоинствами режущей керамики, но при этом имеет более высокие прочностные характеристики и теплопроводность. На рис. 4.8 представлены 7 вариантов градиентных структур режущей керамики [15].

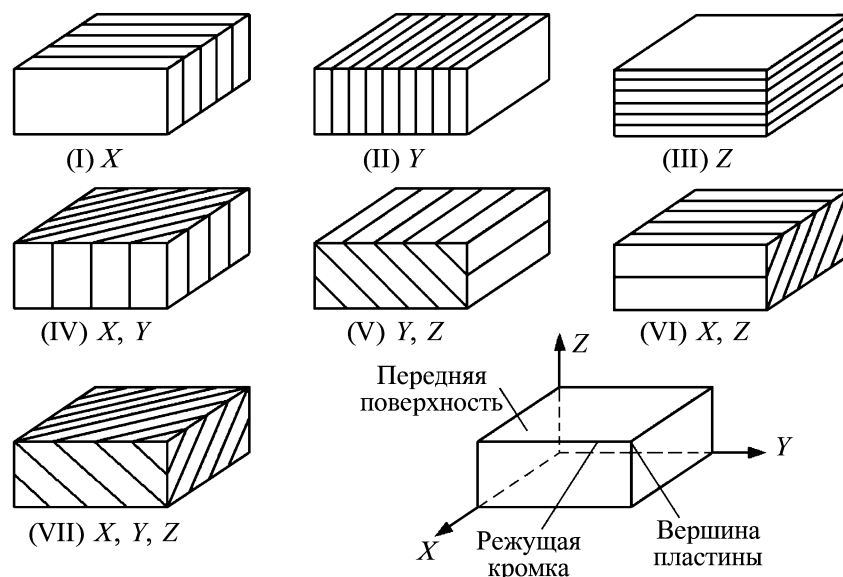


Рис. 4.8. Варианты формирования СРП из керамики с градиентной структурой

Фирма CeramTec, помимо традиционных марок смешанной керамика (обозначение — SH), оксидной керамики (SN) и нитридной керамики на основе кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , разработало керамику Si–Al–O–N с градиентной структурой типа (VI) XZ, которая используется в качестве трещиноустойчивой подложки для последующего многослойного износостойкого покрытия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . В результате получена гамма высокоэффективной режущей керамики. Для повышения надежности крепления СРП на них отпрессованы углубления.

Для обеспечения максимальной производительности и минимального времени токарной чистовой и получистовой обработки серого чугуна разработан режущий материал марки SL606 с высокой стабильностью и износостойкостью режущих кромок и великолепной ударной вязкостью. Обеспечивается достижение длительного ресурса стойкости инструмента на самых высоких скоростях резания. Для чернового точения заготовок из серого чугуна и чугуна с шаровидным графитом разработана марка SL608 из режущей керамики на основе  $\alpha$ -/ $\beta$ -SiAlON с градиентными характеристиками, которая особенно подходит для сложных условий обработки, значительных перепадов в глубине резания и прерывистого резания.

Режущая керамика марки SL658C обеспечивает максимальную экономическую эффективность и производительность при черновом точении заготовок из чугуна с шаровидным графитом в серийном производстве.

Для высококачественного чистового фрезерования крупных заготовок из серого чугуна и чугуна с шаровидным графитом разработана марка SL858C из режущего материала на основе SiAlON с многослойным покрытием, обеспечивающим высокую износостойкость при максимальной ударной вязкости.

Эффект снижения образования трещин дает горячее изостатическое прессование (ГИП) высокоплотной режущей керамики. ГИП позволяет получать СРП практически любой формы с однородной и мелкозернистой структурой, с высокой (почти 100 %) плотностью и с минимальными припусками на окончательное шлифование. Хотя стоимость пластин, изготовленных методом ГИП в 1,3 раза выше, чем стоимость пластин, спеченных обычным способом, СРП, полученные ГИП, эффективны в массовом производстве. Отказы режущих пластин из нитридной керамики, полученной методом ГИП, в основном происходят вследствие изнашивания без сколов и выкрашиваний. Это позволяет практически точно прогнозировать период работы инструмента до достижения отказа по установленному критерию износа, что крайне важно в условиях автоматизированного производства.

*Керамические режущие СРП*, полученные методом ГИП из смеси на основе карбида титана TiC (тип 8), обеспечивают высокий уровень надежности при обработке ковкого чугуна на скорости резания более 400 м/мин. Сфера применения: получистовое и чистовое точение ковкого чугуна, а также высокоскоростное точение серого чугуна с использованием СОТС.

Производственный опыт применения режущей керамики в автомобилестроении включает в себя в основном операции чистового точения чугунных деталей, имеющих большие площади обрабатываемой поверхности (гильзы цилиндров, тормозные барабаны, маховики и др.), что позволяет значительно повысить производительность и уменьшить число станков-дублеров.

Высокие скорости резания и пониженная прочность инструментов из режущей керамики по сравнению с твердыми сплавами требуют применения быстроходных, мощных, жестких и виброустойчивых станков. Повышенные требования предъявляются также к технологической оснастке: зажимным патронам, вспомогательным инструментам, а также к отводу стружки и ограждению рабочей зоны станка.

Обработка инструментами, оснащенными режущей керамикой, осуществляется без СОЖ для уменьшения опасности «тепловых ударов», отрицательно сказывающихся на надежности работы этих инструментов. При необходимости применения СОЖ (для смыва стружки, охлаждения детали) следует обеспечивать непрерывный обильный полив режущих кромок. Более благоприятно применение СОЖ при работе керамикой оксидно-карбидной группы.

Допускаемый износ по задней поверхности режущих керамических пластин для проходных и расточных резцов составляет: при обработке сталей — 0,2–0,3 мм, чугунов — 0,3–0,5 мм.

Обычно инструментальную керамику выпускают в виде спеченных пластин различной формы, которые механически крепятся к корпусам инструментов.

В отличие от твердых сплавов керамика не содержит металла-связки. В ее состав входят только твердые компоненты — оксиды, карбиды, нитриды. Поэтому степень разупрочнения керамики при нагреве сильно снижается, и она имеет весьма высокие значения теплостойкости (до 1 400 °С) и твердости (до 96 HRA). Это позволяет осуществлять обработку керамическими инструментами на скоростях резания, которые до 2,5 раз превышают скорости резания твердосплавными инструментами. В то же время отсутствие связующей фазы в структуре керамики определяет ее низкую трещиностойкость и прочность. Например, низкая трещиностойкость керамики является причиной формирования фронта трещин, которые из-за отсутствия пластичной связующей фазы не встречают барьеров, способных затормозить или остановить их развитие.

Указанные особенности керамики определяют область ее предпочтительного применения. В настоящее время керамические инструменты в основном применяют для чистовой и получистовой обработки серых, ковких, высокопрочных и отбеленных чугунов, низко- и высоколегированных сталей, в том числе закаленных, цветных металлов и полимерных материалов (K01–K05; P01–P10). В этих условиях инструменты, оснащенные пластинами из керамики, существенно превосходят по работоспособности твердосплавные инструменты.

Применение керамики при обработке с повышенными сечениями среза или при прерывистом резании резко снижает ее эффективность вследствие высокой вероятности (более 50 %) внезапного отказа из-за хрупкого разрушения в виде выкрашиваний и сколов. Поэтому в последнее время в РФ и ряде зарубежных стран ведутся активные работы по созданию новых или усовершенствованию известных марок керамики с целью повышения их прочностных характеристик. К таким разработкам относится керамика, армированная «нитевидными кристаллами» SiC или легированная TiB<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и другими компонентами. Кроме того, наряду с совершенствованием составов керамики, для повышения ее эксплуатационных характеристик в промышленности используют более современные технологии получения керамических пластин — горячее изостатическое прессование, золь-гель синтез и др., а также различные способы нанесения износостойких покрытий.

Износ инструмента из режущей керамики происходит в основном по задним поверхностям.

На рис. 4.9 представлены фотографии характерных случаев развития очагов износа при обработке инструментом, оснащенным пластинами из керамики раз-



личных марок при продольном точении алюминиевого сплава с  $v = 250$  м/мин,  $S_0 = 0,3$  мм/об и  $t = 1,5$  мм.

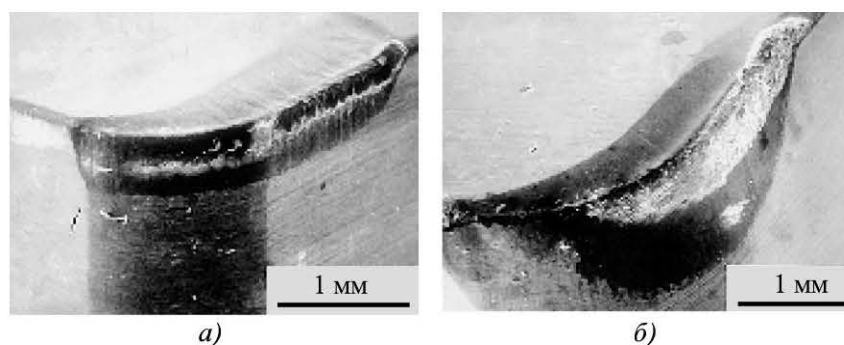


Рис. 4.9. Расположение очагов износа при обработке алюминиевого сплава инструментом, оснащенным пластинами из керамики:

*а* — на основе  $Al_2O_3$ , легированной  $ZrO_2$ ;

*б* — на основе  $Al_2O_3$ , армированной «нитевидными кристаллами» SiC

Согласно современным представлениям хрупкое разрушение инструмента из режущей керамики является результатом постепенного накопления и развития микротрещин под действием приложенной к инструменту нагрузки. С течением времени микротрещина в зонах инструментального материала, благоприятных для ее развития, перерастает в макротрещину, по которой и происходит хрупкое разрушение.

Принято различать скалывание (поломку) и выкрашивание режущей части инструмента. Эти разновидности хрупкого разрушения различаются как по объему разрушенной части, так и по причинам, их вызывающим. Если выкрашивание является процессом закономерным, то скалывание необходимо в основном рассматривать как следствие ошибок, допущенных при проектировании, изготовлении или эксплуатации инструмента.

Наиболее часто встречающимися на практике **причинами скалывания** являются:

- превышение допустимых значений подачи  $S$  или толщины среза  $a$  при эксплуатации инструмента;
- значительное превышение допустимых величин износа или выкрашивания рабочей части инструмента, что вызывает сильный рост сил резания и напряжений;
- наличие технологических дефектов в инструменте, образующихся из-за нарушений, допущенных на различных этапах его изготовления.

На рис. 4.10 представлены характерные примеры скалывания режущих пластин из керамики при фрезеровании чугуна.



Рис. 4.10. Случаи скалывания режущих пластин из нитридной керамики на основе  $\text{Si}_3\text{N}_4$  при фрезеровании чугуна:  
*a* — скол передней поверхности; *б* — скол вершины

В табл. 4.17 представлены физико-механические характеристики и области применения основных марок отечественной керамики, а в табл. 4.18 — их сопоставление с марками керамики, выпускаемыми зарубежными производителями.

Таблица 4.17

**Марки и физико-механические характеристики режущей керамики отечественного производства**

Тип	Марка	Основа	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Твердость, HRA	Предел прочности $\sigma_{\text{изг}}$ , Н/мм <sup>2</sup>	Область применения	Группа применения
1	ВО-100 (В1)	$\text{Al}_2\text{O}_3$	4,16	92	600	Высокоскоростное точение чугунов и сталей в состоянии поставки без применения СОЖ Р10–Р20	Р10–Р20
1	ВОК-200 (В2)	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$	4,20–4,30	93	650	Чистовая и получистовая обработка резанием углеродистых и легированных сталей, серых и ковких чугунов	Р05; К10
1	ВОКС-300 (В3)	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$	4,25	93	950	Чистовое и получистовое точение углеродистых, легированных, закаленных сталей и чугунов; точение с ударами, возникающими от абразивных включений; получистовое и чистовое точение с неравномерными припусками; нарезание резьб и канавок в закаленных сталях	Р10; К10–К20
3	ТВИН-200 (Т2)	$\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{оксиды}$	3,45	93,5	750	Получистовое и чистовое точение и фрезерование, в том числе с применением СОЖ. Обработка всех видов чугунов с большими подачами и скоростями резания, а также обработка сплавов на основе никеля и кобальта	К10–К20; Н10

Тип	Марка	Основа	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Твердость, HRA	Предел прочности σ <sub>изг</sub> , Н/мм <sup>2</sup>	Область применения	Группа применения
6	ТВИН-400 (Т4)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + SiC	3,70–3,80	94	850	Обработка никелевых сплавов, закаленных высоколегированных и быстрорежущих сталей и чугунов твердостью более 250 НВ, с высокими скоростями и большими подачами; черновое, получистовое и чистовое точение и фрезерование, в том числе с применением СОЖ	Н10

Таблица 4.18

### Сопоставление марок режущей керамики

Группы резания и применения		Россия	Sandvik Coromant (Швеция)	CeramTec (Германия)	Kennametal (США)	Widia (Германия)
Р	P05	ВОК-200	–	–	AC5 KY4440	Widalox G
	P10	ВОКС-300 ВО-100	–	–	KY1615	Widalox G
	P20	ВО-100	–	–	–	–
М	M10	–	CC650 CC670	–	KY4300	–
	M20	–	CC670	–	–	–
К	K01	–	CC620 CC650	–	KY4400	–
	K10	ВОКС-300 ВОК-200	CC680 CC6090	SH2 SN60	KY4300 KY3400	Widianit N200
	K20	ВОКС-300	–	SL500	KY3500	Widianit N200
	K30	–	–	SL200	–	–
Н	H10	ТВИН-400	CC680	SH2; SH3	KY2100	Widalox H Widalox R
	H20	–	–	–	–	Widalox R

Ранее керамика применялась для обработки чугунов и обработки закаленных сталей в благоприятных условиях. Современная керамика позволяет обрабатывать твердые материалы в неблагоприятных условиях (например, при прерывистом резании), существенно повысить эффективность обработки чугуна и, кроме того, вывести на новый уровень производительности обработку никелевых сплавов в авиационной промышленности. Деталь из инконеля 718 обрабатывали с применением вискеризованной («армированной») керамики.

В результате время обработки сократилось с 45 до 14 ч. Скорость резания составляла 1 300 м/мин, что примерно в 100 раз выше принятой для обработки подобных материалов скорости, подача — 0,1 мм/зуб. Подобный прорыв возможен благодаря оптимизации режущей керамики.

Для инструмента из режущей керамики, которая характеризуется достаточно высокой твердостью и является пассивной по отношению к большинству обрабатываемых материалов, нанесение покрытий способствует повышению ее сопротивления хрупкому разрушению. В основном это достигается за счет следующих эффектов. Во-первых, нанесение покрытий может обеспечить «эффект залечивания» дефектов (микротрещин, пор и т.д.), формируемых в поверхностном слое керамических пластин на различных этапах их производства (главным образом, при абразивной обработке). Во-вторых, при нанесении на керамику многослойного покрытия, которое состоит из чередующихся слоев переменной толщины, химического и фазового состава и, как следствие, твердости, создается градиент релаксирующих напряжений, препятствующих образованию и распространению трещин в покрытии.

Указанная концепция формирования покрытий базируется на известных данных физики разрушения материалов, из которых следует, что слоистые композиции с чередующимися слоями переменной твердости наиболее эффективно тормозят развитие трещин. В случае, когда трещина пересекает границу слоев при продвижении из твердого слоя в более мягкий, наблюдается ее торможение. Кроме того, чем больше границ встречается на пути распространения трещины, тем эффективнее торможение или даже остановка развития. В результате этого уменьшается доля отказов керамики из-за хрупкого разрушения, увеличивается время ее наработки до отказа.

На рис. 4.11 представлены экспериментально полученные зависимости износа керамических инструментов с двухслойными покрытиями.

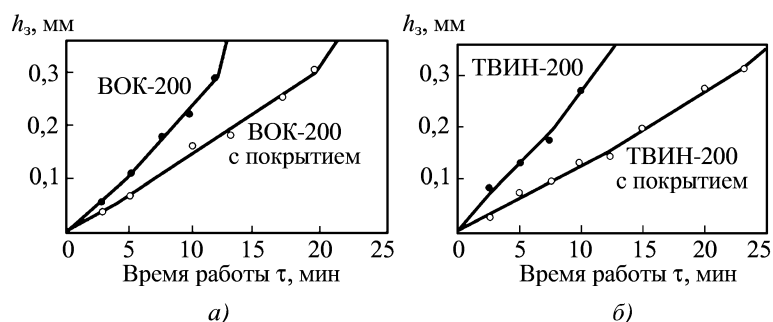


Рис. 4.11. Зависимость износа по задней поверхности  $h_3$  от времени работы оксидно-карбидной керамики при точении (а) и нитридной керамики при фрезеровании (б) закаленной стали ШХ15: режимы обработки: точение —  $v = 250$  м/мин;  $S_0 = 0,2$  мм/об;  $t = 1$  мм; фрезерование —  $v = 250$  м/мин;  $D = 200$  мм;  $z = 10$ ;  $S_z = 0,2$  мм/зуб;  $B = 60$  мм;  $t = 1$  мм

Ti-(Ti, Al)N от времени их работы. На рис. 4.11, *а* приводятся данные об интенсивности изнашивания оксидно-карбидной керамики ВОК-200 при точении заготовок из стали ШХ15, а на рис. 4.11, *б* — об интенсивности изнашивания нитридной керамики ТВИН-200 при торцовом фрезеровании заготовок из стали ШХ15.

Керамический инструмент с покрытием может использоваться в качестве альтернативы абразивной обработке деталей, изготовленных из закаленных конструкционных сталей. Основными преимуществами использования керамики в этом случае являются отсутствие дефектов в поверхностном слое обработанных деталей, образующихся после абразивной обработки — прижогов, трещин, растягивающих напряжений, шаржирования абразивом. Кроме того, использование керамики обеспечивает возможность обработки без смазочно-охлаждающих жидкостей, что позволяет реализовать экологически чистые технологии механической обработки.

На рис. 4.12 представлены результаты исследований шероховатости поверхности обработанной детали из закаленной стали, полученной после точения керамикой с покрытием.

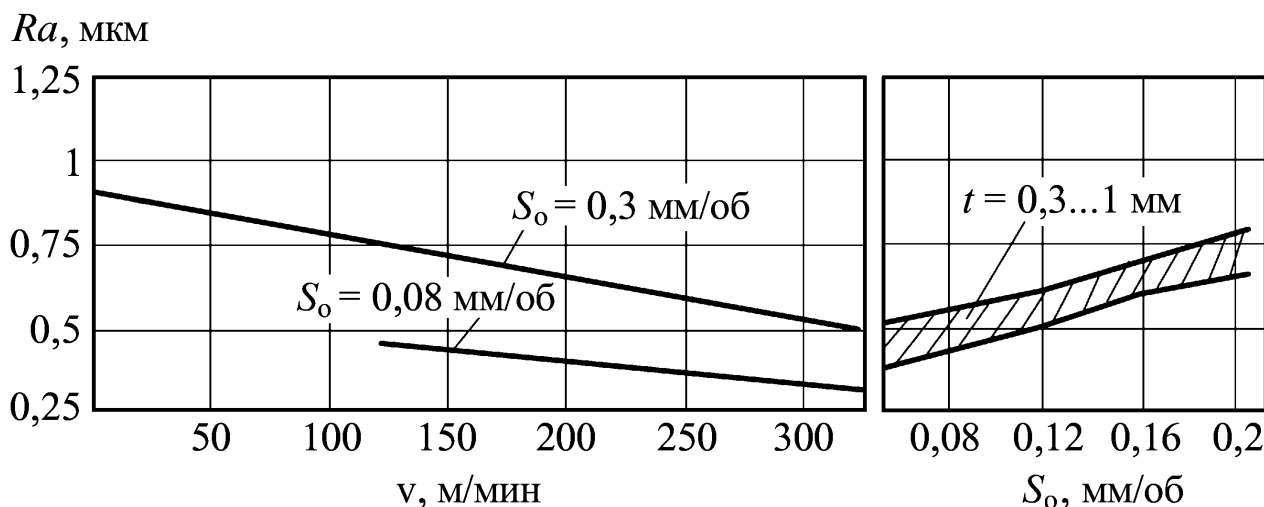


Рис. 4.12. Влияние скорости резания (при  $t = 1$  мм) и подачи (при  $v = 200$  м/мин) на шероховатость поверхности детали из закаленной стали ШХ15, обработанной оксидно-карбидной керамикой ВОК-200 с покрытием

Достигаемый в результате точения пластинами из керамики параметр  $Ra$  соизмерим с тем, который достигается шлифованием. При этом с увеличением глубины резания от 0,3 до 1 мм шероховатость поверхности ухудшается незначительно, а с увеличением подачи шероховатость возрастает более заметно.

## 4.5. Сверхтвердые материалы

Поликристаллические сверхтвердые материалы (СТМ), используемые в качестве инструментальных для лезвийного инструмента, являются плотными модификациями углерода и нитрида бора (BN). Углерод и нитрид бора могут существовать в виде нескольких полиморфных модификаций, отличающихся друг от друга строением кристаллической решетки. Основными кристаллическими формами углерода являются графит и алмаз, аналогами этих форм у нитрида бора выступают графитоподобный нитрид бора и его плотные модификации: кубический (сBN) и вюрцитный (wBN) нитрид бора. Синтезируются они при высоких давлениях и температурах в области термодинамической стабильности этих фаз.

Поликристаллы сBN бора и алмаза, используемые в качестве режущего инструмента, изготавливаются в *две стадии*:

- синтез зерен алмаза и кубического нитрида бора;
- спекание зерен для получения крупного поликристалла.

В результате синтеза при высоких давлениях и температурах получают кристаллы алмаза и BN плотных модификаций, вкрапленные в реакционную смесь, которые затем очищаются от непрореагировавшего графита или графитоподобного BN. В зависимости от применяемых катализаторов-растворителей, исходного сырья, параметров синтеза (давление, температура, время синтеза и др.) получается широкая гамма порошков алмаза и кубического BN с самыми различными физико-механическими свойствами.

Рассортированные по зернистости порошки алмаза и сBN используются для получения поликристалла. Спекание порошков алмаза и BN производится в области их термодинамической стабильности в соответствии с их фазовой диаграммой. В результате спекания образуется изотропная поликристаллическая структура.

Для синтеза алмаза и сBN и спекания порошков в промышленных условиях используются камеры высокого давления «поршень-цилиндр» и «наковальня с лункой». Давление синтеза — 50–70 кбар, температура — 1 200–2 000 °С.

Поликристаллы сверхтвердых материалов на основе синтетического алмаза (ПКА) и кубического нитрида бора (ПКНБ) изготавливаются цельными и двухслойными в виде цилиндров диаметром до 101,6 мм. Наиболее часто используются поликристаллы диаметрами около 13,26 и 32 мм. Спекание двухслойных пластин осуществляется на подложке из твердых сплавов на основе карбида вольфрама.

Две подгруппы СТМ (ПКА и ПКНБ) практически имеют несвязанные друг с другом области применения, определяемые их физико-механическими свойствами и химическим составом. Твердость ПКА выше, чем твердость ПКНБ, а теплостойкость в 1,5–2 раза ниже. ПКНБ практически инертен к черным металлам, а ПКА проявляет по отношению к ним значительную активность при высоких контактных температурах и давлениях, имеющих место в зоне резания. Поэтому режущие инструменты из ПКНБ применяют главным образом для обработки чугунов и сталей, а из ПКА — для обработки цветных металлов и сплавов, неметаллических материалов. Керамика на основе оксида алюминия наиболее эффективна при точении с повышенной скоростью нетермообработанных конструкционных сталей и серых чугунов, оксидно-карбидная керамика — при обработке закаленных сталей, отбеленных высокопрочных чугунов, а керамика на основе нитрида кремния эффективна при обработке жаропрочных сплавов на никелевой основе и чугуна.

Физико-механические свойства СТМ, керамики и (для сравнения) твердых сплавов приведены в табл. 4.19.

Таблица 4.19

### Сравнение характеристик СТМ, режущей керамики и твердых сплавов

Режущий материал	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	HRA, ГПа	HV, ГПа	$\sigma_{сж}$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{из}$ , Н/мм <sup>2</sup>	Теплостойкость, °С	$E$ , ГПа
Твердые сплавы	10–15	87–92	17–24	3 000–5 500	1 000–1 700	800–1 000	450–650
Режущая керамика	3,8–4,5	91–95	17–30	25 000–5 000	300–1 000	1 100–1 600	350–400
ПКНБ	3,3–4,2	–	40–50	3 000–6 000	600–800	1 100–1 500	700–850
ПКА	3,2–4,0	–	80–110	2 000–3 500	800–1 100	700–800	800–900

*Условные обозначения:*  $\rho$  — плотность; HRA — твердость по Роквеллу; HV — твердость по Виккерсу;  $\sigma_{сж}$  — предел прочности при сжатии;  $\sigma_{из}$  — предел прочности при изгибе;  $E$  — модуль Юнга.

Уникальная твердость СТМ при относительно высоких прочностных характеристиках, а также значительное повышение теплостойкости у ПКНБ и керамики позволяют при резании этими материалами резко повысить скорость резания — основную характеристику эффективности процесса металлообработки (табл. 4.20).

**Сопоставление скоростей резания, м/мин,  
различными режущими материалами**

Обрабатываемый материал	ПКА	ПКНБ	Режущая керамика	Твердые сплавы
<i>Точение</i>				
Сталь:				
150–250 НВ	–	100–200	200–600	150–400
25–45 HRC	–	100–200	120–250	80–200
45–55 HRC	–	80–180	60–120	30–60
55–70 HRC	–	60–150	40–80	10–20
Чугун:				
120–240 НВ	–	500–1 000	200–600	130–300
240–400 НВ	–	200–600	100–200	40–100
400–600 НВ	–	50–120	30–80	10–30
Алюминиевые сплавы:				
Si < 12 %	1 000–5 000	–	–	300–2 000
Si > 12 %	600–300	–	–	300–1 600
Сплавы на основе меди	500–4 000	–	–	150–600
<i>Фрезерование</i>				
Сталь:				
150–250 НВ	–	400–900	200–400	150–400
25–45 HRC	–	300–600	150–300	100–200
45–55 HRC	–	200–400	100–200	40–80
55–70 HRC	–	80–20	–	–
Чугун:				
120–240 НВ	–	800–3 000	300–600	100–300
240–400 НВ	–	500–1 000	150–300	50–150
400–600 НВ	–	200–500	50–100	10–30
Алюминиевые сплавы:				
Si < 12 %	1 000–4 000	–	–	200–800
Si > 12 %	600–3 000	–	–	150–300
Сплавы на основе меди	500–4 000	–	–	200–400

Резцы из ПКНБ эффективнее твердых сплавов при чистовом точении закаленных сталей с твердостью более 45 HRC и чугунов любой твердости. При сопоставлении ПКНБ с керамикой определяющим является характер затупления режущей кромки резца. Керамика позволяет точить «сырые» конструкционные стали со скоростью  $v = 600$  м/мин, а композиты — со скоростью не выше 200 м/мин. Скорость точения высокотвердых чугунов и сталей резцами из ПКНБ выше, чем скорость точения этих материалов резцами из керамики.

При сопоставлении скоростей фрезерования фрезами, оснащенными композитом и твердым сплавом (см. табл. 4.20), особенно очевидно преимущество



ПКНБ перед твердыми сплавами. Фрезерование чугунов и сталей инструментом из ПКНБ принципиально отличается от обработки твердосплавными фрезами: при обработке инструментами, оснащенными ПКНБ, скорость резания закаленных сталей выше в 5 раз, а чугунов — в 10–20 раз (в зависимости от твердости). Фрезы с пластинами из керамики по скорости резания уступают фрезам с ПКНБ примерно в 2 раза при обработке стали и в 3–5 раз при обработке чугуна. Стали, закаленные до твердости более 55 HRC, практически не фрезеруются керамикой и твердым сплавом (в отличие от точения).

Точение «сырых» сталей резцами из ПКНБ осуществляется на скоростях 100–200 м/мин, что экономически невыгодно по сравнению с точением твердосплавными резцами. Фрезерование же производится на скоростях 400–900 м/мин (в 2–3 раза выше, чем при фрезеровании твердосплавным инструментом), в результате чего достигается высокое качество обработки и возможно получение экономического эффекта. Скорости резания при фрезеровании закаленных сталей и чугунов инструментом из композита в 3–4 раза выше, чем при точении.

Инструменты из ПКНБ можно применять для обработки цветных сплавов, хотя и с меньшей эффективностью, чем алмазные. Поэтому в тех случаях, когда необходимо за один рабочий ход обработать комбинированные заготовки, состоящие из разных материалов (черных и цветных), предпочтительнее инструмент из ПКНБ. Исключением является точение заготовок из алюминиево-кремниевых сплавов со вставками из специальных чугунов (детали типа «поршень») — здесь эффективнее алмазные резцы (точение участка из чугуна выполняется с меньшей скоростью, чем при точении участка из алюминиево-кремниевого сплава).

Отличие режущих инструментов из ПКА от инструментов из ПКНБ в том, что первые успешно применяют с теми же режимами резания, на которых работают твердосплавные инструменты (эффективность достигается благодаря повышению стойкости инструмента в десятки и сотни раз), а вторые эффективны только при резком повышении скорости резания.

На высокоскоростном оборудовании инструменты из ПКА позволяют значительно повысить (относительно твердосплавных) скорость резания цветных металлов. Так, при точении алмазным инструментом скорость резания в 3–6 раз выше, чем при обработке твердосплавным инструментом.

Несмотря на то что дорогой инструмент из СТМ увеличивает первоначальные затраты, за счет роста производительности обработки (количества деталей в единицу времени) резко снижаются амортизационные затраты на обо-

рудование. При использовании современного дорогостоящего оборудования снижение этих затрат существенно уменьшает себестоимость обработки.

По твердости ПКНБ несколько уступает алмазу (см. табл. 4.19), но имеет более высокую теплостойкость, достигающую до 1 500 °С, и практически инертен по отношению к углероду и железу. Как и алмаз, ПКНБ имеет повышенную хрупкость и низкую прочность на изгиб. Инструменты, оснащенные режущими вставками из ПКНБ, применяют главным образом для обработки металлов, содержащих углерод и железо.

Практика показывает, что во многих случаях точение инструментами из СТМ намного эффективнее процесса шлифования, так как такие инструменты обеспечивают бесприжоговую обработку при работе на высоких скоростях резания и низкую шероховатость обработанной поверхности.

В табл. 4.21 представлены сведения о физико-механических свойствах отечественных марок ПКНБ, в табл. 4.22 — сопоставление марок ведущих мировых производителей ПКНБ. Как видно из представленных данных, некоторые современные марки ПКНБ можно использовать при обработке с ударно-циклическими нагрузками и переменным сечением среза.

В табл. 4.23 приведено сопоставление марок ПКА ведущих мировых производителей.

В целом можно отметить, что основная область эффективного применения лезвийных инструментов из СТМ — автоматизированное производство на базе станков с ЧПУ, многоцелевых станков, автоматических линий и специальных высокоскоростных станков. При этом выбор конкретной скорости резания определяется величиной снимаемого припуска, возможностями оборудования, наличием ударных нагрузок в процессе резания и многими другими факторами.

Таблица 4.21

### Физико-механические свойства отечественных марок ПКНБ

Материал	HV, ГПа	Предел прочности $\sigma_{изг}$ , Н/мм <sup>2</sup>	Коэффициент трещиностойкости $K_{Ic}$ , МПа·м <sup>1/2</sup>	Модуль упругости $E$ , ГПа	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>
<i>На основе КНБ</i>					
Композит 01 (эльбор-Р)	35–37	–	3,9–4,2	840	3,4
Композит КПЗ	–	60	–	720	4,5
Композит 05ИТ	19	470	4,6–6,7	620	4,3
Композит 10 (Гексанит-Р)	30–35	1 000–1 200	3,8–4,9	715	3,8

Таблица 4.22

## Сопоставление марок ПКНБ

Группы резания и применения	Завод «Композит» (Россия)	Mitsubishi Carbide (Япония)	Sandvik Coromant (Швеция)	General Electric (США)	De Beers (Нидерланды)	Sumitomo Electric (Япония)	Toshiba Tungaloy (Япония)	Kyosera (Япония)	Dijet (Япония)	Korloy (Южная Корея)	Kennametal (США)	CeramTec (Германия)	Seco Tools (Швеция)	Becker (Германия)	
Н	H01	Композит 01 (эльбор Р-К01)	MBC010 MB810	CB20	BZN8100	–	BNX10 BNC150	BX310	–	–	–	–	–	CBN100	–
	H10	Композит 10 Композит 05ИТ	MBC020 MB8025	CB7020	HTC2000 BZN8100	AMB90 DBC50	BN250 BNX20	BX360 BX340	KBN10B	JBN330 JBN300	KB320	KD060	WBN650	–	–
	H20	–	MBC020 MB8025	CB7050	BZN8200	DBN45	BN25 BNC200	BX270	KBN25B	JBN245	KB330	KB5625 KD081	WBN600	–	PBC-20
	H30	–	MB8025 MB833	–	–	–	BN300	BX290 BX380	–	–	–	–	–	–	PBC-30 PBC-40
S	S01	–	MB730	–	BZN6000	–	BN600 BN700	BX950	–	–	KB360	–	–	–	PBC-6
	S10	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	KD230	–	–	–
К	K01	Композит 01	MB710	–	–	DBC50	BN500	BX930	–	–	KB360	–	–	–	SBC-1
	K10	Композит 10	MB710 MB730	CB7050	BZN6000	DBC80	BN600 BN700	BX950	KBN10B KBN65B	JBN795	KB350	KD120	–	CBN300	PBC-10 PBC-15 SBC-10
	K20	Композит 05ИТ	MB910	–	–	–	BN600 BN700	–	KBN900	JBN330	–	KB9640	WBN500	CBN100P	PBC-25 SBC-25
	K30	Композит КПЗ (К03)	–	–	–	–	BNC800	–	–	–	–	–	–	CBN300P	–

Таблица 4.23

## Сопоставление марок ПКА

Группы резания и применения	Sumitomo Electric (Япония)	Mitsubishi Carbide (Япония)	Toshiba Tungaloy (Япония)	Кюосера (Япония)	Dijet (Япония)	Korloy (Южная Корея)	Seco Tools (Швеция)	Iscar (Израиль)	Sandvik Coromant (Швеция)	Kennametal (США)	
N	N01	DA90	MD205	DX180	KPD025	JDA735	DP90	PAX30	–	CD1810	KD100
	N10	DA150	MD205 MD220	DX160	KPD10	JDA745	DP150	PAX20 PCD30	ID5	CD10	KD105
	N20	DA200	MD220 MD230	DX140 DX120	KPD002	JDA715 JDA10	DP150	PCD20	ID5	–	–
	N30	DA2200	MD230	–	KPD001	–	DP200	PCD10	–	–	–
S	S01	–	–	–	–	–	–	–	–	CD1810	–
	S10	–	–	–	–	–	–	–	–	CD10	–

При относительно низких скоростях резания и, как следствие, при низких температурах у СТМ преобладают адгезионно-усталостный и абразивный виды изнашивания, а при высоких скоростях резания возможен диффузионный износ. При неблагоприятных условиях резания могут наблюдаться выкрашивания мелких частиц режущих кромок, а также сколы на передних и задних поверхностях. Например, для точения с ударами и фрезерования закаленных быстро-режущих сталей и сталей с высоким содержанием хрома применять инструменты из СТМ вообще не рекомендуется.

Расчеты показывают, что необходимым условием эффективного внедрения инструментов из СТМ на станках с ЧПУ и обрабатывающих центрах взамен твердосплавных резцов и фрез является увеличение интенсивности съема припуска (объема металла, срезаемого в единицу времени) в 1,5–2,5 раза.

## ГЛАВА 5. ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТА

Как показано в гл. 3, основными *методами повышения надежности инструмента* являются:

- повышение прочности и износостойкости режущих частей инструмента;
- повышение жесткости и точности крепления инструмента;
- адаптивное управление процессом эксплуатации инструмента.

Повышение износостойкости инструмента осуществляется в машиностроении методами, основанными на воздействии на поверхность режущей части инструмента концентрированных потоков энергии — ионного пучка, лазерного луча и т.п., а также различных силовых воздействий. Классификация методов приведена на рис. 5.1.

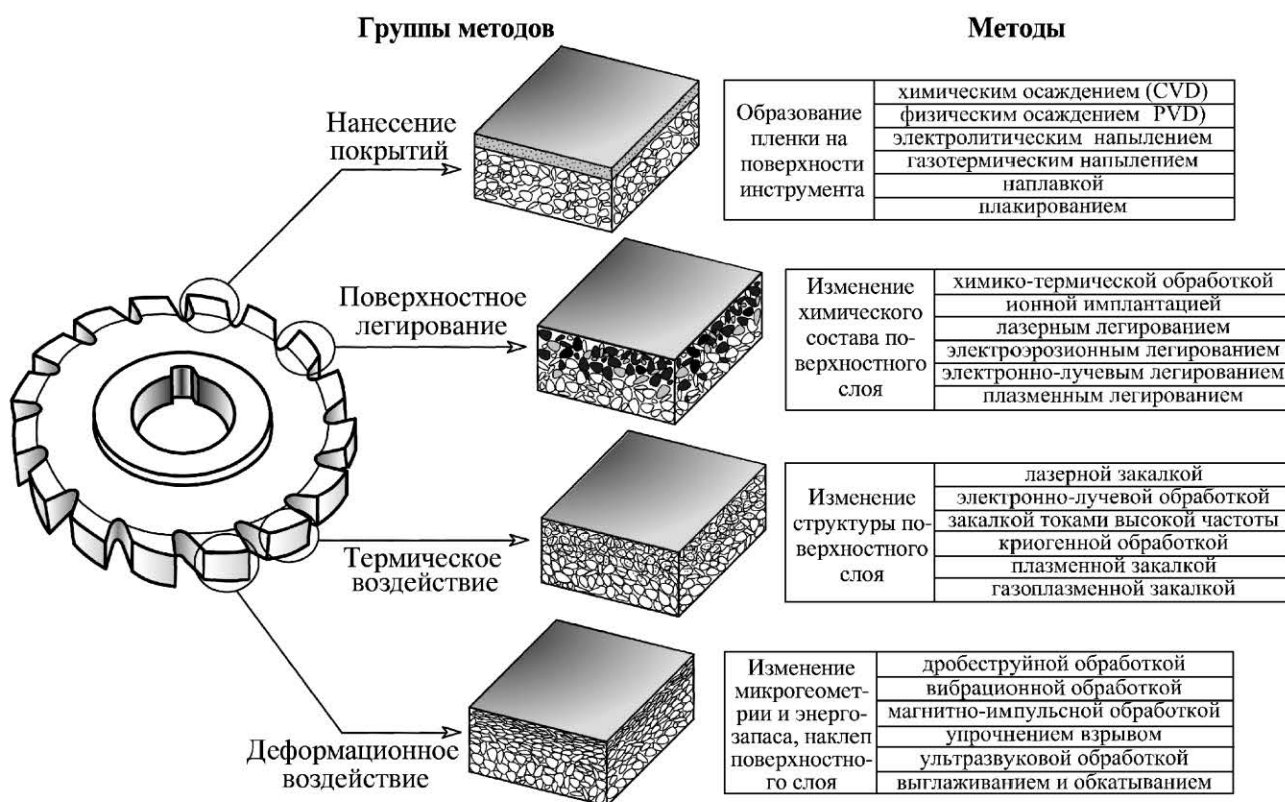


Рис. 5.1. Классификация методов нанесения покрытий и модификации рабочих поверхностей режущих инструментов

Методы, относящиеся к различным группам, оказывают различное воздействие на поверхность и поверхностный слой режущего инструмента. При нанесении покрытий на поверхности инструмента происходит формирование тонкой пленки. Поверхностное легирование изменяет химический состав и, как правило, структуру поверхностного слоя режущего инструмента. Результатом

термического воздействия на поверхностный слой инструмента является изменение его структуры, при этом его химический состав остается неизменным. При деформационном воздействии происходит наклеп поверхностного слоя режущего инструмента, изменяется его микрогеометрия и энергетический запас.

В представленной классификации указаны методы, наиболее распространенные в инструментальном производстве [15].

В табл. 5.1 даны сведения о применении различных методов нанесения покрытий и модификации рабочих поверхностей режущего инструмента.

Таблица 5.1

**Области применения различных методов  
поверхностного упрочнения режущих инструментов**

Группа	Метод нанесения покрытия или модификации поверхности	Вид инструментального материала				
		Углеродистые и легированные стали	Быстрорежущие стали	Твердые сплавы	Керамика	СТМ
Нанесение покрытий	Химическое осаждение (CVD)	-	+	+	+	+
	Физическое осаждение (PVD)	-	+	+	+	+
	Электролитический способ	-	+	+	-	-
	Газотермическое напыление	+	+	+	-	-
	Наплавка	+	+	+	-	-
Поверхностное легирование	Химико-термическая обработка	+	+	+	-	-
	Ионная имплантация	+	+	+	+	+
	Лазерное легирование	+	+	+	+	-
	Электроэрозионное легирование	+	+	+	+	-
	Плазменное легирование	+	+	+	+	-
Термическое воздействие	Лазерная закалка	+	+	-	-	-
	Электронно-лучевая обработка	+	+	-	-	-
	Криогенная обработка	+	+	-	-	-
	Газоплазменная закалка	+	+	-	-	-
	Закалка ТВЧ	+	+	-	-	-
Деформационное воздействие	Дробеструйная обработка	+	+	+	+	-
	Магнитно-импульсная обработка	+	+	+	-	-
	Упрочнение взрывом	+	+	+	+	-
	Выглаживание и обкатывание	+	+	+	+	-
	Ультразвуковая обработка	+	+	+	+	-

## 5.1. Нанесение износостойких покрытий

В целом задача нанесения износостойких покрытий на рабочие поверхности инструмента может быть разделена на два основных этапа, которые в значительной степени взаимосвязаны. Во-первых, необходимо выбрать или разработать состав покрытия, который в комплексе с основным инструментальным материалом будет создавать совместимую и практически полезную систему при конкретных условиях эксплуатации инструмента. Во-вторых, необходимо разработать экономически оправданную технологию получения покрытий, которая бы обеспечила их максимальную износостойкость и надежность в работе.

Сложности с выбором материала покрытий для режущего инструмента возникают в основном из-за ряда практически несовместимых требований, обычно предъявляемых к ним (рис. 5.2). С одной стороны, от покрытия требуются повышенные функциональные характеристики — высокая твердость, инертность по отношению к обрабатываемому материалу, стабильность свойств при повышенных температурах и т.д., а с другой — максимальная совместимость с инструментальным материалом.

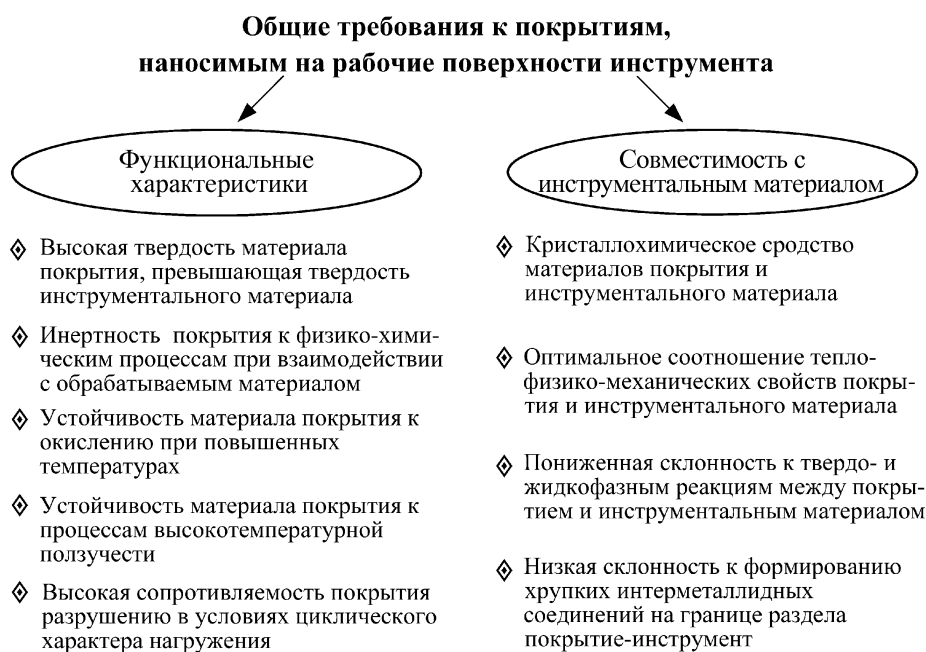


Рис. 5.2. Общие требования, предъявляемые к износостойким покрытиям, наносимым на режущий инструмент

Производственный опыт показывает, что наибольший интерес в качестве износостойких покрытий или их слоев на сегодняшний день представляют следующие *соединения*:



1. Карбиды, нитриды, карбонитриды и другие соединения тугоплавких металлов (керамические покрытия) — TiN, TiCN, (Ti,Cr)N, (Ti,Zr)N (Ti,Al)N, (Ti,Al)CN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, и др.

2. Тугоплавкие металлы (металлические покрытия) — Ti, Cr, Zr, Mo, Ta и др.

3. Алмазоподобные соединения (углеродные покрытия) — Me-C:H, a-C:H и др.

Различные соединения тугоплавких металлов (керамические покрытия) получили наибольшее распространение в инструментальном производстве. В зависимости от типа соединения (нитрид, оксид и т.д.) его свойства существенно различаются даже при использовании в качестве основы одного и того же тугоплавкого металла. По данным, представленным на рис. 5.3, можно проследить качественные закономерности изменения основных физико-механических свойств нитридных, карбидных и боридных покрытий.

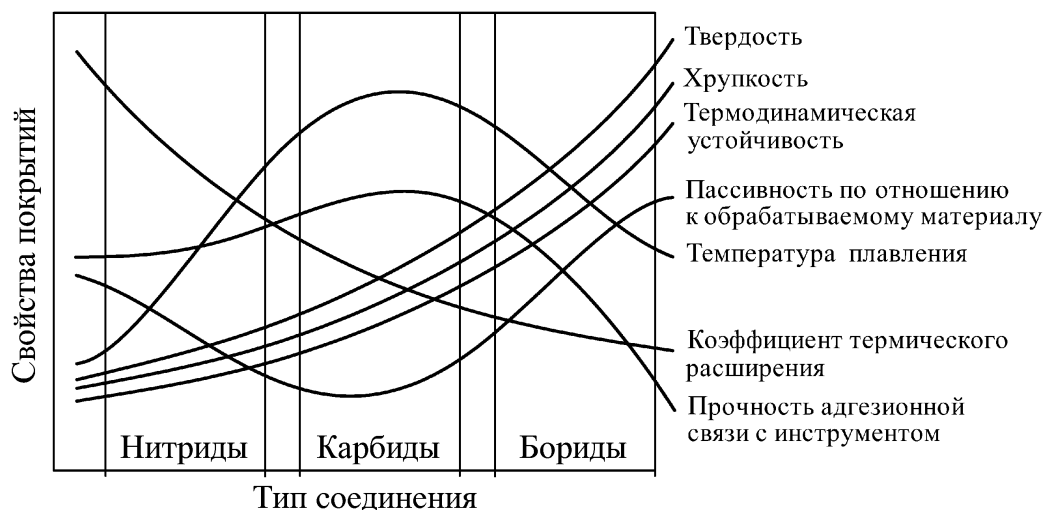


Рис. 5.3. Качественное сравнение физико-механических свойств боридов, карбидов и нитридов

Бориды и карбиды являются более твердыми и обладают более высокой термодинамической устойчивостью по сравнению с нитридами. Практически это означает, что нитриды имеют более низкую сопротивляемость высокотемпературному окислению и коррозии. Тем не менее нитриды характеризуются достаточно высокой пассивностью по отношению к большинству обрабатываемых материалов, сильно отличаются от них кристаллохимическим строением, а также имеют более высокую пластичность и меньшую хрупкость, чем карбиды и бориды. Это является их преимуществом особенно при использовании в условиях повышенных теплосиловых нагрузок — при черновой обработке, в условиях наростообразования, прерывистого резания и др.

Тугоплавкие металлы (металлические покрытия) в инструментальном производстве обычно не используются в качестве самостоятельных покрытий. В основном их используют в качестве переходных слоев, например, на границе раздела «инструментальный материал — покрытие» с целью уменьшения разницы в их физико-механических свойствах, снижения внутренних напряжений и повышения пластичности покрытия.

Алмазоподобные покрытия (а-С:Н) представляют собой метастабильную форму аморфного углерода. При осаждении алмазоподобных покрытий часто осуществляют их легирование алюминием, вольфрамом, хромом, титаном и другими металлами. Эффект от применения алмазоподобных покрытий обусловлен уникальным сочетанием свойств, которыми они обладают — высокая микротвердость, сверхнизкий коэффициент трения, химическая инертность по отношению к обрабатываемым материалам, не содержащим железа.

Несмотря на значительное количество существующих соединений, которые потенциально могут быть использованы в качестве покрытий для режущего инструмента, действительно широкое распространение в инструментальном производстве получили порядка пятнадцати соединений, которые используются как в качестве самостоятельных покрытий, так и в качестве их слоев. Остальные соединения в основном применяются либо в исследовательских целях, либо для узкоспециализированного режущего инструмента. В табл. 5.2 представлены сведения о свойствах и областях применения некоторых наиболее часто используемых соединениях.

*Таблица 5.2*

**Свойства и области применения некоторых соединений,  
наиболее часто используемых в качестве покрытий  
в инструментальном производстве**

<b>Покрытие</b>	<b>Цвет</b>	<b>Свойства, особенности и область применения</b>
TiN	Золотистый	Используется в качестве самостоятельного покрытия, а также в качестве его отдельных слоев. Благодаря простой технологии получения и невысокой стоимости исходных материалов получило наиболее широкое промышленное применение. Обладает твердостью по Виккерсу 22–24 ГПа и коэффициентом трения по стали 0,55. Применяется для всех видов режущих инструментов при резании конструкционных сталей и сплавов нормальной обрабатываемости

Покрывтие	Цвет	Свойства, особенности и область применения
TiCN	Серо-голубой	Используется в качестве самостоятельного покрытия, а также в качестве его отдельных слоев. Обладает высокой твердостью по Виккерсу — до 37 ГПа, имеет низкий коэффициент трения по стали — 0,25, но относительно невысокую стойкость к окислительному износу и является достаточно хрупким. Применяется для чистовой обработки конструкционных сталей и сплавов нормальной обрабатываемости
(Ti, Al)N	Бронзовый	Используется в качестве самостоятельного покрытия, а также в качестве его отдельных слоев. Характерной особенностью является образование в процессе резания на его поверхности слоя Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , служащего тепловым барьером. Обладает повышенной стойкостью к окислительному износу, высокой твердостью по Виккерсу — до 37 ГПа и имеет коэффициент трения по стали 0,6. Применяется для операций с большими термическими нагрузками – при высокоскоростной обработке, резании материалов с пониженной теплопроводностью, а также обработки твердых материалов, в том числе без применения СОЖ
CrN	Серебристый	Используется в качестве самостоятельного покрытия, а также в качестве его отдельных слоев. Обладает высокой пластичностью, хорошими трибологическими свойствами. Имеет твердость по Виккерсу не более 14 ГПа и коэффициент трения по стали 0,3. Применяется для снижения налипания материала заготовки на режущий инструмент при обработке мягких металлов — алюминия, меди и сплавов на их основе
MoS <sub>2</sub>	Черный	Используется в качестве самостоятельного покрытия, а также в качестве его отдельных слоев. Является трибологическим покрытием, обладающим достаточно низкой твердостью, но имеющим чрезвычайно низкий коэффициент трения (до 0,05). Применяется для обработки материалов без использования СОЖ, а также для обработки цветных металлов и сплавов
(Ti, Cr)N	Золотисто-серый	Используется в качестве самостоятельного покрытия, а также в качестве его отдельных слоев. Свойства и области применения аналогичны покрытию TiN, но является более пластичным, что делает предпочтительным его применение для инструментов, эксплуатирующихся в условиях ударно-циклических нагрузок и больших сечений срезаемого слоя
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Перламутровый	В основном используется в качестве одного из слоев многослойного покрытия. Обладает повышенной микротвердостью (в зависимости от типа кристаллической решетки и режимов осаждения она может составлять до 35 ГПа), сохраняющейся при повышенных температурах резания и характеризуется повышенной пассивностью по отношению ко многим обрабатываемым материалам, но при этом является чрезвычайно хрупким. Применяется в качестве барьерного слоя, сдерживающего диффузионные процессы, а также окисление и коррозию режущих кромок инструмента при высоких температурах

Покрытие	Цвет	Свойства, особенности и область применения
TiC	Серый	Используется в качестве самостоятельного покрытия, а также в качестве его отдельных слоев. Обладает микротвердостью 28–32 ГПа, но является более хрупким, чем TiN. Обладает кристаллохимической совместимостью с твердыми сплавами. Поэтому часто используется в качестве внутреннего слоя многослойного покрытия с целью увеличения прочности его адгезионной связи с твердосплавной подложкой
a-C:H (алмазо-подобное)	Темно-серый	Используется в качестве самостоятельного покрытия, а также в качестве наружного слоя многослойного покрытия. Обладает микротвердостью до 50 ГПа и имеет чрезвычайно низкий коэффициент трения (до 0,07). Применяется для обработки цветных металлов и сплавов

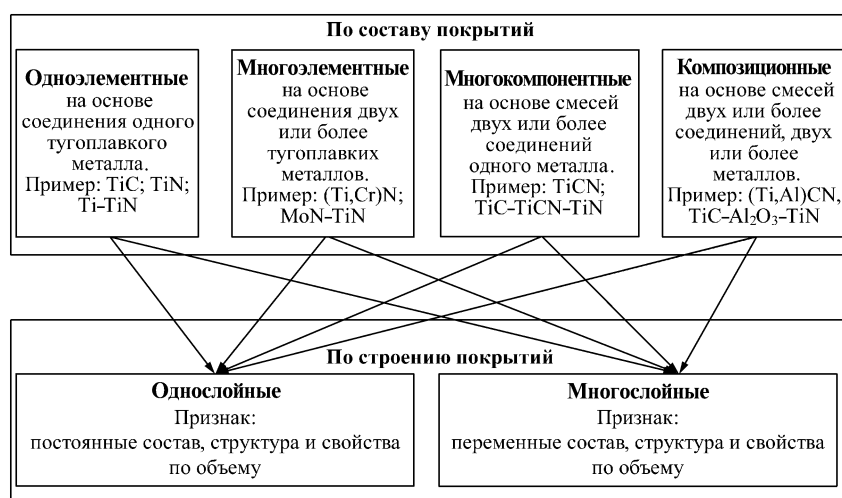


Рис. 5.4. Классификация износостойких покрытий для режущего инструмента по составу и строению

Все покрытия, используемые для нанесения на режущий инструмент, условно можно классифицировать по составу (одноэлементные, многоэлементные, многокомпонентные и композиционные) и строению (однослойные и многослойные) (рис. 5.4).

Нанопокрывтия обеспечивают качественно новый уровень свойств по сравнению с покрытиями, характеризующимися стандартной структурой. Помимо традиционных соединений — TiN, TiCN, (Ti,Al)N и других — практический интерес среди нанопокрывтий для нанесения на режущий инструмент представляют следующие два типа покрытий: многофазные однослойные пленки и керамические многослойные.

*Нанопокрывтия первого типа* (многофазные однослойные) состоят из основной твердой нанокристаллической фазы, на границах зерен которой располагается тонкий слой второй нанокристаллической или аморфной фазы, пре-

пятствующий росту зерен основной фазы. Другими словами, твердые зерна первой фазы отделены друг от друга, покрыты тонкой сетью атомов другой фазы, сегрегированных на их поверхностях. Примером покрытий указанного типа являются системы TiN–Cu, ZrN–Cu, AlN–Cu, CrN–Ni и др. Например, при добавлении в покрытие TiN в процессе осаждения 2 ат % Cu размеры зерен покрытия сохраняются на уровне 25 нм, заметно снижается хрупкость, а твердость увеличивается до 32 ГПа по сравнению с 24 ГПа для стандартного TiN.

*Нанопокрyтия второго типа* (керамические многослойные) представляют собой периодически чередующиеся керамические слои толщиной до нескольких десятков нанометров. Примером покрытий данного типа являются системы TiN–NbN, TiN–VN, (Ti, Al)N–CrN и др. С уменьшением толщины слоев размеры зерен таких покрытий уменьшаются, а твердость увеличивается. Например, твердость покрытия TiN–NbN с чередующимися слоями TiN и NbN при толщине слоев около 10 нм достигает порядка 60 ГПа, в то время как твердость традиционных покрытий TiN и NbN не превышает 30 ГПа.

Каждый из известных методов нанесения покрытий на режущий инструмент обладает преимуществами и недостатками, имеет специфическую область применения, которая зависит от технологических особенностей метода, степени автоматизации, экономических затрат на процесс нанесения и т.д.

Как указывалось в гл. 4, в инструментальном производстве в основном используются методы химического и физического осаждения покрытий. Области формирования и применения CVD- и PVD-покрытий см. рис. 4.4.

## 5.2. Химическое осаждение покрытий

В общем случае процессы CVD основаны на протекании гетерогенных химических реакций в парогазовой среде, окружающей инструменты, в результате которых образуется износостойкое покрытие. Получение покрытий из тугоплавких соединений путем осаждения их из газовой фазы основано на восстановлении летучих галоидных соединений металлов водородом в присутствии активных составляющих газовой смеси, которые, взаимодействуя с выделяющимся в свободном виде металлом, образуют соответствующие тугоплавкие соединения.

В промышленных масштабах наибольшее распространение получили две разновидности метода высокотемпературного осаждения покрытий HT-CVD — газотермический (ГТ) и термодиффузионный (ДТ) методы. Указанные методы очень близки по своей сути. Разница между ними заключается в том, что по методу ГТ химические реакции, в результате которых выделяется насыщающий

элемент, происходят в объеме газовой фазы, а по методу ТД — могут происходить как в газовой фазе, так и на границе «обрабатываемая поверхность — газовая фаза». При реализации методов ДТ покрытие, как правило, формируется из порошкообразной засыпки на разогретой поверхности инструмента.

На рис. 5.5 представлена схема процесса химического осаждения покрытий газотермическим методом. Конденсация покрытий в процессах осуществляется на поверхности инструмента, нагретого до необходимой температуры 900–1 200 °С при давлении, близком или равном атмосферному. Для получения покрытий на основе карбидов тугоплавких металлов в качестве активной (науглероживающей) составляющей газовой смеси обычно используются углеводороды, при необходимости получения покрытий на основе нитридов — азот, а при осаждении карбонитридов — метан. Осаждение покрытий в основном производят на неподвижные подложки. Однако известны конструкции установок, в которых подложки перемещаются вдоль реакционной зоны, качаются или вращаются в ней, а также находятся в подвешенном состоянии.

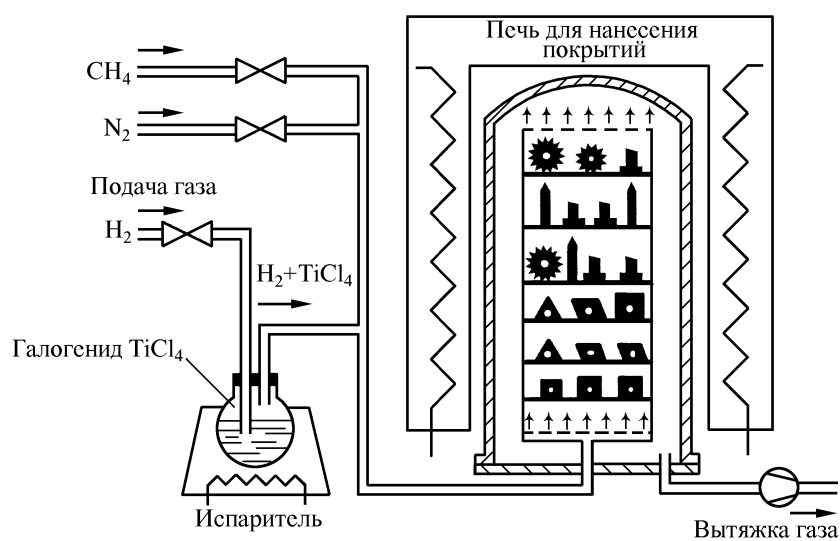


Рис. 5.5. Схема процесса химического осаждения покрытий из газовой фазы на твердосплавные инструменты

Для проведения процессов CVD используются специализированные реакторные установки, состоящие из **трех основных компонентов**:

- система подачи и смешивания реагентов;
- камера для осаждения покрытий с системой нагрева;
- система повторного использования и удаления реагентов.

Нагрев инструмента при проведении процессов CVD, как правило, осуществляется одним из следующих способов: прямым контактом с тепловым источником; индукционным способом; радиационным способом.

Процессы HT-CVD реализуются при достаточно высоких температурах. Такие температуры, естественно, исключают возможность применения этого метода для инструмента из быстрорежущей стали. Но и при нанесении покрытий на твердосплавные подложки нагрев до столь высоких температур часто неблагоприятно сказывается на работе инструмента с покрытием. Инструменты с CVD-покрытиями часто имеют повышенную склонность к хрупкому разрушению в виде выкрашиваний и сколов. Отмеченное особенно характерно для эксплуатации инструмента в условиях повышенных теплосиловых нагрузок — при прерывистом резании, когда действуют циклические нагрузки, при обработке труднообрабатываемых сплавов, при обработке с большими толщинами срезаемого слоя. Поэтому за повышение производительности обработки часто приходится расплачиваться снижением показателей надежности эксплуатации инструмента.

Одной из причин этого является высокотемпературная диффузия кобальта (частично и вольфрама) из твердого сплава в покрытие. В результате на границе раздела покрытие — твердый сплав формируется хрупкая  $\eta$ -фаза ( $W_6Co_6C$ ,  $W_3Co_6C$ ), толщина которой может достигать 4 мкм. Формирование  $\eta$ -фазы существенно повышает склонность твердосплавных инструментов к хрупкому разрушению в процессе резания. Другой причиной повышенной хрупкости являются возникающие растягивающие напряжения и трещины, зарождающиеся на поверхности инструмента в процессе остывания после нанесения покрытий.

Поэтому широко используют метод химического осаждения покрытий при средних температурах — medium-temperature CVD (MT-CVD). Этот метод реализуется при температурах 750–850 °С, когда формирование хрупкой  $\eta$ -фазы практически не происходит.

Методами CVD имеется возможность наносить покрытия как на основе чистых тугоплавких металлов, так и на основе их нитридов, карбидов, оксидов и карбонитридов. Кроме того, с их помощью наносятся покрытия с алмазоподобной и наноразмерной структурой. Наибольшее распространение в инструментальном производстве получили следующие соединения, формируемые процессами CVD: TiN, TiC, TiCN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Указанные соединения применяются как в качестве однослойных покрытий, так и в качестве отдельных слоев многослойного покрытия. Конструкции типовых многослойных покрытий, предлагаемых ведущими мировыми производителями твердосплавных инструментов, представлены на рис. 5.6.

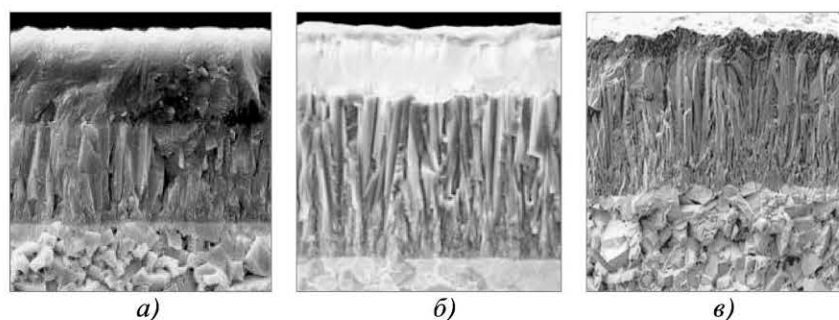


Рис. 5.6. Микроструктура поверхностного слоя твердосплавного инструмента с различными CVD-покрытиями:  
*a* — твердый сплав + TiC–TiCN–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; *б* — твердый сплав + TiCN–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–TiN;  
*в* — твердый сплав + TiCN–TiN

В получающих все более широкое распространение многослойных покрытиях каждый из слоев выполняет строго регламентированные служебные функции. Например, в покрытии TiC–TiCN–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> слои выполняют следующие функции: наружный слой Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> является барьером, который сдерживает диффузионные процессы, снижает физико-химическое взаимодействие инструментального и обрабатываемого материалов, уменьшает склонность инструментального материала к окислению при повышенных температурах резания. Слой TiC обладает кристаллохимической совместимостью с твердосплавной подложкой, а слой на основе карбонитрида титана TiCN является прекрасной связкой и используется для повышения прочности адгезионной связи между инструментальным материалом и наружным слоем покрытия.

Кроме состава покрытия, очень важной и достаточно противоречивой характеристикой является его толщина. С одной стороны, ее рост благоприятно сказывается на повышении износостойкости контактных площадок инструмента, с другой — приводит к заметному увеличению количества дефектов в покрытии, снижению прочности сцепления покрытия с инструментальным материалом и уменьшению способности покрытия сопротивляться хрупкому разрушению. Отмеченное характерно для любых методов нанесения покрытий. Именно поэтому при нанесении покрытий на инструменты, эксплуатирующиеся в условиях прерывистого резания, например, при фрезеровании, когда покрытие должно сопротивляться циклическим нагрузкам, его толщина, как правило, не превышает 3–6 мкм, в то время как при точении в некоторых случаях этот показатель может достигать 15 мкм.

Как правило, чтобы обезопасить свои разработки от конкурентов, ведущие производители режущих инструментов с покрытиями (Sandvik Coromant, ISCAR, Kennametal и др.) не приводят данных о конкретном составе покрытия



и сведений о его характеристиках — толщине, фазовом составе и микротвердости. Указываются только область рационального использования инструмента и рекомендуемые режимы резания. В табл. 5.3 приведены некоторые типовые составы и области применения покрытий, предлагаемых ведущими мировыми производителями твердосплавных инструментов.

Таблица 5.3

### Типовые составы CVD-покрытий и области их применения

Группа применения по ИСО	Область применения	Материал подложки	Состав покрытия	Общая толщина покрытия, мкм
M20 K20	Получистовое точение жаропрочных и коррозионно-стойких сталей, высокоскоростное точение серых и шаровидных чугунов при постоянных условиях резания	BK6M	TiC–TiN–Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12
P25	Получистовое точение конструкционных сталей при постоянных условиях резания	T14K8	TiC–TiCN–Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10
P10	Чистовое фрезерование конструкционных сталей	T15K6	TiN–TiCN–Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4
P20 M15 K15	Универсальное применение	–	TiC–TiCN–TiN	3
P35	Получерновое и черновое точение конструкционных сталей	T5K12	TiN–TiCN–TiN–TiCN	6
P40 M35	Точение конструкционных и коррозионно-стойких сталей в неблагоприятных условиях	TT7K12	TiN–TiCN–Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –TiN	6
P10 K15	Чистовое высокоскоростное точение, растачивание, развертывание сверление конструкционных сталей, серых и шаровидных чугунов	–	TiN–TiCN–Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8

Составы CVD-покрытий и технологии их нанесения непрерывно совершенствуются. Одним из основных направлений совершенствования твердого сплава с покрытием всегда являлась и в настоящее время остается борьба с хрупкостью его поверхностного слоя. Появление технологий MT-CVD также

не смогло до конца решить эту проблему. Растягивающие напряжения в поверхностном слое МТ-CVD-покрытий хотя и ниже, чем у аналогичных, полученных высокотемпературным CVD-методом, но все же достигают опасной величины, чреватой зарождением трещин. Для решения указанной проблемы последнее время используется технологический процесс нанесения покрытия, получивший название «Low stress coating».

На твердосплавную подложку по стандартной технологии наносят многослойное покрытие, например,  $TiCN-Al_2O_3-TiN$ . После этого передняя поверхность пластин полируется, в результате чего полностью снимается слой нитрида титана и частично — слой оксида алюминия. Удаление части покрытия толщиной около 3 мкм дает возможность снизить уровень внутренних растягивающих напряжений в 2 раза и ликвидировать большую часть зародышей трещин. Кроме того, полировка «обнажает» наиболее плотный слой оксида алюминия, который наилучшим образом сопротивляется диффузионному и абразивному износу. Гладкая передняя поверхность дает дополнительные преимущества при обработке вязких материалов — на ней практически отсутствует схватывание с обрабатываемым материалом. Задняя поверхность, сохранившая всю толщину покрытия, эффективно сопротивляется действующим на нее нагрузкам.

Сегодня в мире около 70 % выпускаемого твердосплавного инструмента имеют покрытия, нанесенные методом CVD. Обеспечивается равномерное нанесение широкого спектра керамических и алмазоподобных покрытий высокой плотности на рабочие поверхности инструмента с высокой производительностью (до 12 мкм/ч), что делает метод CVD привлекательным для массового производства твердосплавного инструмента.

Мощным инструментом воздействия как на кинетику процессов нанесения CVD-покрытий, так и свойства самих покрытий, является плазменное сопровождение (ассистирование), в англоязычной литературе получившее название plasma-assisted CVD (PA-CVD) или plasma-enhanced CVD (PE-CVD). Применение различных приемов возбуждения плазмы в реакционном объеме и управление ее параметрами позволяет интенсифицировать процессы роста покрытий, сдвигать их в область более низких температур, делает более управляемыми процессы формирования покрытий требуемой структуры и состава и обеспечивает формирование наноструктур. Помимо плазмы для сопровождения осаждению CVD-покрытий возможно использование и лазерного излучения.

При применении процессов осаждения покрытий с плазменным сопровождением (ассистированием) типа PA-CVD твердофазный осадок (покрытие) на подложке образуется в результате химических реакций в газовой фазе при

воздействии на последнюю плазмой газового высокочастотного электрического разряда. На практике для нанесения PA-CVD-покрытий используют два технологических приема — метод «горячей плазмы», когда при давлении, близком или равном атмосферному, электроны, ионы и нейтральные газовые молекулы, находящиеся в локальном термодинамическом равновесии, вводятся в дугу для получения равновесной плазмы. Электроны и в меньшей степени ионы обладают большей энергией, чем молекулы газа в тлеющем разряде при низком давлении. Это приводит к так называемой «холодной плазме», параметры которой оказываются неравновесными. Большинство процессов PA-CVD осуществляются именно по этому методу, а не по методу равновесной горячей плазмы.

Основным преимуществом PA-CVD по сравнению с CVD заключается в том, что температура процесса не превышает 600 °С. При этом достигается более высокая прочность адгезионной связи покрытия и подложки. На рис. 5.7 представлены схемы двух различных реакторов для проведения процессов PA-CVD.

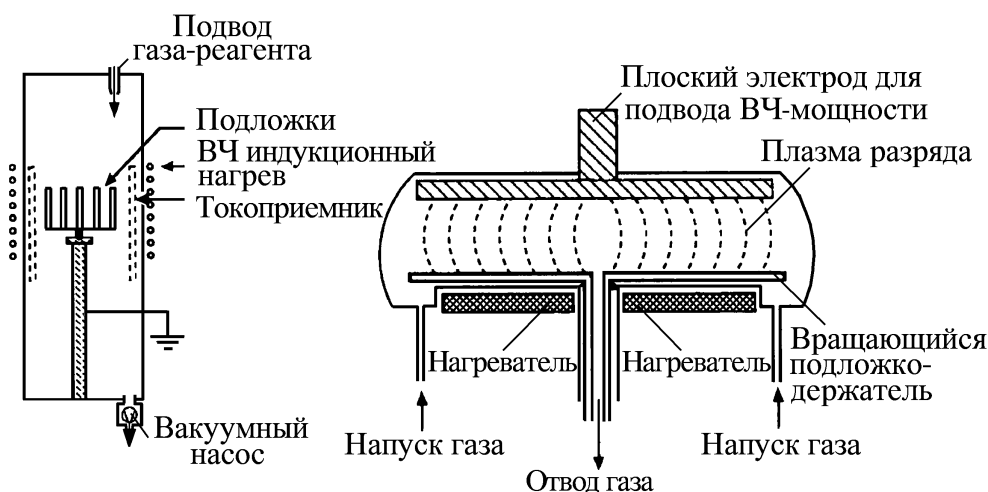


Рис. 5.7. Схемы реакторов для проведения процессов PA-CVD

### 5.3. Физические методы осаждения покрытий

Методы физического осаждения покрытий (PVD-методы) универсальны с точки зрения получения гаммы однослойных и многослойных покрытий практически любого состава, в том числе с алмазоподобной и наноразмерной структурой. Они позволяют реализовывать процессы нанесения при температурах 500–600 °С, что обеспечивает возможность их применения для быстрорежущих сталей, твердых сплавов и керамики.

Практика показывает, что нанесение даже самого простого однослойного покрытия TiN на инструмент из быстрорежущей стали и твердого сплава поз-

воляет до 5 раз увеличить их стойкость при обработке конструкционных сталей по сравнению с инструментом без покрытия. Особенно эффект повышения стойкости проявляется по мере увеличения скорости резания.

В табл. 5.4 представлены некоторые сведения о составах и областях применения различных покрытий, получаемых PVD-методами.

Таблица 5.4

### Рекомендации по применению PVD-покрытий

Обрабатываемый материал	Точение	Фрезерование	Сверление, зенкерование	Нарезание резьбы	Развертывание, протягивание
Сталь	TiN (Ti, Al)N (Ti, Al, Zr)N	(Ti, Cr)N	TiN TiCN (Al, Ti)N	(Nb, Zr)N TiCN (Al, Ti)N	(Ti, Al)CN (Al, Ti)N
Чугун	(Ti, Zr)N (Ti, Al)N	(Ti, Cr)N (Ti, Al)N	(Ti, Al)N (Ti, Zr)N	(Al, Ti)N (Nb, Zr)N	(Al, Ti)N
Алюминиевые сплавы	(Nb, Zr)N TiCN (Hf, Zr, Cr)N a-C:H	MoS <sub>2</sub> (Ti, Cr)N (Ti, Cr)N+Mo <sub>2</sub> S	TiN TiCN MoS <sub>2</sub> (Ti, Cr)N (Ti, Cr)N+MoS <sub>2</sub>	MoS <sub>2</sub> (Ti, Cr)N+MoS <sub>2</sub>	(Ti, Mo)N TiCN
Титановые сплавы	(Hf, Zr, Cr)N (Al, Mo)N+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(Hf, Zr, Cr)N CrN (Al, Cr)CN	MoS <sub>2</sub> (Al, Ti)N (Cr, Al)N+MoS <sub>2</sub> (Hf, Zr, Cr)N	MoS <sub>2</sub> TiCN+Mo <sub>2</sub> S	(Hf, Zr, Cr)N
Никелевые сплавы	(Ti, Nb, Al)N (Hf, Zr, Cr)N (Al, Ti)N+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Ti-Cr)N	(Ti, Cr)N (Hf, Zr, Cr)N	(Al, Ti)N	(Ti, Zr)N	(Ti, Nb, Al)N
Медь	CrN a-C:H	CrN	CrN a-C:H	CrN	(Ti, Cr)N
Латунь, бронза	TiCN (Al, Ti)N (Nb, Zr)N a-C:H	TiCN (Al, Ti)N (Ti, Cr)N	TiCN (Al, Ti)N (Nb, Zr)N a-C:H	TiCN	TiCN
Пластик	TiCN (Ti, Al)N a-C:H	TiCN (Ti, Al)N	TiCN (Ti, Al)N	TiCN (Ti, Al)N	TiCN (Ti, Al)N

Помимо традиционных однослойных покрытий широкое практическое применение находят многослойные PVD-покрытия, например, состоящие из более чем пяти слоев — Ti-(Ti,Cr)N-TiN-(Ti,Al)N-TiN-(Ti,Cr)N или Cr-CrN-(Ti,Cr)N-TiN-(Ti,Cr)N и др.

Все методы физического осаждения покрытий (вакуумно-плазменные методы) основаны на получении в среде вакуума пара осаждаемого материала

в результате воздействия на изготовленный из него катод (мишень) различных источников энергии — мощных высокотемпературных нагревателей, лазерного луча, электронных и ионных пучков, катодных пятен вакуумной дуги, сильно-точного импульса и др. Данные методы позволяют получать пар практически любого твердого вещества, а для синтеза его соединений на поверхности инструмента, например, нитридов, оксидов или карбидов, используются нетоксичные газы, такие, как азот, кислород, ацетилен и другие газы, не представляющие опасности для окружающей среды. Кроме того, как уже было отмечено, при реализации PVD-процессов отсутствует необходимость в нагреве инструмента до высоких рабочих температур. Все отмеченное значительно расширяет диапазон применения PVD-методов и делает их более универсальными по сравнению с CVD.

Однако для достижения такой же высокой плотности, твердости и других характеристик покрытий, как при их осаждении методами CVD, необходимо не только подготовить должным образом (очистить от загрязнений, активировать, а если нужно, то и нагреть) поверхность инструмента, но и обеспечить определенное энергетическое состояние как осаждаемого пара, так и поверхности покрытия.

На рис. 5.8 представлены схемы установок, реализующих три наиболее распространенных механизма физического осаждения покрытий.

В России наибольшее промышленное распространение получил метод конденсации покрытий в условиях ионной бомбардировки (КИБ). За рубежом этот метод известен как Ion Bond или Cathode Arc Deposition. Его сущность заключается в испарении материалов катодными пятнами вакуумной дуги в рабочее пространство камеры с одновременной подачей реакционноспособных газов и последующей конденсации паров материалов либо их соединений с газами на рабочих поверхностях инструмента в условиях ионной бомбардировки последнего. На этапах прогрева и активации инструмента, предшествующих конденсации покрытия, на поверхности инструмента формируется тонкий подслоя, состоящий из материала катода. Его формирование обеспечивает повышенную прочность адгезионной связи покрытия с инструментальной основой, являющуюся отличительной чертой методов электродугового испарения. На рис. 5.9 представлена схема установки для реализации описанного процесса. Все процессы испарения, плазмохимических реакций, ионной бомбардировки и конденсации покрытия происходят в вакуумной камере, металлический корпус которой во многих конструкциях установок служит анодом.

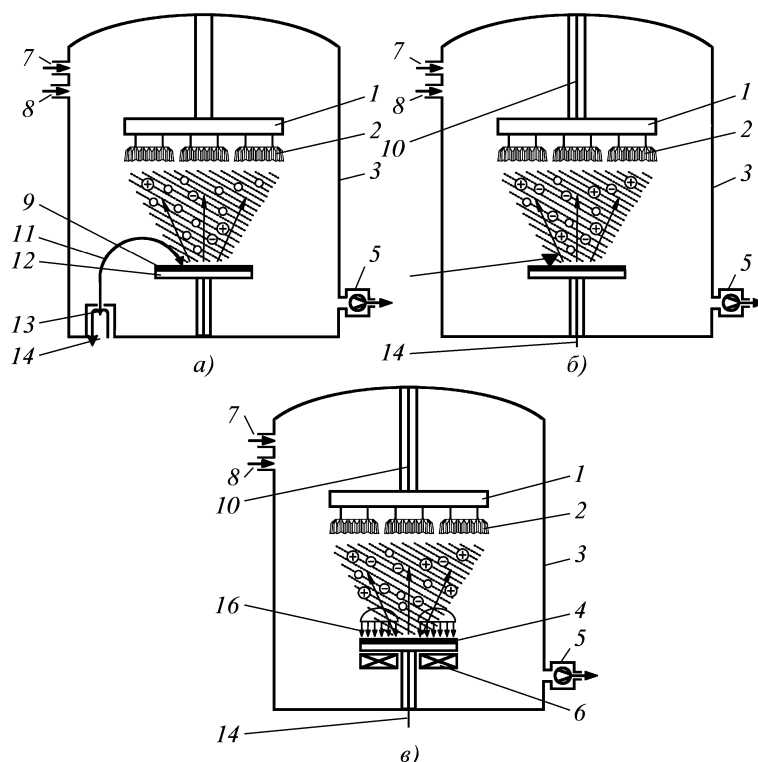


Рис. 5.8. Схемы нанесения покрытий на режущие инструменты PVD-методами:  
*а* — электронно-лучевым; *б* — электродуговым; *в* — магнетронным:  
 1 — держатель инструментов; 2 — инструменты; 3 — вакуумная камера;  
 4 — осаждаемый материал; 5 — вакуумный насос;  
 6 — магнитная система для магнетронного распыления; 7 — инертный (рабочий) газ;  
 8 — реакционный газ; 9 — испаряемый материал (анод);  
 10 — подача напряжения на инструмент; 11 — электронный луч; 12 — тигель;  
 13 — термокатод; 14 — включение тока; 15 — катодное пятно; 16 — ионный пучок

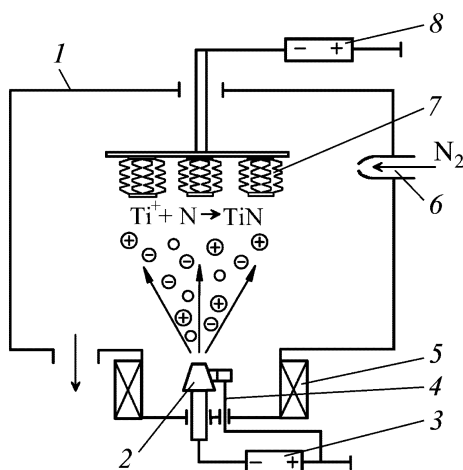


Рис. 5.9. Схема установки для нанесения покрытий на режущий инструмент методом конденсации с ионной бомбардировкой:  
 1 — корпус вакуумной камеры; 2 — титановый катод; 3 — источник питания разряда;  
 4 — устройство поджига; 5 — магнитная катушка; 6 — ввод реакционноспособного газа;  
 7 — режущий инструмент; 8 — источник опорного напряжения

Начиная с 1980 г., в СССР был налажен серийный выпуск установок, предназначенных для реализации различных процессов нанесения покрытий электродуговым испарением.



Отечественные разработки в области электродугового нанесения покрытий прошлых лет вызывали огромный интерес во всем мире. В качестве примера можно привести тот факт, что в 1980 г. американская фирма Multi-Arc Vacuum System купила у СССР лицензию на технологию и установку «Булат» и на их базе наладила серийный выпуск установок моделей PVD 20.

Из-за роста требований к качеству наносимых покрытий и их воспроизводимости большинство из выпускавшихся ранее отечественных электродуговых установок (ННВ 6.6-И1, «Булат-6» и др.) морально и физически устарели. В настоящее время среди промышленного электродугового оборудования отечественного производства, полностью удовлетворяющего всем современным требованиям, можно выделить установки серии АПП, разработчиком которых является МГТУ «СТАНКИН». Лидерами в этой области производства электродугового оборудования среди зарубежных производителей в настоящее время являются компании Oerlikon Balzers Coating (Швейцария), Sulzer Metaplas (Германия), Platit (Швейцария) и некоторые другие. В табл. 5.5 представлены технические характеристики современных установок «СТАНКИН-АПП».

Таблица 5.5

**Технические характеристики серийных установок  
для электродугового нанесения покрытий  
серии «СТАНКИН-АПП» (Россия) [16]**

Наименование параметра	«СТАНКИН АПП-950» 	«СТАНКИН АПП-1600» 
Количество испарителей (катодов), шт.	4	6–12
Температура процесса нанесения покрытий, °С	300–700	300–700
Длительность цикла упрочнения инструмента, ч	1,5–3	1,5–3
Диапазон плавного регулирования напряжения смещения, В	0–1 200	0–1 200

Наименование параметра	«СТАНКИН АПП-950» 	«СТАНКИН АПП-1600» 
Остаточное давление в камере, Па	$6,65 \times 10^{-3}$	$6,65 \times 10^{-3}$
Скорость осаждения покрытия (нитрида титана), мкм/ч	5–40	5–40
Наносимые покрытия	TiN, Ti <sub>2</sub> N, (Ti, Al)N, Ti, Nb, Al)N, (Ti, Al)CN, TiCN, ZrN, CrN, нанопокрyтия, ионное азотирование	TiN, Ti <sub>2</sub> N (Ti, Al)N, (Ti, Nb, Al)N, (Ti, Al)CN, TiCN, ZrN, CrN, нанопокрyтия, ионное азотирование
Полезный объем, мм	500×600	500×1200
Размер рабочей камеры: – диаметр вписанной окружности, мм; – высота, мм	800 950	800 1 600
Потребляемая мощность, кВт	40	60
Напряжение питающей сети, В	380/220±5 %	380/220±5 %
Масса установки, т	2	3,2
Система управления	Программируемый логический контроллер, работающий под управлением системы Pentium 4 с Windows 2000	Программируемый логический контроллер, работающий под управлением системы Pentium 4 с Windows 2000

PVD-процессы независимо от их технологических особенностей и применяемого оборудования включают в себя **четыре основные стадии**:

1. Прогрев и очистка поверхности инструмента ионами газа или металла.
2. Генерация плазмы и формирование ионного потока.
3. Ускорение и доставка ионного потока к поверхности инструмента.
4. Конденсация покрытия на поверхности инструмента.

Работоспособность инструмента с PVD-покрытием зависит от различных характеристик покрытий — его толщины, микротвердости, остаточных напряжений и др. Указанные характеристики в свою очередь являются функциями входных факторов (условий) процессов нанесения покрытий — электрическое напряжение на инструменте  $U$ , давления газа в камере  $p$ , тока  $I$  и времени  $\tau$  и др. К факторам процесса необходимо относить независимые переменные физические величины, характеризующие воздействие на процесс нанесения по-



крытий (они зависят лишь от выбора технолога), в то время как параметрами являются зависимые переменные физические величины.

Среди условий нанесения покрытий необходимо разделять зависимые и независимые переменные. Например, температура процесса нанесения покрытия и плотность тока влияют на выходные параметры процесса (характеристики покрытий), но сами при этом являются зависимыми переменными (параметрами), так как напрямую зависят от напряжения на инструменте, тока, материала катода или мишени и других входных факторов.

Покрытие, нанесенное на инструмент, вызывает ожидаемое увеличение какого-либо из выходных параметров процесса резания только в том случае, если будут правильно подобраны входные факторы. Например, применительно к электродуговому испарению определяющими факторами являются: давление реакционного газа  $p$ , продолжительность процесса нанесения покрытия  $\tau$ , напряжение смещения на инструменте  $U$  и ток дуги на катоде  $I$ . На рис. 5.10 представлено влияние этих режимов на износ  $h_3$  по задней поверхности пластин из быстрорежущей стали Р6М5 с покрытием (Ti, Cr)N при точении конструкционной стали 45.

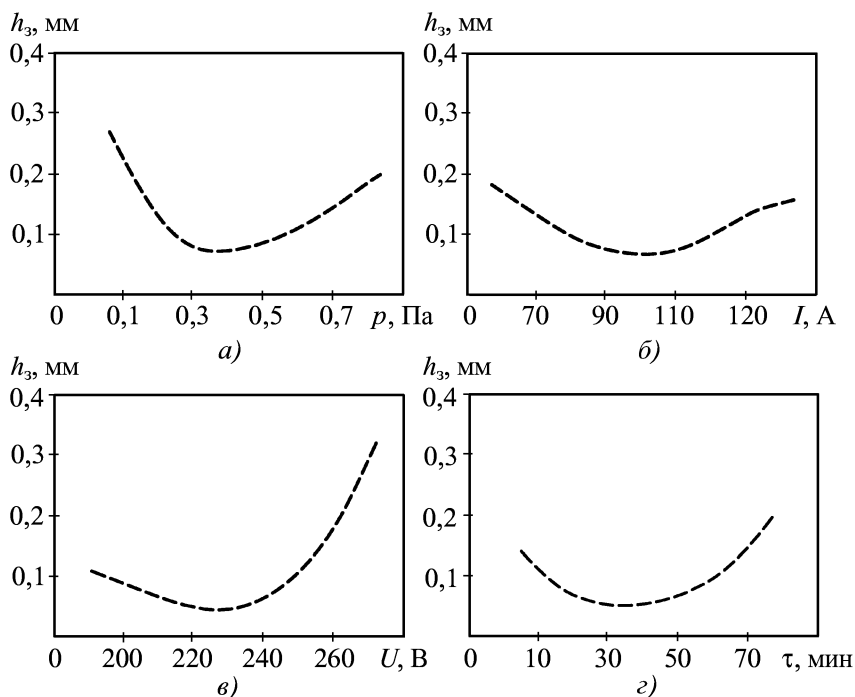


Рис. 5.10. Влияние технологических режимов вакуумно-дугового осаждения — давления реакционного газа  $p$  (а), тока дуги на катоде  $I$  (б), напряжения смещения на инструменте  $U$  (в) и времени нанесения покрытия  $\tau$  (г) на износ пластин по задней поверхности  $h_3$  из быстрорежущей стали Р6М5 с покрытием (Ti, Cr)N при точении стали 45: скорость резания  $v = 65$  м/мин; подача  $S_z = 0,2$  мм/зуб; глубина резания  $t = 1,5$  мм; обработка без СОЖ

Зависимость износа инструмента от давления реакционного газа (рис. 5.10, *а*) объясняется сильным влиянием этого фактора на изменение свойств покрытия — микротвердости, параметров решетки и фазового состава. В области давлений 0,1 Па происходит формирование покрытий максимальной твердости и, как следствие, наблюдается наибольшее искажение кристаллической решетки. Большое значение износа при этом давлении связано с повышенной хрупкостью покрытия и снижением его трещиностойкости, в результате которых уменьшается сопротивляемость композиции «покрытие — инструментальный материал» микро- и макроразрушению. Дальнейшее увеличение давления до 0,3–0,4 Па приводит к снижению уровня микроискажений решетки и росту пластичности покрытия за счет снижения скорости конденсации покрытия и его формирования в более равновесных условиях. В то же время уровень твердости еще достаточно высок, чтобы эффективно увеличить износостойкость контактных площадок инструмента. В области давлений азота свыше 0,4 Па твердость покрытия начинает резко падать, увеличивается схватывание с обрабатываемым материалом и, как следствие, наблюдается интенсивный износ инструмента с покрытием.

Ток дуги на катоде (рис. 5.10, *б*) и напряжение на инструменте (рис. 5.10, *в*) влияют главным образом на температуру процесса осаждения, которая, в свою очередь, влияет на работоспособность инструмента с покрытием. При напряжении порядка 220–240 В и токе дуги 110–130 А покрытие формируется в наиболее благоприятных энергетических условиях, устанавливается высокая прочность адгезионной связи покрытия с быстрорежущей матрицей, что обеспечивает минимальную интенсивность изнашивания инструмента. Дальнейшее увеличение этих факторов ведет к резкому увеличению температуры процесса осаждения и, как следствие, к разупрочнению поверхностных слоев быстрорежущей стали. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости оптимизации условий осаждения покрытий по температуре путем варьирования факторов, функционально связанных с температурой процесса, — напряжения смещения и тока дуги на катоде.

Влияние времени осаждения покрытия (рис. 5.10, *з*) оказывает наибольшее влияние на толщину формируемых покрытий, рост которой, с одной стороны, повышает износостойкость контактных площадок инструмента, а с другой — снижает прочность сцепления покрытия с инструментальным материалом и уменьшает способность покрытия сопротивляться упругопластическим деформациям.

Одно и то же покрытие в зависимости от условий его осаждения может иметь широкий разброс физико-механических характеристик. Так, микротвер-

достью широко используемого покрытия (Ti,Al)N в зависимости от материала катода или мишени может составлять от 10 до 40 ГПа.

Рис. 5.11 демонстрирует зависимость микротвердости покрытия (Ti,Al)N от содержания алюминия в материале катода. Она растет с увеличением содержания алюминия, достигая максимума при ~75 % Al, а после резко опускается, значительно ниже уровня твердости покрытия TiN (до 10 ГПа).

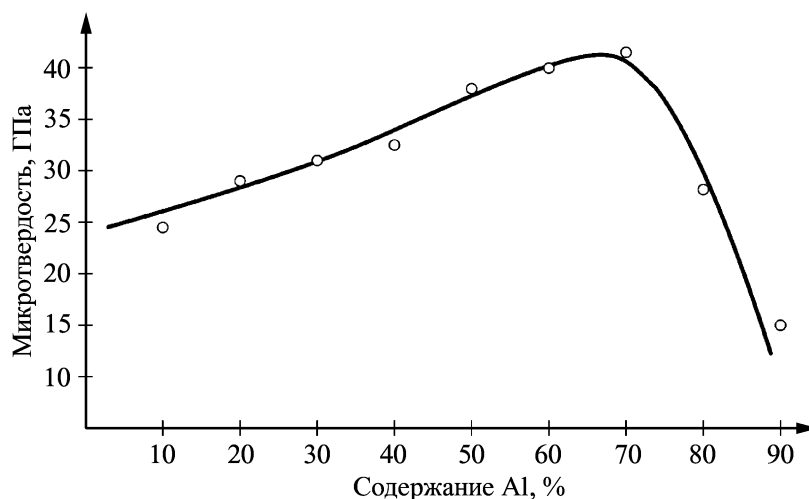


Рис. 5.11. Зависимость микротвердости покрытия (Ti, Al)N от содержания Al в материале катода

Зависимость характеристик покрытий от режимов их осаждения является достаточно сложной. Оптимальное значение режимов должно выбираться исходя из конкретных условий эксплуатации инструмента — вида действующих нагрузок, свойств обрабатываемого материалов и др.

#### 5.4. Особенности эксплуатации режущего инструмента с покрытием

Производственный опыт показывает, что нанесение покрытий на режущий инструмент сильно изменяет свойства его поверхностного слоя, в результате чего меняются контактные и тепловые процессы в зоне резания [10]:

- а) уменьшается площадь контакта стружки с передней поверхностью;
- б) зоны максимальных температур смещаются в направлении главной режущей кромки из-за снижения выделения тепла от трения по передней поверхности и уменьшения нагрева в результате деформаций;
- в) контактные напряжения для инструмента с покрытием превышают соответствующие напряжения для инструмента без покрытия на 15–20 %.

Описанные явления происходят при нанесении покрытий на инструмент как из быстрорежущих сталей, так и из твердого сплава. Увеличение контактных напряжений существенно снижает эффект от нанесения покрытий, так как служит причиной возникновения фронта хрупких трещин и последующего полного разрушения покрытия на контактных площадках инструмента.

Нанесение покрытия вызывает увеличение радиуса округления режущих кромок инструмента до 2 раз, оказывает влияние на процесс резания.

При черновой или получистовой обработке материалов увеличение радиуса округления режущих кромок дает положительный эффект, так как существенно увеличивает их прочность.

Для чистового точения увеличение радиуса округления является негативным фактором, так как сечение срезаемого слоя соизмеримо с этим радиусом. Примером, когда увеличение радиуса округления может негативно влиять на процесс резания, являются операции встречного фрезерования, при которых толщина среза изменяется от нуля при входе зуба в контакт с обрабатываемой заготовкой до максимального значения при выходе зуба из контакта. При чрезмерно большом радиусе в начале рабочего хода зуба происходит процесс смятия, а не процесс резания.

Известные производители инструмента для чистового и тонкого точения и фрезерования рекомендуют пользоваться твердыми сплавами без покрытий или же после нанесения покрытий на инструмент дополнительно осуществлять доработку режущей кромки с целью уменьшения радиуса ее округления.

Необходимо отметить, что увеличение радиуса округления режущих кромок происходит не только после нанесения покрытия на инструмент. Часто это наблюдается на этапах, предшествующих операции покрытия — при нагреве и ионной очистке поверхности инструмента. Например, при слишком интенсивной очистке ионами аргона происходит так называемое «растравливание» режущих кромок инструмента. Этому также способствует неоднородность распределения тока ионов на острых выступах и в пазах инструмента. Поэтому в случае, когда «растравливание» поверхности является недопустимым, при ионной очистке используют газ с минимальной атомной массой, например, гелий, или частично заменяют очистку ионами на очистку пучками быстрых нейтральных молекул. Изменение радиуса округления и контактных напряжений необходимо учитывать при выборе состава покрытия, метода и режимов его нанесения.

При оптимально выбранном составе покрытия, технологии и режимах его нанесения режущий инструмент с покрытием обеспечивает следующие преимущества:

а) увеличение стойкости (времени наработки до отказа) и суммарного ресурса работы инструмента;

б) повышение производительности (скорости резания) и сокращение времени на механическую обработку деталей;

в) повышение точности размеров и качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей;

г) сокращение затрат, приходящихся на режущий инструмент;

д) решение вопросов улучшения экологии и охраны труда в связи с отказом от применения СОТС.

Увеличение стойкости быстрорежущего и твердосплавного инструмента связано с кардинальным изменением условий трения на передней и задней поверхностях инструмента, происходящих в результате нанесения покрытия. Благодаря высокой микротвердости, пассивности по отношению к обрабатываемому материалу и т.д. покрытие существенно повышает сопротивляемость адгезионно-усталостному и абразивному изнашиванию инструментов из быстрорежущих сталей и твердых сплавов. У инструментов из твердых сплавов существенно возрастает сопротивляемость диффузионному и коррозионно-окислительному износу.

Важной отличительной особенностью эксплуатации инструмента с покрытием является возможность смещения скоростей резания в область оптимальных значений. В качестве критерия оптимизации скорости резания принимают либо минимальную интенсивность изнашивания, либо минимальную себестоимость обработки, либо максимальную производительность. Скорости резания инструментом с покрытием, оптимизированные по критерию максимальной производительности, могут в 1,6 раза превышать скорости, применяемые при использовании инструмента без покрытия.

Большой ассортимент разнообразных покрытий позволяет выбрать оптимальный вариант для любых условий эксплуатации.

## ГЛАВА 6. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ ИНСТРУМЕНТ

Производительность оборудования АП в значительной мере зависит от технического уровня вспомогательного инструмента (ВИ), как обеспечивающего возможность сокращения всех составляющих штучно-калькуляционного времени.

Конструкция ВИ определяется тем, что его присоединительные поверхности соответствуют, с одной стороны, устройствам АСИ и крепления инструмента на станке, а с другой — всем многообразным типам и типоразмерам присоединительных поверхностей режущего инструмента. Количество присоединительных поверхностей для крепления режущего инструмента только на одном ГПМ может достигать до 200 типоразмеров. Поэтому для этих целей используют унифицированные конструкции. Унификация типов ВИ осуществляется путем использования принципа агрегатирования для взаимозаменяемости агрегатов между типами, моделями и группами станков с ЧПУ.

Агрегатирование позволяет упростить производство ВИ, ускорить его поставку по заказам и дает возможность пополнять запас инструмента у потребителя с наименьшими затратами.

При выборе ВИ отдают предпочтение конструкциям со стандартными элементами, регламентированными стандартами ИСО, что обеспечивает взаимозаменяемость конструкций и снижает стоимость инструмента. Применение стандартных элементов позволяет увеличить объем однотипной продукции и использовать значительно более совершенные технологические процессы и формы организации инструментального хозяйства, что приводит к снижению себестоимости конечной продукции.

Классификация видов крепления инструмента на станках с ЧПУ приведена на рис. 6.1.

Для станков сверлильно-расточной и фрезерной групп применяют хвостовики с конусами конусностью 7:24. Стандартная конструкция по ГОСТ 25827-2014 исполнение для ручной смены инструмента (табл. 6.1) применяется на фрезерных и расточных станках. Для станков с АСИ используют хвостовики по ГОСТ 25827-2014 (табл. 6.2), имеющие тот же размерный ряд, что и исполнение для ручной смены инструмента, но отличающиеся трапециевидальной проточкой во фланце под захват устройства АСИ. Такое решение позволяет унифицировать ВИ в производственных условиях, когда одновременно используются станки с АСИ и с ручной сменой инструмента.



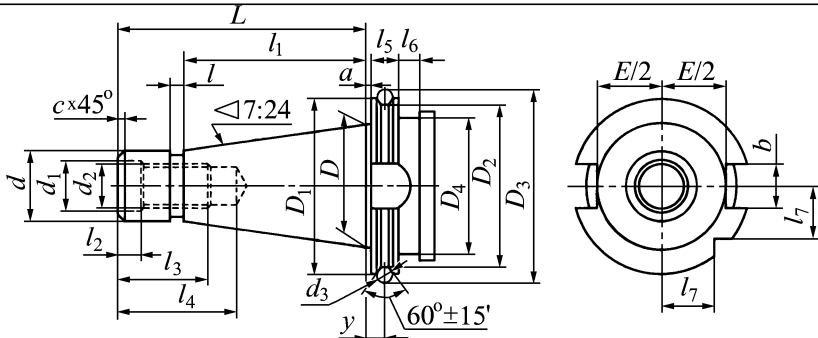
Рис. 6.1. Классификация видов закрепления инструмента на станках с ЧПУ

Таблица 6.1

### Основные размеры, мм, хвостовиков по ГОСТ 25827-2014 исполнение для ручной смены инструмента

Конус 7:24	$D$	$D_1$	$D_2$ , не более	$d$ , а10	$d_1$ , Н7	$d_2$ , 6H	$L$ , h12	$l$	$l_1$
30	31,75	50,0	36	17,4	13	M12	68,4	3	48,8
40	44,45	63,0	50	25,3	17	M16	93,4	5	65,4
45	57,15	80,0	68	32,4	21	M20	106,8	6	82,8
50	69,85	97,5	78	39,6	25	M24	126,8	8	101,8
Конус 7:24	$l_2$ ( $^{+0,5}$ )	$l_3$ , не менее	$l_4$ , не менее	$l_5$ , не менее	$l_6$ , не менее	$a \pm 0,2$	$b$ , H12	$E/2$ , не более	$c$
30	5,5	24	34	8	9	1,6	16,1	16,2	0,2
40	8,2	32	43	10	11	1,6	16,1	22,5	0,4
45	10,0	40	53	12	13	3,2	19,3	29,0	0,6
50	11,5	47	62	12	16	3,2	25,7	35,3	0,6

### Основные размеры, мм, хвостовиков по ГОСТ 25827–2014

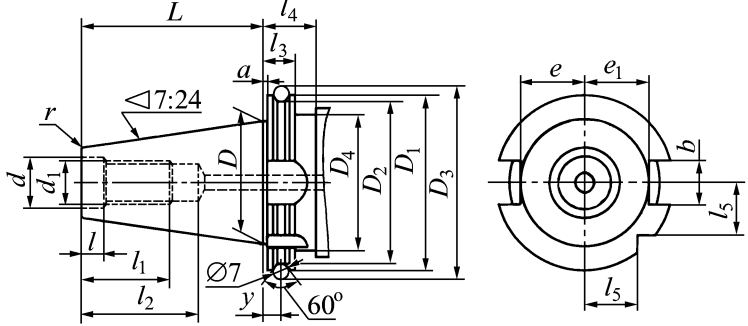


Конус 7:24	$D$	$D_1 \pm 0,15$	$D_2 \begin{pmatrix} 0 \\ -0,5 \end{pmatrix}$	$D_3, h8$	$D_4, \text{ не более}$	$d, a10$	$d_1, H7$	$d_2, 6H$	$d_3, js5$	$L, h11$	$l$	$l_1$
30	31,75	50	46	55,07	44	17,4	13	M12	4	68,4	3	48,4
40	44,45	63	58	69,34	55	25,3	17	M16	5	93,4	5	65,4
45	57,15	80	74	87,61	68	32,4	21	M20	6	106,8	6	82,8
50	69,85	100	94	107,61	85	39,6	25	M24	6	126,8	8	101,8
Конус 7:24	$l_2 \begin{pmatrix} +0,5 \\ 0 \end{pmatrix}$	$l_3, \text{ не менее}$	$l_4, \text{ не менее}$	$l_5 \pm 0,1$	$l_6, \text{ не менее}$	$l_7 \begin{pmatrix} 0 \\ -0,3 \end{pmatrix}$	$a \pm 0,1$	$y \pm 0,01$	$b, H12$	$c$	$E/2 \begin{pmatrix} 0 \\ -0,4 \end{pmatrix}$	
30	5,5	24	34	8	8	15,5	1,6	5,6	16,1	0,2	16,2	
40	8,2	32	43	10	10	18,5	1,6	6,6	16,1	0,4	22,5	
45	10,0	40	53	12	12	24,0	3,2	9,2	19,3	0,6	29,0	
50	11,5	47	62	12	12	30,0	3,2	9,2	25,7	0,6	35,3	

Хвостовики по ГОСТ 25827–2014, исполнение *A* и *U*, соответствуют немецкому стандарту DIN 69871/A+AD и стандарту ISO 7388-1:2007 (табл. 6.3). На станках ряда стран используют хвостовики по ГОСТ 25827-2014 исполнение *J*, которое соответствует японскому стандарту MAS 403 BT (табл. 6.4).

Таблица 6.3

### Основные размеры, мм, хвостовиков по ГОСТ 25827–2014, исполнение *A* и *U*



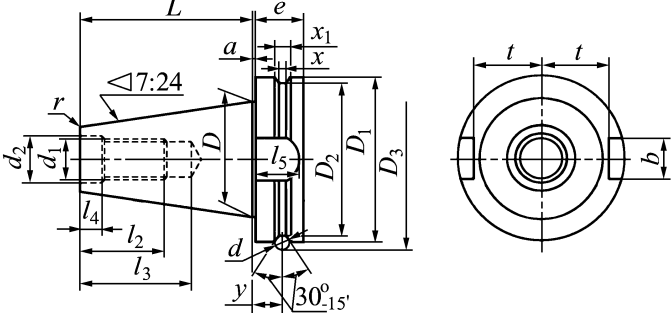
Конус 7:24	$D$	$D_1 \begin{pmatrix} 0 \\ -0,1 \end{pmatrix}$	$D_2 \begin{pmatrix} 0 \\ -0,5 \end{pmatrix}$	$D_3 \pm 0,05$	$D_4, \text{ не более}$	$d, H7$	$d_1, 6H$	$L \begin{pmatrix} 0 \\ -0,3 \end{pmatrix}$	$l \begin{pmatrix} +0,5 \\ 0 \end{pmatrix}$	$l_1, \text{ не менее}$
30	31,75	46,05	39,25	54,85	46,05	13	M12	47,80	5,5	24
40	44,45	63,55	56,25	72,30	50	17	M16	68,4	8,2	32
45	57,15	82,55	75,25	91,35	63	21	M20	82,7	10,0	40
50	69,85	97,50	91,25	107,25	80	25	M24	101,75	11,5	47



Конус 7:24	$L_2$ , не менее	$l_3$ $\begin{pmatrix} 0 \\ -0,1 \end{pmatrix}$	$l_4$ , не менее	$l_5$ $\begin{pmatrix} 0 \\ -0,3 \end{pmatrix}$	$y \pm 0,01$	$a \pm 0,1$	$b$ , Н12	$r \begin{pmatrix} 0 \\ -0,5 \end{pmatrix}$	$e \begin{pmatrix} 0 \\ -0,4 \end{pmatrix}$	$e_1 \begin{pmatrix} 0 \\ -0,4 \end{pmatrix}$
30	34	19,1	35	15,5	11,1	3,2	16,1	0,75	16,4	19,0
40	43	19,1	35	18,5	11,1	3,2	16,1	1,20	22,8	25,0
45	53	19,1	35	24,0	11,1	3,2	19,3	2,00	29,1	31,3
50	62	19,1	35	30,0	11,1	3,2	25,7	2,50	35,5	37,7

Таблица 6.4

### Основные размеры, мм, хвостовиков по ГОСТ 25827-2014 исполнение J



Конус 7:24	$D$	$D_1$ , h8	$D_2$	$D_3$ $\begin{pmatrix} 0 \\ -0,5 \end{pmatrix}$	$d$ , js5	$d_1$ , 6H	$d_2$ , H8	$e$	$L \pm 0,2$	$l_2$ , не менее
30	31,75	46	38	56,09	8	M12	13	20	48,4	24
40	44,45	63	53	75,62	10	M16	17	25	65,4	30
45	57,15	85	73	100,15	12	M20	21	30	82,8	38
50	69,85	100	85	118,95	15	M24	25	35	101,8	45

Конус 7:24	$l_3$ , не менее	$l_4$ $\begin{pmatrix} +0,5 \\ 0 \end{pmatrix}$	$l_5$ , не менее	$y \pm 0,01$	$b$ , Н12	$t$ $\begin{pmatrix} 0 \\ -0,2 \end{pmatrix}$	$X$	$x_1$	$a \pm 0,4$	$r$ , не более
30	34	7	17	13,6	16,1	16,3	4	8	2	0,5
40	43	9	21	16,6	16,1	22,6	5	10	2	1
45	53	11	26	21,2	19,3	29,1	6	12	3	1
50	62	13	31	23,2	25,7	35,4	7	15	3	1

#### 6.1. Точность и жесткость закрепления инструмента

Соединение станка с инструментом влияет на свойства упругой технологической системы, а, следовательно, и на качество обработки деталей. Наличие микро- и макропогрешностей определяет качество этого соединения. Микропогрешности, а именно шероховатость присоединительных поверхностей, оказывают влияние на контактную податливость и демпфирование в соединении. Макропогрешности в виде отклонений формы присоединительной поверхности от идеальной, как в поперечном, так и в продольном сечении, вызывают уменьшение фактической площади контакта поверхностей и ухудшают их прилегание.

Основные погрешности сопрягаемых конических поверхностей:

а) отклонения от правильной окружности в поперечных сечениях — некруглость;

б) отклонение образующей от прямолинейности;

в) отклонение угла конуса от номинального значения 2, определяемое как допуск на полуразность номинальных диаметров  $d_c$  и  $d_d$  на длине измерения  $L_p$  (рис. 6.2). При этом предельное отклонение всегда должно располагаться в «плюс». Общепринятым является назначение предельных отклонений по степени точности АТЗ (табл. 6.5).

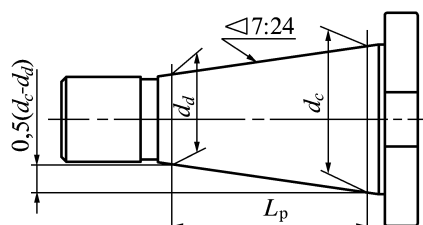


Рис. 6.2. Задание предельного отклонения угла конуса

Таблица 6.5

**Величины предельных отклонений угла и формы поперечных и продольных сечений конуса 7:24 по степени точности АТЗ, мм**

Конус 7:24	Предельные отклонения			
	угла конуса		формы	
	величина	на длине	непрямолинейность образующей	некруглость поперечных сечений
30	0,002	48	0,0006	0,0006
40	0,003	56	0,0008	0,0006
45	0,003	65	0,0008	0,0008
50	0,004	83	0,0010	0,0008

Дальнейшее повышение точности и жесткости закрепления за счет точного базирования по конической поверхности конусностью 7:24 нецелесообразно из-за низкой эффективности расходов на изготовление. Поэтому существуют несколько вариантов усовершенствования конструкций хвостовиков.

Для высокоскоростной обработки разработан стандарт ГОСТР ИСО 12164-1-2013 на хвостовики с обозначением HSK, что является аббревиатурой немецкого названия Hohlschäfte Kegel (Полый Конус). Стандарт DIN 69893 включает в себя шесть типов хвостовиков 35 типоразмеров. Схема соответствия типов показана в табл. 6.6.

### Типы хвостовиков HSK, их типоразмеры и номера стандартов

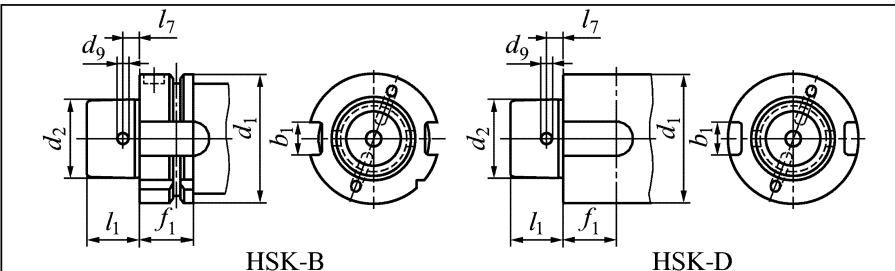
										
Обозначение типа хвостовика HSK	Обозначение типоразмера									Номер стандарта DIN
	25	32	40	50	63	80	100	125	160	
A	-	+	+	+	+	+	+	+	+	69893-1
B	-	-	+	+	+	+	+	+	+	69893-2
C	-	+	+	+	+	+	+	-	-	69893-1
D	-	-	+	+	+	+	+	+	-	69893-2
E	+	+	+	+	+	-	-	-	-	69893-5
F	-	-	-	+	+	+	-	-	-	69893-6

В настоящее время стандартизованы хвостовики HSK типов *A* и *C* (табл. 6.7), *B* и *D* (табл. 6.8). Стандарты для *E* и *F* (табл. 6.9) приняты предварительно, хотя именно они являются наиболее подходящими для ВСО.

### Размеры, мм, хвостовиков HSK типов *A* и *C*

	HSK-A				HSK-C				
$d_1$	32	40	50	63	80	100	125	160	
$d_2$	24	30	38	48	60	75	95	120	
$l_1$	16	20	25	32	40	50	63	80	
$b_1$	7,05	8,05	10,54	12,54	16,04	20,02	25,02	30,02	
$d_9$	4,0	4,6	6,0	7,5	8,5	12,0	-	-	
$l_9$	5,0	6,0	7,5	9,0	12,0	15,0	-	-	
$f_1$	20	20	26	26	26	29	29	31	
$f_5$ , не менее	10	10	12,5	12,5	16	16	-	-	

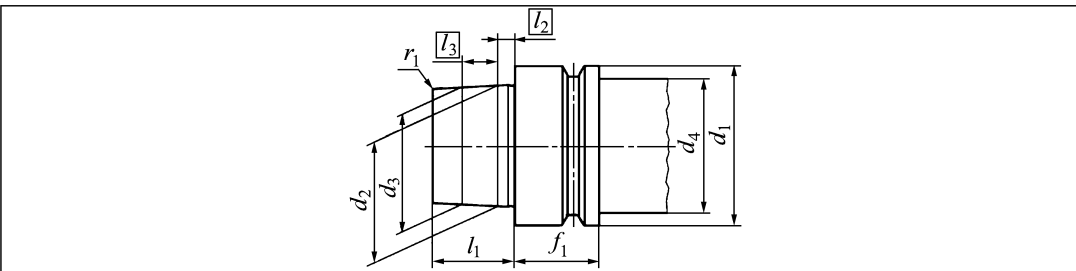
## Размеры, мм, хвостовиков HSK типов B и D



	HSK-B				HSK-D			
$d_1$	40	50	63	80	100	125	160	
$d_2$	24	30	38	48	60	75	95	
$l_1$	16	20	25	32	40	50	63	
$b_1$	10	12	16	18	20	25	32	
$d_9$	4,0	4,6	6,0	7,5	8,5	—	—	
$l_7$	5,0	6,0	7,5	9,0	12,0	—	—	
$f_1$	20	25	26	26	29	29	31	

Таблица 6.9

## Размеры, мм, хвостовиков HSK типов E и F



Обозначение хвостовика	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$f_1$	$l_1$	$l_2$	$l_3$
HSK-E25	25	19	18,5	20	10	13	2,5	8,5
HSK-E32	32	24	23,27	26	20	16	3,2	7,3
HSK-E40	40	30	29,05	34	20	20	4,0	9,5
HSK-E50	50	38	36,90	42	26	25	5,0	11,0
HSK-F50	50	30	29,05	42	26	20	4,0	9,5
HSK-E63	63	48	46,53	53	26	32	6,3	14,7
HSK-F63	63	38	36,90	53	26	25	5,0	11,0
HSK-F80	80	48	46,53	67	26	32	6,3	14,7

Сопоставление размеров хвостовиков HSK и с конусом 7:24 приведено в табл. 6.10.

## Сопоставление размеров хвостовиков

Хвостовик с конусом 7:24	HSK A и C	HSK B и D
–	HSK 40	HSK 50
30	HSK 50	HSK 63
40	HSK 63	HSK 80
45	HSK 80	HSK 100
50	HSK 100	HSK 125

Хвостовики HSK применяют на высокоскоростных станках с частотой вращения шпинделя более 10 000 мин<sup>-1</sup>. Основными областями применения являются: чистовое фрезерование; изготовление пресс-форм и штампов; внутреннее шлифование; сверление и высокоточное развертывание, деревообработка и т.п.

В большинстве перечисленных операций необходим большой вылет режущей части инструмента относительно торца шпинделя. Так как центробежные силы возрастают с ростом частоты вращения, то на большом вылете при смещении центра масс относительно оси вращения, эти силы способны деформировать инструмент и исказить траекторию его движения.

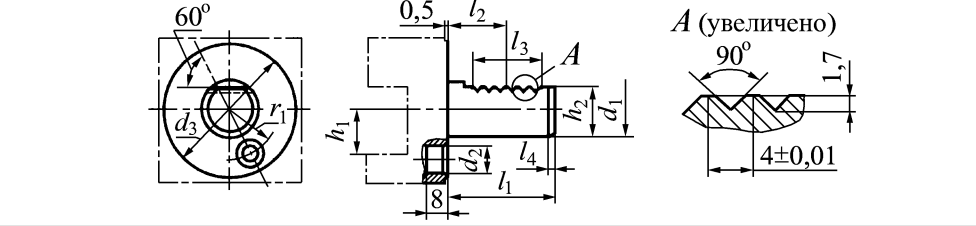
Инструмент с большой массой может вызвать появление осевой составляющей центробежной силы, сопоставимой с силой закрепления инструмента в шпинделе. Может произойти раскрепление инструмента, нарушение его базирования, потеря жесткости и даже разрушение. Поэтому необходима тщательная балансировка инструмента перед его установкой в шпинделе высокоскоростного станка.

Современные токарные станки помимо наружного точения и обработки внутренних поверхностей, соосных с осью вращения заготовки, имеют возможность сверлить и фрезеровать другие поверхности. Для этого они снабжаются или специальным вспомогательным инструментом, передающим крутящий момент от специальных приводов, или оснащаются дополнительными шпинделями по типу фрезерных.

Для таких многооперационных станков возникает необходимость унифицировать токарный и фрезерный инструмент за счет создания специальных хвостовиков.

Для токарных станков с ЧПУ с револьверными головками резцедержатели и вспомогательный инструмент для вращающегося инструмента изготавливают с цилиндрическими хвостовиками по ГОСТ 24900–81. Основные размеры резцедержателей приведены в табл. 6.11.

**Основные размеры, мм, цилиндрических хвостовиков  
по ГОСТ 24900–81**



$d_1, h_6$	$l_1 \pm 0,3$	$d_2, h_8$	$d_3$	$h_1$ , не более	$h_2 \pm 0,1$	$l_2 \pm 0,05$	$l_3$ , не менее	$l_4 \begin{smallmatrix} +1 \\ 0 \end{smallmatrix}$	$r_1 \pm 0,02$
16	32	8	40	12	15	12,7	16	2	14,5
20	40	10	50	16	18	21,7	24	2	18
25	48	10	58	16	23,5	21,7	24	2	21
30	55	14	68	20	27	29,7	40	2	25
40	63	14	83	25	36	29,7	40	3	32
50	78	16	98	32	45	35,7	48	3	37
60	94	16	123	32	55	43,7	56	4	48

## 6.2. Специальные конструкции вспомогательного инструмента

Дальнейшее развитие инструментальной оснастки для токарных станков с ЧПУ привело к замене стандартных резцов, закрепляемых в резцедержателях, на специальные конструкции (рис. 6.3).

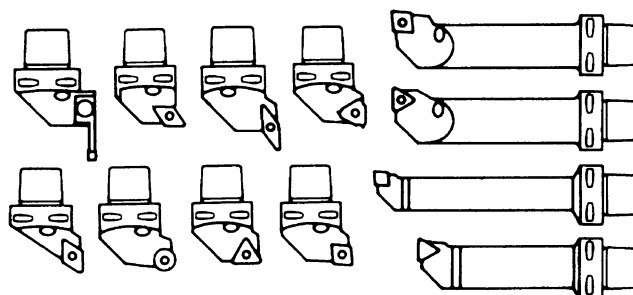


Рис. 6.3. Специальные конструкции резцов для токарных станков

Важным преимуществом такого решения является возможность применения одних и тех же конструкций вращающегося инструмента как на токарных, так и на фрезерно-сверлильно-расточных станках (рис. 6.4).

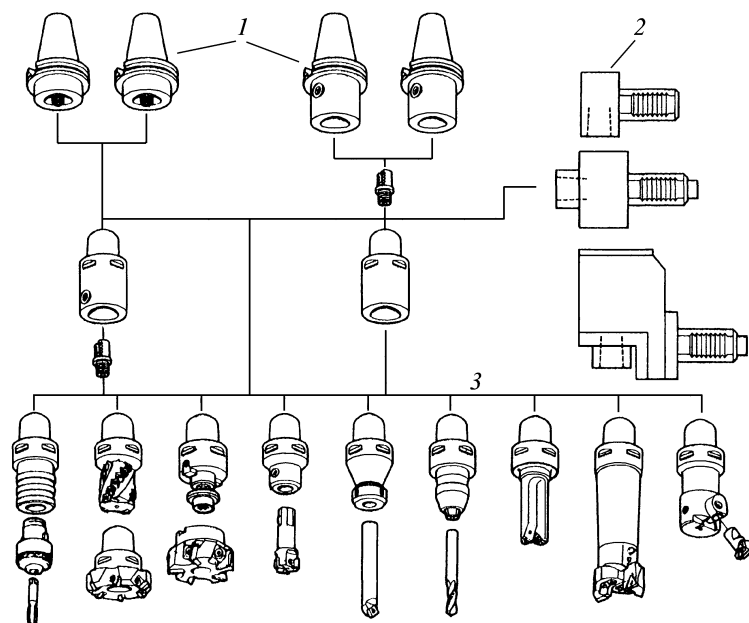


Рис. 6.4. Патроны 1 и резцедержатели 2 для вращающегося инструмента 3

В качестве базирующих в специальных конструкциях используют конические хвостовики конусностью 1:10 (угол конуса  $5^{\circ}43'29,3''$ ) с размерами фланца для торцового контакта по нормальному ряду (рис. 6.5).

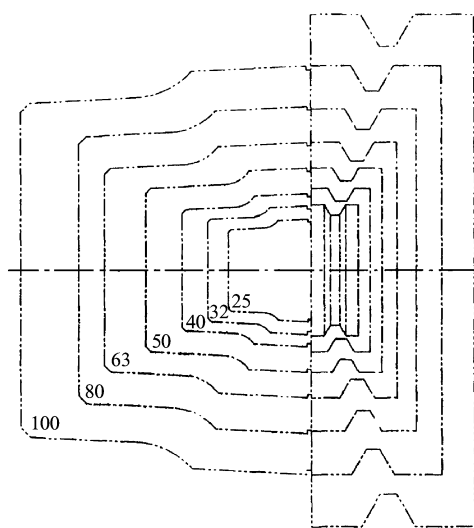


Рис. 6.5. Типоразмеры хвостовиков специальных конструкций

Это приближает эти конструкции к инструментальной оснастке с хвостовиками HSK и обеспечивает дальнейшую унификацию инструмента.

Унифицированы конструкции проходных, канавочных и расточных резцов (рис. 6.6) сверл и других инструментов. Сравнение размеров специальных конструкций и стандартных проходных резцов с главным углом в плане  $\varphi = 95^{\circ}$  приведено в табл. 6.12.

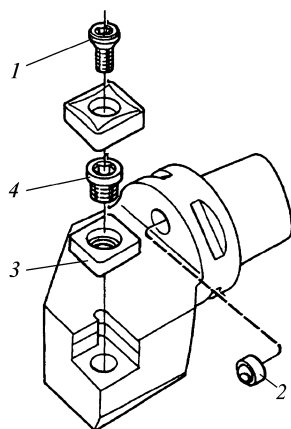


Рис. 6.6. Проходной резец SCLC с пластиной CCMT с хвостовиком «Сарто»:  
1 — винт; 2 — втулка для подвода СОЖ; 3 — подкладка; 4 — резбовая втулка

Таблица 6.12

**Сравнение размеров, мм, специальных конструкций  
и стандартных проходных резцов SCLC с  $\varphi = 95^\circ$**

$l$	$D$	$f_1$	$l_1$	$b$					
					$f_1$	$h$	$h_1$	$l_1$	$l_3$
9	32	22	40	12	16	12	12	80	19,5
	40	27	50						
	50	35	60	16	20	16	16	100	18,0
	63	45	65	20	25	20	20	125	18,0
12	32	22	40	20	25	20	20	122	25,0
	40	27	50						
	50	32	60	25	32	25	25	150	26,0
	63	45	65						

**Примечание:**  $l$  — длина режущей кромки.

Фирма Sandvik Coromant (Швеция) разработала хвостовик «Сарто», имеющий в сечении трехгранную форму с радиусными скруглениями (рис. 6.7). Такая форма получила название «РК-профиль» и отличается от обычных конусов следующими **преимуществами**:

- а) повышенная жесткость и надежность крепления;
- б) равномерное распределение напряжений при передаче крутящего момента  $M_{кр}$ ;
- в) более высокая жесткость при нагружении силой резания  $P_y$  при сопоставимой массе.



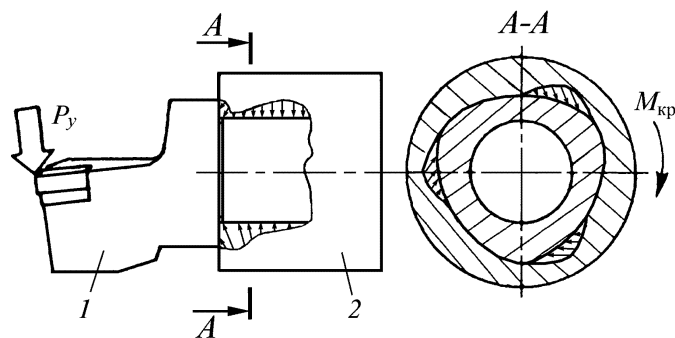


Рис. 6.7. Соединение «Coromant Capto»:  
1 — резец; 2 — резцедержатель

Для хвостовиков «Capto» принято кодирование по диаметрам фланцев 32 мм (код С3), 40 мм (код С4), 50 мм (код С5), 63 мм (код С6) и 80 мм (код С8).

Этими хвостовиками резцы 1 и другие специальные конструкции базируются и закрепляются в резцедержателях 2 (рис. 6.8). На первом этапе закрепления (рис. 6.8, а) тяга 3 с сегментами 4 входит в отверстие хвостовика. После перемещения в обратном направлении тяга 3 своей тороидальной поверхностью раздвигает сегменты 4 до их взаимодействия с расточкой специального профиля. Дальнейшее перемещение тяги 3 приводит к упругой деформации хвостовика и к контакту торцовых поверхностей его фланца и резцедержателя (рис. 6.8, б). При соединении модулей используется также резьба 5 (рис. 6.8, а), в которую вворачивается стягивающий болт.

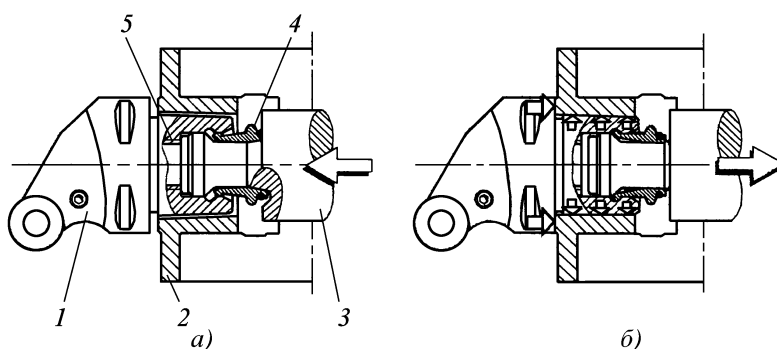


Рис. 6.8. Закрепление инструмента с хвостовиком «Capto»:  
1 — резец; 2 — резцедержатель; 3 — тяга; 4 — сегмент; 5 — резьба

При ручной смене инструмента с хвостовиками «Capto», например, в резцедержателях по ГОСТ 24900–81, для перемещения тяги 3 (см. рис. 6.8) применяется эксцентриковый зажим (рис. 6.9), когда тяга 3 перемещается путем поворота кулачка.

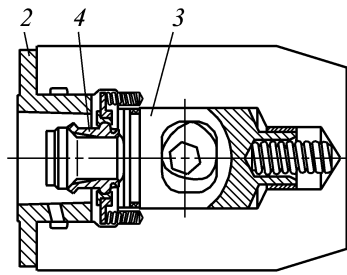


Рис. 6.9. Ручное закрепление хвостовиков «Сарто»  
(обозначение — см. рис. 6.8)

При автоматической смене используются специальные держатели с гидромеханическим закреплением хвостовиков «Сарто» (рис. 6.10 и табл. 6.13). К фланцу 1, служащему для фиксации держателя в револьверной головке, присоединяется цилиндр 2, в котором размещается тяга 3. На тяге 3 с помощью полуколец 5 устанавливаются сегменты 4, подпружиненные кольцом 6 или шестью цилиндрическими, или одной плоской пружиной 7. При подаче масла по стрелке Б (рис. 6.10, а) тяга 3 с сегментами 4 перемещается в отверстие хвостовика «Сарто», после подачи масла по стрелке А тяга 3 раздвигает сегменты 4 и закрепляет инструмент. Стрелками В показаны каналы отвода масла.

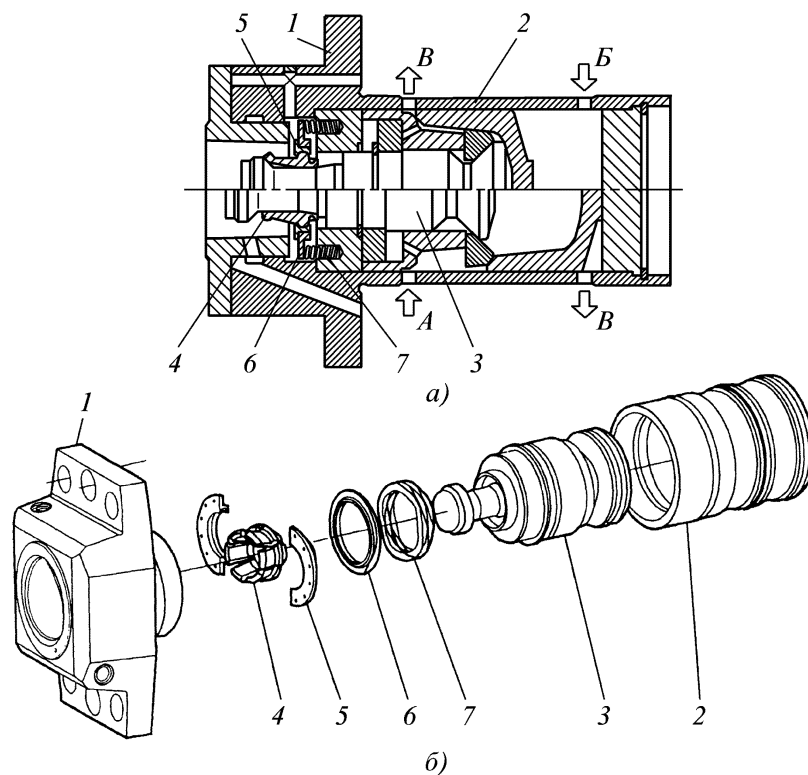
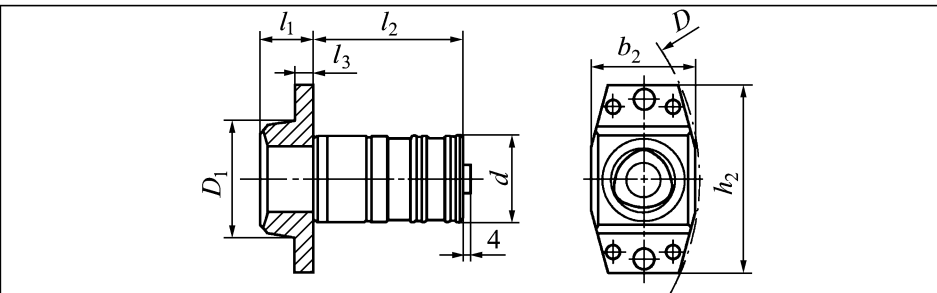


Рис. 6.10. Гидромеханическое закрепление хвостовиков «Сарто»:  
а — держатель в сборе; б — детали держателя

**Основные размеры, мм, держателя  
для гидромеханического закрепления хвостовиков «Сарто»**



Код	$b_2$	$D_1$	$D^*$	$h_2$	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$d$
С4	48	56	260	96	25	74	10	42
С5	64	70	300	112	35	88	12	55
С6	84	90	400	143	40	105	16	70
С8	100	110	500	180	50	120	20	90

\* Минимальный диаметр револьверной головки для встраивания держателя.

Для самостоятельного изготовления специального режущего инструмента фирма Sandvik Coromant поставляет заготовки с окончательно обработанными посадочными поверхностями хвостовика «Сарто» прошедшими термообработку и шлифовку. Передняя часть заготовки позволяет легко произвести механическую обработку, так как изготавливается из стали типа 25ХМ4 с твердостью 270–325 НВ, допускающей последующую закалку и отпуск. Термическая обработка после механической обработки выполняется путем местного индукционного нагрева (рис. 6.11).

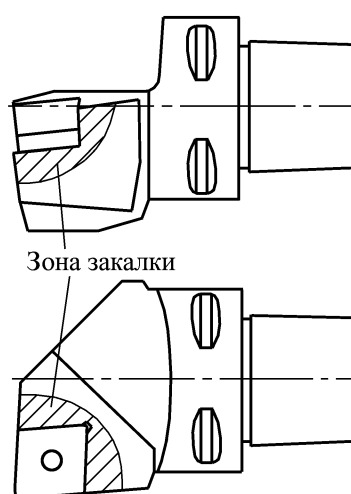


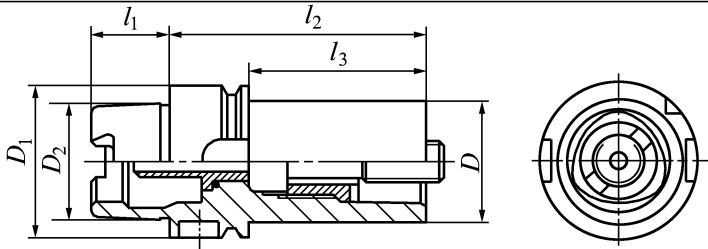
Рис. 6.11. Термообработка заготовок инструмента с хвостовиком «Сарто»

Для обеспечения твердости только поверхностного слоя применяют индукционную закалку токами высокой частоты, а для объемной закалки — токи средней частоты. Максимальную твердость порядка 50 HRC можно получить при следующих режимах термообработки: температура закалки — 840–870 °С, охлаждение со средней скоростью в соляной ванне, отпуск — 75 мин при температуре 200 °С.

Для установки инструмента «Coromant Capto» в шпинделях с конусом HSK станков с ЧПУ фрезерной и сверлильно-расточной групп применяют специальные переходники, основные размеры которых приведены в табл. 6.14.

Таблица 6.14

**Конструкция переходника  
для крепления инструмента «Coromant Capto» в шпинделях  
с конусом HSK, мм**

								
				Конус шпинделя по DIN 69893 HSK-A	Код хвостовика «Capto»	D	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>
40	C3	32	40	30	20	65	45	
50		32	50	38	25	75	49	
63		32	63	48	32	75	49	
80		32	80	60	40	80	54	
100		32	100	75	50	80	51	
50	C4	40	50	38	25	80	54	
63		40	63	48	32	80	54	
80		40	80	60	40	90	64	
100		40	100	75	50	90	61	
63	C5	50	63	48	32	90	64	
80		50	80	60	40	95	69	
100		50	100	75	50	100	71	
80	C6	63	80	60	40	110	84	
100		63	100	75	50	110	81	
100	C8	80	100	75	50	120	91	

Наряду с хвостовиком «Capto» применяются специальная конструкция «KM WIDAFLEX», созданная совместно фирмами Kennametal (США) и WIDIA (Германия) и конструкция под названием «Maxiflex UTS» выпускается фирмой

CERATIZIT (Люксембург). В частности, система инструмента «TIZIT Maxiflex UTS-MIY» поставляется для оснащения токарно-фрезерных станков «Mazak Integrex» типоразмеров 100, 200, 300, 400, Y и SY японской станкостроительной фирмы Yamazaki Mazak. Применение инструмента со специальными хвостовиками обеспечивает существенную экономию площадей, занимаемых станками. Высокая повторяемость положения режущих кромок позволяет сократить количество измерительных переходов, подналадок и смен инструмента.

Закрепление хвостовиков «KM WIDAFLEX» осуществляется автоматически или вручную. Схематически процесс ручного закрепления показан на рис. 6.12.

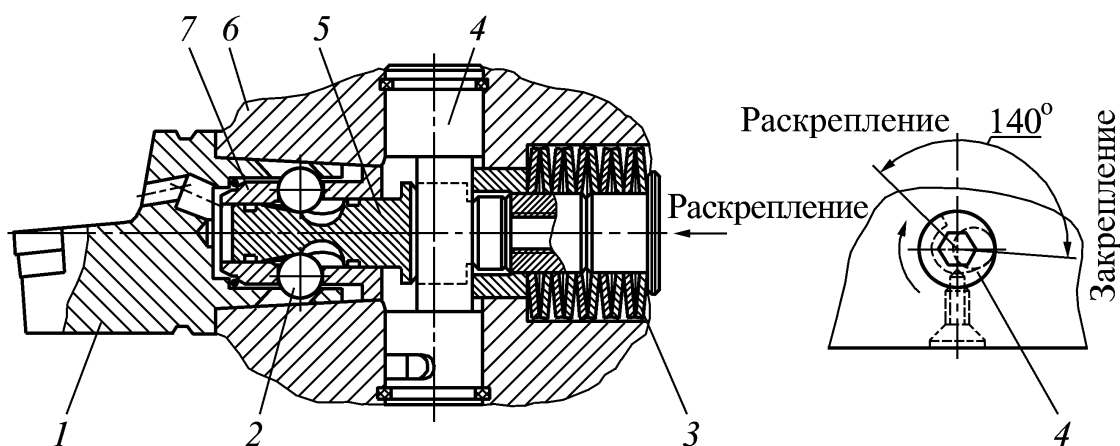


Рис. 6.12. Ручное закрепление хвостовиков «KM WIDAFLEX»

В положении «раскрепление» запорный стержень 5 посредством гидравлического толкателя (по стрелке) или путем поворота эксцентрика 4 перемещается в направлении резца 1. Шарики 2, свободно размещенные в выталкивателе 7, попадают в углубления запорного стержня и не препятствуют размещению хвостовика резца 1 в коническом отверстии резцедержателя 6.

Для перехода в положение «закрепление» необходимо или повернуть эксцентрик 4 на  $140^\circ$ , или отвести гидравлический толкатель. Усилие закрепления создается пакетом тарельчатых пружин 3. В результате запорный стержень 5 своими скосами выталкивает шарики 2 в отверстия диаметром  $d_5$  (табл. 6.15). За счет наклона этих отверстий происходит подтяжка хвостовика резца 1 на торец резцедержателя 6. Окончательная сила закрепления определяется пакетом пружин 3.

Существенно важно, что хвостовик, имеющий прорезь шириной  $b_1$  (см. табл. 6.15), упруго деформируется, что гарантирует полный контакт по всем коническим поверхностям.

## Основные размеры, мм, хвостовика «KM WIDAFLEX»

$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	$l_1$	$l_2$ , не более	$l_3$	$l_4 \pm 0,1$	$l_5$
25	22,00	14,3	20	6,5	16	8	7,9	4,5	2,25
32	26,96	17,7	24	7,5	20	10	10,8	4,9	2,25
40	36,90	21,0	30	9,5	25	12	13,6	5,9	2,25
50	42,70	28,2	40	12,5	32	16	17,2	8,9	3,75
63	55,70	35,2	50	14,5	40	18	22,4	9,9	3,75
80	72,70	48,0	64	18,0	45	20	25,0	11,0	3,75
100	92,70	62,0	82	20,0	50	22	26,7	11,0	3,75
$d_1$	$l_6$	$l_7$	$l_8$	$b_1$	$B_2$	$t$	$r_1$	$r_2$	
25	2,8	4,0	5,5	8,2	1,0	1,50	0,5	3,0	
32	2,8	4,8	8,0	9,0	1,5	1,50	0,5	3,0	
40	2,8	6,0	11,0	10,0	2,0	1,50	0,5	4,0	
50	5,8	8,5	12,0	14,0	2,0	3,65	1,0	4,0	
63	5,8	9,3	18,0	16,0	2,0	3,65	1,0	4,0	
80	5,8	10,0	18,5	20,0	2,5	3,65	1,0	6,0	
100	5,8	13,0	19,0	24,0	2,5	3,65	1,0	6,0	

Специальные конструкции хвостовиков «Сарто», «KM WIDAFLEX» и «Maxiflex UTS» предназначены для работы в самых различных условиях. На рис. 6.13 показаны характерные области нагрузок для чистовой (F), получистовой (M), легкой черновой (LR), черновой (R) и тяжелой черновой обработки (HR). Для обработки легированных сталей резцами с твердосплавной ромбической СМП с главным углом в плане  $\varphi = 95^\circ$  максимальная тангенциальная сила резания  $P_y$  для хвостовика с размером 32 имеет значение (с запасом на ее рост по мере износа режущей кромки) порядка 8 кН и соответствует  $t = 7,5$  мм

и  $S_0 = 0,5$  мм/об. Из рис. 6.13 следует, что инструмент с хвостовиком типоразмера 32 можно без ограничений использовать для чистовой ( $F$ ) и получистовой ( $M$ ) обработки. Для легкой черновой обработки ( $LR$ ) этот инструмент применяется ограниченно.

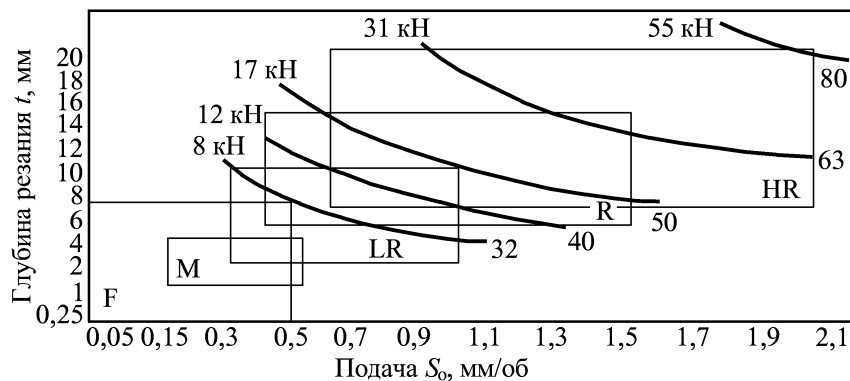


Рис. 6.13. Режимы резания и максимально допускаемые силы резания в зависимости от типоразмера хвостовика специальной конструкции

На режимы резания инструментом со специальными хвостовиками влияет вылет резцов из резцедержателя. На рис. 6.14 показано, как необходимо уменьшить площадь сечения среза ( $t \times S_0$ ), если по условиям наладки необходим удлиненный инструмент.

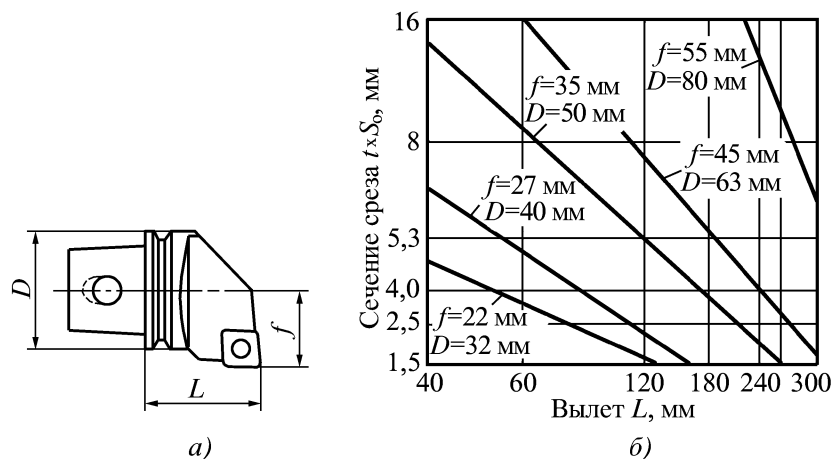


Рис. 6.14. Зависимость сечения среза  $t \times S_0$  от вылета  $L$  резца с хвостовиком специальной конструкции:  
 а — резец; б — диаграмма зависимости

## ГЛАВА 7. ДИАГНОСТИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ИНСТРУМЕНТА

Определение состояния ТС и ее элементов осуществляется с помощью систем диагностирования. Целью диагностирования является поддержание установленного уровня надежности, обеспечение требований безопасности и эффективности использования ТС. В ряде случаев диагностирование не только поддерживает, но и повышает надежность ТС [60].

### 7.1. Разработка систем диагностирования

Исходным является измерение отклонений основных входящих параметров, наиболее существенно влияющих на изменение выходного параметра. Измерения могут выполняться периодически после завершения технологической операции или перехода и непрерывно в течение процесса обработки. *Периодические измерения*, как правило, не решают задачи обнаружения значительных отклонений, приводящих к отказам, так как быстропротекающие процессы могут привести к отказу за время, меньшее периода измерения. Поэтому предпочтительными являются *непрерывные измерения*. Поскольку непрерывные измерения чаще всего невозможно осуществить прямыми методами, то применяют косвенные методы измерения.

*Косвенные измерения* — это измерения, при которых искомое значение величины отклонения находят на основании известной зависимости между этой величиной и величиной, доступной для измерения в процессе обработки. Косвенные методы определения отклонений входящих параметров возможны после выявления признаков этих отклонений. В качестве признаков часто используются параметры физических процессов внутри работающего объекта, содержащие определенный объем информации о его техническом состоянии. Эти параметры измеряются также косвенными методами. Например, используются электрические методы измерения неэлектрических величин, генерирования электрических сигналов в датчиках — преобразователях.

Так как системы диагностирования устанавливаются на автоматизированном технологическом оборудовании, то и диагностирование должно осуществляться в автоматическом режиме. Достигается автоматическое определение состояния ТС (ее элементов) и автоматическое определение выходных параметров. Средства достижения в общем виде представлены на рис. 7.1.



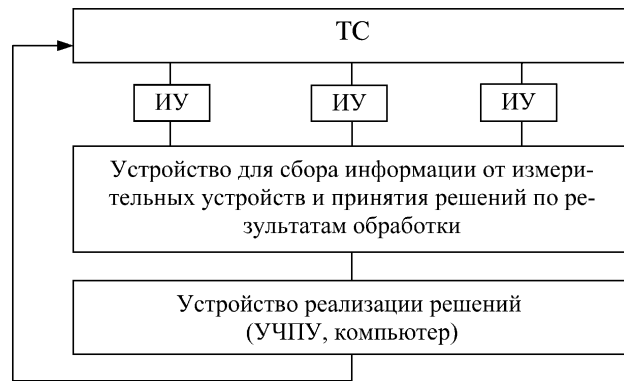


Рис. 7.1. Структура средств автоматического определения состояния технологической системы

В зависимости от решаемой задачи в состав этих средств входят различные измерительные устройства (ИУ), состоящие из первичных датчиков преобразователей диагностических признаков состояния технологической системы и электронного блока для первичной обработки сигналов датчиков, устройства сбора и обработки информации от ИУ и принятия решений по результатам обработки (устройство принятия решений — УПР) и, наконец, устройства реализации решений. В качестве последнего, как правило, используется либо устройство ЧПУ (УЧПУ), либо компьютер, входящие в состав современной системы управления станком.

Таким образом, функции обеспечения надежной эксплуатации технологической системы в «безлюдном режиме» возлагают на систему контроля, диагностирования и принятия решений, заменяющую сенсорно-моторную деятельность человека-оператора.

Разделяют два направления диагностирования: предэксплуатационное и в процессе эксплуатации (рис. 7.2).



Рис. 7.2. Направления диагностирования

*Предэксплуатационное диагностирование* осуществляется на специальных автоматизированных стендах, создаваемых на базе диагностируемого технологического оборудования.

Для комплексного диагностирования эти стенды оснащаются целым рядом разнообразных датчиков для измерения физических величин, сопровождающих обработку.

При испытании новых металлорежущих станков выполняется предэксплуатационное диагностирование с целью выявления недостаточно надежных деталей и узлов, требующих доработки конструкций и определения критериев состояния оборудования. На стендах отрабатываются новые конструкции режущего инструмента, определяются оптимальные варианты инструментального материала и геометрии инструмента для заданных условий обработки, а также решаются задачи сертификации инструмента. Наконец, для каждой технологической системы разрабатывается система эксплуатационного диагностирования. Для этого выполняются все необходимые исследования, позволяющие:

- а) определить критерии состояния объекта и решить вопрос, что измерять;
- б) разработать технологию измерения и решить вопрос, как измерять.

Это позволяет составить алгоритм диагностирования технологической системы или ее элементов.

Необходимость *диагностирования при эксплуатации* вызвана также тем, что наработка до отказа технологической системы и ее элементов является случайной величиной. Диагностирование обеспечивает своевременное прекращение работы станка за счет оперативного определения состояния отказа.

В соответствии с составленным алгоритмом в производственное технологическое оборудование устанавливаются те датчики, необходимость в которых установлена на стенде. Информация от датчиков передается в устройство реализации решений с помощью разработанного интерфейса.

Системы диагностирования должны удовлетворять ряду **требований**, основные из которых следующие:

- а) удобство и простота применения в производственных условиях;
- б) осуществление процесса диагностирования в минимальное время;
- в) необходимая достоверность.

В процессе эксплуатации технологической системы диагностирование решает различные задачи в зависимости от вида обработки. При черновой и получистовой обработке диагностируются функциональные отказы, когда значительна доля отказов инструмента из-за хрупкого разрушения и катастрофического износа. При окончательной обработке деталей должна обеспечиваться

параметрическая надежность за счет диагностирования выходных параметров, какими являются показатели качества обработки. Отказы должны предупреждаться в процессе окончательной обработки, а не после изготовления деталей.

Доминирующим повреждением, перекрывающим значительную долю резерва точности технологической системы, часто оказывается размерный износ или выкрашивание режущего инструмента (см. гл. 1). Поэтому большинство применяемых на производстве систем диагностирования распознают текущее состояние и отказ инструмента.

Разнообразные условия эксплуатации, вызывающие различные виды повреждений и причины отказов инструмента, определяют различные алгоритмы диагностирования. Однако общность решаемых задач позволяет осуществить единый научно-методический подход, который лежит в основе разработки систем диагностирования. Он состоит в очередности выполнения следующих **этапов работ**.

1. На базе теоретических и экспериментальных исследований выявляют возможные в процессе эксплуатации изменения в состоянии инструмента; определяют *критерий состояния инструмента* и *критерий отказа*. В качестве критерия состояния принимается параметр инструмента, однозначно и полно при данных условиях характеризующий текущее состояние инструмента и способный отображаться с помощью принятых диагностических признаков. Это может быть величина, определяющая очаг износа или выкрашивания, нарост и др. Предельное значение этой величины — критерий отказа.

2. Экспериментально из числа параметров процесса резания выявляют косвенные диагностические признаки возможных изменений в состоянии инструмента и критерия отказа. В результате анализа выделяют наиболее информативный диагностический признак (здесь и далее — косвенный диагностический признак).

3. Описывают связи между критерием состояния инструмента и диагностическими признаками состояния на основе исследований отображения изменения критерия состояния в диагностических сигналах из зоны резания. Разрабатывают диагностические модели, которые могут иметь или детерминированный, или стохастический характер. Диагностическая модель устанавливает связь между состояниями объекта и их отображениями в диагностических сигналах.

4. Разрабатывают алгоритм и программное обеспечение системы диагностирования.

5. Разрабатывают аппаратную реализацию алгоритма диагностирования.

Таким образом, при решении задачи диагностирования процесса и инструмента осуществляется системный подход. Объект разработки рассматривают как систему связанных между собой областей знаний, приобретаемых в определенной последовательности. Принятый методический подход к разработке систем диагностирования служит в то же время планом изучения диагностики как области знаний.

Из приведенного перечня работ следует, что большую их часть составляют исследования в области теории резания, которая при разработке систем диагностики в металлообработке приобретает особую значимость. Естественно, что эти исследования основаны на ранее накопленных знаниях. Но чаще для конкретных процессов и инструментов появляются новые задачи диагностирования.

## **7.2. Диагностирование процесса резания**

Систему диагностирования процесса резания следует рассматривать как совокупность режущего инструмента и средств его диагностирования. Характер возможных изменений состояний инструмента предопределяет алгоритм диагностирования и структуру системы.

На автоматизированных станках применяют различные виды и типы инструмента. Наибольшее распространение получили резцы, сверла и торцовые фрезы с механическим креплением СРП, сверла, метчики и концевые фрезы, вышлифованные из твердосплавных стержней. Для них известны общие закономерности развития очагов износа, изменения структуры и свойств в режущей части инструмента в зависимости от его служебного назначения и режимов резания. В справочниках и каталогах фирм даются допускаемые величины износа.

Однако при эксплуатации конкретных инструментов наряду с общими закономерностями изнашивания возникают в зависимости от условий резания свои особенности в изменении состояния инструмента, часто и приводящие к его отказу. Справочные значения допускаемых износов и критериев отказа существенно отличаются от тех, при которых следует заменять инструмент по экономическим соображениям.

В связи с этим для обеспечения надежного диагностирования необходимо прежде всего изучить изменения в состоянии инструмента в конкретных условиях его эксплуатации, выявить такой изменяющийся параметр, который может служить критерием состояния и критерием отказа инструмента.

Ряд параметров характеризует начальное состояние инструмента. В процессе резания изменение любого из них в конечном счете отображается в росте интенсивности изнашивания или выкрашивания. Поэтому в качестве критерия

состояния принимают какой-либо из размеров очага износа или выкрашивания. Предельное значение этих размеров, при которых начинается разрушение режущей части или нарушаются установленные технической документацией требования обработки, принимают в качестве критерия отказа.

При оптимальных условиях эксплуатации инструмента, имеющего оптимальные параметры начального состояния, доминирующим является отказ из-за изнашивания рабочих поверхностей. В этом случае в качестве критерия состояния должна быть выбрана такая мера очага износа, которая будет удовлетворять следующим **требованиям**:

а) однозначно во всех стадиях изнашивания вплоть до отказа отображать изменения в состоянии инструмента как по геометрии режущей части, так и по свойствам инструментального материала;

б) монотонно возрастать в зоне нормального изнашивания;

в) быть удобной для точных измерений;

г) информативно отображаться параметрами процесса резания, принятыми в качестве диагностических признаков.

Контроль повреждений в инструменте для диагностирования его состояния, как указывалось выше, может производиться периодически или непрерывно. Периодический контроль связан с прямыми методами измерения геометрических параметров инструмента, с помощью которых могут быть определены: поломка, скалывание, износ режущего участка. Измерения могут осуществляться в рабочей зоне станка с прерыванием цикла обработки либо в специальной позиции инструментального магазина.

Однако предпочтение отдают по причинам, указанным ранее, косвенным методам измерения, выполняемым в процессе резания.

В связи с этим вторым этапом методического подхода к разработке систем диагностирования является определение косвенных диагностических признаков состояния инструмента. При этом признаки выявляются экспериментально. Однако установленная взаимосвязь процессов в объектах, участвующих в резании, взаимосвязь параметров, характеризующих эти процессы, позволяют осознанно ограничивать рамки экспериментов.

При резании взаимодействие инструмента с обрабатываемым материалом вызывает два одновременно протекающих процесса: разрушение обрабатываемого материала и разрушение режущего инструмента. Результатом разрушения обрабатываемого материала является образование стружки и поверхностного слоя детали, которые характеризуются параметрами состояния. Значения параметров определяются условиями резания.

Разрушение инструмента проявляется в виде изнашивания его рабочих поверхностей или выкрашивания (сколов) режущей части, что изменяет параметры начального состояния инструмента. Изменяется его геометрия, а вместе с ней основные *параметры состояния стружки и поверхностного слоя детали*. В свою очередь, параметры состояния стружки и детали влияют на особенности разрушения инструмента и параметры его состояния.

Среди параметров, за которыми устанавливают непрерывный контроль (мониторинг), — наблюдение за развитием во времени, это износ, скальвание, поломка инструмента, форма стружки, нарост, шероховатость, размер детали и др.

Помимо взаимосвязанных между собой параметров состояния стружки, детали и инструмента процесс резания характеризуется *функциональными параметрами*. Из этих параметров особое место занимает сила резания  $R$ . Она появляется при заданном кинематикой резания относительном движении инструмента и обрабатываемой заготовки. Поэтому сила ровно такая, которая необходима для преодоления сопротивления этому движению — сопротивления разрушению срезаемого слоя и трения, возникающего в движении.

Любые изменения условий резания, вызванные изменением параметров состояния инструмента и стружки, приводят к изменению силы. При этом в связи с нестационарностью процесса резания могут изменяться не только среднее значение силы и направление ее действия  $\bar{R}$ , но и амплитуда  $A_R$ , и частота ее колебания  $f_R$ .

Сила  $\bar{R}$  едина для процессов разрушения обрабатываемого материала и инструмента. Она определяет необходимую для резания работу и мощность. Единицы источники тепла  $Q$ , возникающие вследствие превращения механической энергии в тепловую и создающие различные определяемые температурой  $\theta$  и температурными полями тепловые условия процессов. Так же как и сила, источники тепла, а вслед за ними и температурные поля чувствительны к изменениям условий резания и параметров состояния инструмента, стружки и детали.

Взаимосвязь этих параметров (рис. 7.3) используется при решении конкретных задач диагностики. Так, при диагностировании инструмента, когда в качестве параметра его состояния принята какая-либо мера очага износа, диагностическими признаками ее величины, обладающими большей или меньшей информативностью, могут быть несколько или один из параметров состояния детали, стружки, а также функциональных параметров процесса резания. Предельные допускаемые значения этих параметров могут служить критериями отказа инструмента. Укрупненно возможные диагностические признаки состояния инструмента, стружки и детали показаны в табл. 7.1. Естественно, что для

диагностирования используются наиболее информативные диагностические признаки, которые выявляются экспериментальным путем (в табл. 7.1 они отмечены «+»).

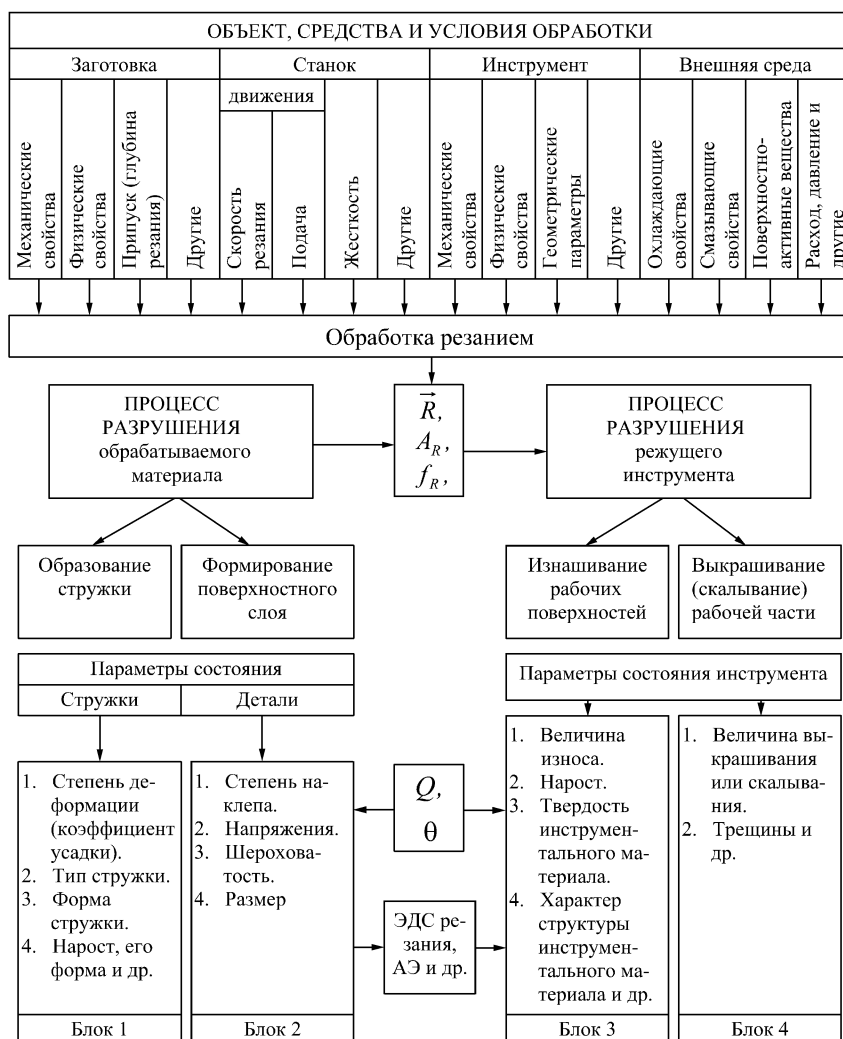


Рис. 7.3. Взаимосвязь параметров в процессе резания

Таблица 7.1

### Диагностические признаки состояния объектов процесса резания

Объекты диагностирования	Диагностические признаки			
	Параметры состояния			Функциональные параметры процесса
	инструмента	стружки	детали	
Параметры состояния детали	+	-	-	+
Параметры состояния стружки	+	-	-	+
Параметры состояния инструмента	-	+	+	+

Кроме рассмотренных параметров в качестве диагностических признаков используют сигналы различных физических явлений, сопровождающих процесс резания. Это, прежде всего, параметры колебаний в широком диапазоне частот, начиная с акустико-эмиссионных (АЭ); электрические параметры (например, ЭДС); параметры магнитных полей в зоне резания и др. Все они отображают контактные процессы при резании, разрушение инструмента и обрабатываемого материала.

В основе диагностирования состояния инструмента лежит предположение об обратимости зависимости между параметром его состояния и другими параметрами, являющимися его косвенными диагностическими признаками  $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n$ .

При заданных условиях надежность диагностирования зависит от информативности диагностического признака  $\Pi_i$ . Под информативностью понимается отношение величины его изменения  $\Delta\Pi_i$  к величине изменения параметра состояния  $\Delta U_i$ . При этом в связи с нестационарностью процесса резания значение  $\Pi_i$  может колебаться около среднего значения с определенной амплитудой и частотой. Для расчета информативности принимаются средние значения  $\Pi_i$ . Наиболее информативные из ряда диагностических признаков те, которые имеют большую величину отношения  $\xi$ :

$$\xi = \frac{\Delta\Pi_i}{\Delta U_i}.$$

Из рис. 7.4 видно, что диагностический признак  $\Pi_1$  является более информативным, чем  $\Pi_2$ . Если один диагностический признак отображает состояние инструмента, то диагностирование, построенное на этой основе, следует назвать однопараметрическим.

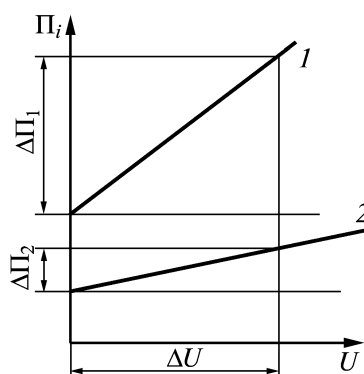


Рис. 7.4. Определение информативности диагностического признака



Зависимость  $\Pi = f(U)$ , полученная для определенных условий, позволяет выявить текущее значение критерия состояния и предельное его значение, но при тех же условиях резания. Если эти данные необходимо получать при различных условиях, например, при различных режимах, то должна использоваться более сложная зависимость —  $\Pi = f(U, v, S, t)$ , поскольку принятый диагностический признак зависит обычно не только от  $U$ , но и от режима резания.

Действия по выявлению повреждений в инструменте, определению их места и признаков повреждений могут быть отображены в алгоритме диагностирования.

Эти действия являются подготовкой к завершающему этапу диагностирования — к проверке соответствия критерия состояния инструмента определенному заданному значению или проверке соответствия диагностического признака заданному значению (уставки). Этим этапом алгоритма диагностирования является контроль технического состояния инструмента, т.е. определение вида его состояния: исправное, неисправное, работоспособное, неработоспособное. По результатам контроля принимается решение по управлению процессом обработки инструментом. Таким образом, контроль в этом случае следует рассматривать как составную и завершающую часть технического диагностирования. Этап распознавания состояния инструмента и принятие решения о его эксплуатации может быть описан алгоритмом контроля, выделенным в общем алгоритме диагностирования.

На рис. 7.5 приведен алгоритм диагностирования инструмента с выделенным в его составе алгоритмом контроля. Решение задачи диагностирования инструмента по этому алгоритму осуществляется в следующей последовательности [60].

1. На базе теоретических и экспериментальных исследований выявляют возможные в процессе эксплуатации изменения в состоянии инструмента; определяют **критерии его состояния  $U$  и отказа  $[U]$** . В качестве критерия состояния принимают параметр инструмента, однозначно и полно при данных условиях характеризующий текущее состояние инструмента и способный отображаться с помощью принятых диагностических признаков. Это может быть величина, определяющая очаг износа, выкрашивания, нарост и др. Предельное допускаемое значение этой величины — *критерий отказа*. При предварительной обработке детали отказ инструмента является *функциональным*, а при окончательной — *параметрическим*.

2. Основным действием при определении состояния инструмента является измерение размеров очага повреждения режущего лезвия как критерия состояния инструмента. Измерения могут выполняться периодически после

завершения технологической операции и непрерывно в течение процесса обработки. Периодические измерения часто не решают задачи обнаружения значительных повреждений, приводящих к отказу, так как быстропротекающие процессы, вызывающие повреждения, могут привести к отказу за время, меньшее чем машинное время  $T_{\text{маш}}$ .

Предпочтительнее осуществлять непрерывные измерения. Однако непрерывные измерения невозможно осуществить прямыми методами из-за того, что доступ к повреждениям во время работы закрыт. Поэтому применяют косвенные измерения, для чего экспериментально из числа функциональных параметров процесса резания или параметров физических явлений, сопутствующих резанию, выявляют косвенные **диагностические признаки П** возможных изменений в состоянии инструмента — критерия состояния и критерия отказа.

3. Описывают связи между критерием состояния инструмента и диагностическими признаками состояния на основе исследования отображения изменений критерия состояния в диагностических сигналах датчиков процессов. Выявляют в результате анализа наиболее информативный диагностический признак П. Получают **диагностическую модель**, устанавливающую связь между состоянием инструмента и его отображением в диагностических сигналах  $U = f(\Pi)$ . По этой зависимости определяют уставку  $[\Pi_i]$  — значение диагностического признака, соответствующего установленному значению критерия отказа  $[U_i]$ . Все описанные действия и введение в память ЭВМ полученных значений  $[U_i]$  и  $[\Pi_i]$  называют обучением системы диагностирования.

4. Разрабатывают алгоритм и программное обеспечение контроля состояния инструмента.

5. Разрабатывают техническое обеспечение системы контроля состояния инструмента.

6. Выполняют действия по определению состояния инструмента в соответствии с алгоритмом контроля. Этот алгоритм является **технологическим алгоритмом диагностирования**.

Если работа инструмента происходит в таких условиях, когда результаты действий на всех этапах алгоритма, предшествующих контролю остаются неизменными, то значения  $[U]$ , например, допускаемого износа инструмента и уставки  $[\Pi]$ , один раз полученные в результате эксперимента, остаются постоянными при выполнении операций контроля. Изменение факторов, определяющих условия эксплуатации инструмента, таких как режимы резания, обрабатываемый материал и его свойства и др., может изменить не только причины отказа, но и расположение очагов повреждений на режущем лезвии, например, износа. Это приведет к изменению значений допускаемых повреждений  $[U]$ ,

информативных диагностических признаков и уставок [П]. Тогда для каждого возможного варианта условий эксплуатации необходимо выполнить работы в соответствии с алгоритмом, а полученные значения [U] и [П] поместить в базу данных для контроля. Переменные условия должны учитываться при разработке технического обеспечения, в частности при определении числа измерительных каналов.

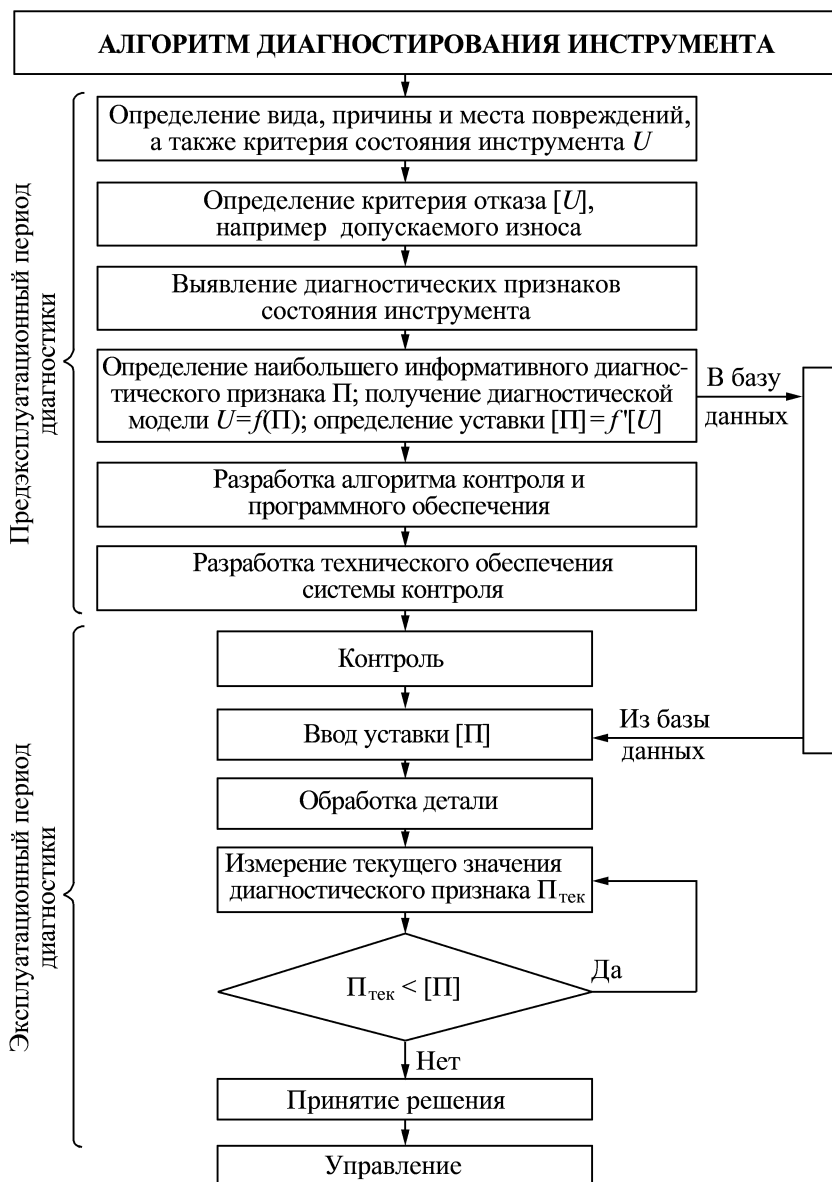


Рис. 7.5. Алгоритм диагностирования инструмента

Простой алгоритм контроля (как часть алгоритма диагностирования), представленный на рис. 7.5, содержит следующие **действия**:

- измерение текущего значения  $\Pi_{\text{тек}}$  диагностического признака;
- сравнение текущего значения  $\Pi_{\text{тек}}$  с уставкой  $[\Pi]$ ;
- принятие решения.

Для повышения надежности контроля алгоритм контроля по уставкам может быть усложнен за счет принятия решения о состоянии инструмента, например, по результатам сравнения изменения двух диагностических признаков. При этом диагностические технологии в ответственных случаях могут быть «избыточными», предусматривающими применение нескольких различных по физической природе методов контроля и соответствующих им контрольно-измерительных средств.

Из рассмотренного алгоритма следует, что диагностирование инструмента является процессом определения состояния инструмента, включающим в себя **два периода**:

- а) период предэксплуатационный, предшествующий контролю;
- б) период эксплуатационный — контроль.

Информация, полученная в результате контроля, используется (автоматически или путем принятия решения оператором) для выработки управляющих (регулирующих) воздействий на процесс обработки. Контроль подразумевает управление, так как всякий контроль активен и в каждой системе управления функция контроля является основной.

Алгоритм диагностирования, приведенный на рис. 7.5, относится к случаям, когда определение состояния инструмента осуществляется путем косвенных измерений повреждений инструмента по различным диагностическим признакам. При прямых методах измерений повреждений, естественно, отпадает необходимость выполнения ряда действий, указанных в общем алгоритме. Тогда определение состояния инструмента сводится только к контролю скалывания или поломки режущей части инструмента.

В ряде случаев для повышения достоверности диагноза необходимо обеспечить *многопараметрическую диагностику*. Причин, приводящих к этому, может быть несколько. Например, при недостаточной информативности диагностических признаков их дублируют или используют дополнительный диагностический признак, исключая влияние доминирующего случайного возмещающего фактора процесса резания, существенно искажающего результаты диагностирования инструмента.

Из теории резания известно, что сила сопротивления движению режущего инструмента относительно обрабатываемой заготовки складывается из следующих **составляющих**:

- а) сопротивление пластическому деформированию и разрушению металла в зоне стружкообразования и в поверхностном слое детали;
- б) сопротивление стеканию (трению) стружки по передней поверхности инструмента;

в) сопротивление образовавшейся стружки деформации изгиба и ломания;  
 г) сопротивление движению инструмента, возникающему на задних его поверхностях.

Суммирование всех этих составляющих приводит к появлению результирующей силы резания  $R$ .

Изменение каждой из перечисленных составляющих силы вызывается не только изменением факторов процесса резания, но и изменением при обработке соответствующих параметров состояния инструмента, детали и стружки. В связи с этим каждая составляющая может играть роль диагностического признака изменения связанного с ней параметра состояния.

Так, увеличение сопротивления движению инструмента на задней поверхности является признаком роста площадки износа на задней поверхности. Изменение при заданных факторах процесса сопротивления пластическому деформированию в зоне стружкообразования может быть вызвано износом передней поверхности. Образование лунки износа приводит к увеличению фактического переднего угла, изменяет форму застойной зоны, угол действия.

Однако измерение отдельно каждой из перечисленных составляющих силы связано с большими трудностями. Зато доступны для измерения составляющие силы  $R$ , разложенной по координатным осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , среднее значение вектора  $\bar{k}$ , амплитуда  $A_R$  и частота  $f_R$  его колебаний. Эти параметры несут значительную информацию из зоны резания и могут быть использованы как диагностические признаки состояния инструмента и стружки.

Возможные варианты использования силовых диагностических признаков для различных изменяющихся параметров состояния сведены в табл. 7.2.

Таблица 7.2

### Силовые диагностические признаки параметров состояния инструмента

Изменяющиеся параметры состояния	Диагностические признаки				
	$P_z$	$P_y$	$P_x$	$A_R$	$f_R$
Износ инструмента по задним поверхностям	±	+	+	+	–
Износ инструмента по передней поверхности	+	±	±	–	–
Выкрашивание или скалывание режущей кромки	+	+	+	–	–
Изменение формы стружки	–	±	±	+	±
Образование нароста	±	–	–	–	–

*Условные обозначения:* «+» — большая информативность диагностического признака; «±» — низкая информативность; «–» — отсутствие информации.

Взаимосвязь параметров состояния объектов процесса резания (см. рис. 7.3) позволяет осознанно подходить к выбору диагностических признаков диагностируемых параметров. Однако окончательное заключение о практическом применении того или иного признака можно сделать лишь путем сопоставления их информативности, выявленной в результате экспериментальных исследований. Только эксперимент при конкретных условиях резания позволяет учесть возможные, часто непредсказуемые особенности работы инструмента и взаимосвязи параметров его состояния с предполагаемыми диагностическими признаками.

Как видно из табл. 7.2, составляющие силы резания  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  являются информативными диагностическими признаками развития очага износа инструмента по задней поверхности  $h_3$ , что подтверждается экспериментальными зависимостями, приведенными на рис. 7.6. Графики зависимостей  $P_x = f(h_3)$  и  $P_z = f(h_3)$ , полученные при точении на скорости резания  $v = 102$  м/мин при отсутствии нароста на резце, обнаруживают достаточно высокую информативность составляющих силы  $P_x$  и  $P_z$ .

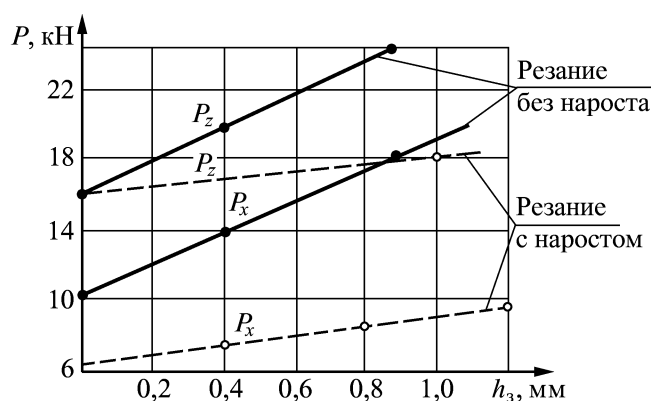


Рис. 7.6. Изменение  $P_x$  и  $P_z$  с ростом износа по задней поверхности  $h_3$  инструмента из твердого сплава: обрабатываемый материал — молибденовый сплав

Но если снизить  $v$ , то при прочих равных условиях информативность их существенно снижается. Объясняется это тем, что при меньших скоростях создаются условия, благоприятствующие образованию нароста. Нарост, нависая над задней поверхностью, уменьшает контакт площадки износа с поверхностью резания детали, а вместе с этим и рост составляющих сил, вызываемый износом  $h_3$ .

Использование силы резания как диагностического признака состояния процесса и инструмента основано на высоком уровне ее информативности.

В связи с этим разрабатываются специальные динамометры, встраиваемые в узлы и детали станков датчики. Их информативность существенно зависит от конструкции, а также от места расположения на станке датчика, преобра-

зующего значения параметров силы в аналоговые электрические сигналы. Выявление оптимального варианта требует специальных исследований, которые необходимо проводить при создании систем диагностирования. При разработке силоизмерительных датчиков следует учитывать конструктивные особенности станка, анализировать цепи силового замыкания.

На рис. 7.7 приведена схема сил, действующих на узлы и детали токарного станка, которая позволяет наметить места установки датчиков сил и определить их конструктивное решение. Подобные схемы применимы и для других станков.

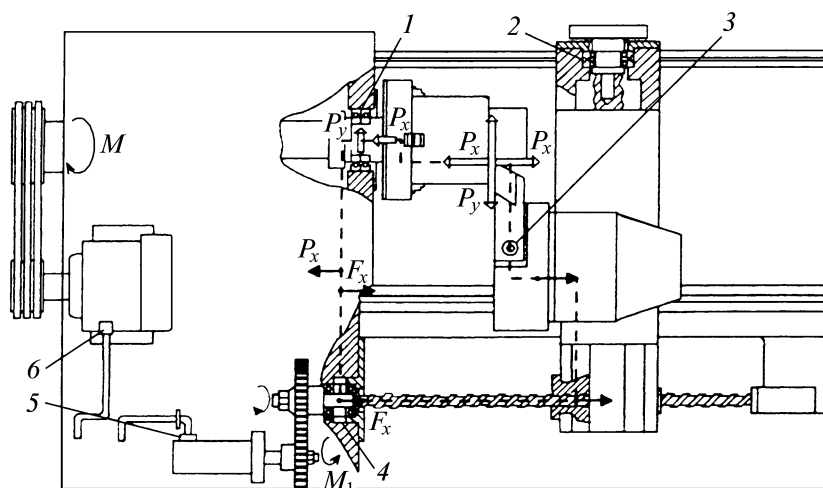


Рис. 7.7. Схема сил, действующих при резании на узлы токарного станка:  
 1 — тензометрический подшипник; 2, 4 — тензометрические опоры ходовых винтов;  
 3 — датчик силы в державке резца; 5, 6 — датчики мощности приводов

На токарном станке вертикальная составляющая силы резания  $P_z$ , действующая на заготовку диаметром  $D$ , перенесенная в центр заготовки (рис. 7.8), создает момент сопротивления резанию  $M_{c.p} = \frac{P_z D}{2}$ , который через систему передач преодолевается крутящим моментом электродвигателя. Между моментом на заготовке и моментом на валу двигателя существует функциональная связь, которая позволяет использовать двигатель как датчик силы. Эта же сила  $P_z$  в центре заготовки, перенесенная в центр передней опоры шпинделя, действует на нее, вызывая деформации деталей подшипника. Функциональная связь между силой и этими деформациями позволяет использовать подшипник как датчик силы. Используют также детали токарного патрона и центра задней бабки.

Сила  $P_z$  деформирует державку резца, опору вращения револьверной головки и опору шпинделя. В этих местах могут быть установлены датчики силы.

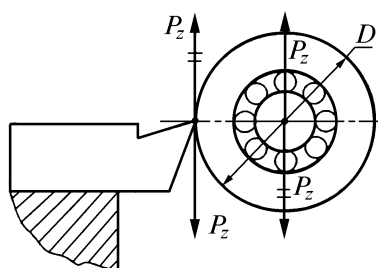


Рис. 7.8. Действие составляющей силы резания  $P_z$  на резец, деталь и передний подшипник шпинделя

Составляющая сила резания  $P_x$  действует в осевом направлении на передний радиально-упорный подшипник шпинделя, а ее реакция — на резец и резцовую головку. Силовое замыкание показано на рис. 7.6 штриховой линией и стрелками. Оно позволяет определить места расположения и конструкции датчиков для измерения  $P_x$ . При продольной подаче резца сопротивление перемещению суппорта преодолевается двигателем подачи. Он создает крутящий момент для вращения ходового винта, обеспечивающий на гайке тяговое усилие, необходимое для подачи суппорта. Опоры винта так же, как и двигатель подачи, могут быть использованы в качестве датчиков усилий. Аналогично определяются возможные места установки датчиков для определения составляющей силы резания  $P_y$ .

Датчики как первичные преобразователи являются неотъемлемыми элементами контрольно-измерительных систем и систем автоматического управления технологическими процессами. В датчиках обычно реализуются принципы электрических методов измерения неэлектрических физических величин. Основные типы датчиков представлены в табл. 7.3.

Таблица 7.3

### Датчики для измерения различных физических величин

Принцип действия	Физическая величина					
	Усилие	Перемещение	Скорость линейная	Ускорение	Вибрации	Температура
Емкостной	+	+	+	+	+	+
Термопарный	-	-	-	-	-	+
Термисторный	-	-	-	-	-	+
Тензорезисторный	+	-	-	-	-	-
Пьезоэлектрический	+	+	-	+	+	-
Индуктивный	+	+	-	-	-	-
Токовихревой	-	+	+	-	-	-
Эффект Холла	-	+	+	-	-	-



Колебания также используются для диагностирования состояния процесса резания и инструмента. Диагностика основана на измерении параметров колебаний элементов упругой системы станка в широком частотном диапазоне. Колебания условно разделяют на три диапазона частот: *низкочастотный*, частота до 1 кГц; *среднечастотный* — от 1 кГц до 50–80 кГц; *высокочастотный* — свыше 80–100 кГц. Среднечастотные колебания обычно называют **виброакустическими**, а высокочастотные — **акустической эмиссией** (АЭ).

Источниками возбуждения низкочастотных колебаний упругой технологической системы являются различные **периодические процессы**:

- а) биение вращающихся тел (шпинделя, зубчатых колес и др.);
- б) прерывистое резание, например, при фрезеровании;
- в) периодичность образования элементов стружки и нароста.

Источником возбуждения виброакустических колебаний в среднечастотном диапазоне являются периодичность образования элементов стружки, сложное фрикционное взаимодействие инструмента с обрабатываемым материалом и др.

Виброакустические колебания являются следствием взаимодействия физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов, макро- и микрогеометрии инструмента, динамических характеристик технологической системы, режимов резания и др. Изменение хотя бы одного из перечисленных факторов приводит к изменению частоты виброакустических колебаний.

Износ режущего инструмента приводит не только к изменению его геометрии, но и вызывает изменение процессов, влияющих на виброакустические колебания. Так, могут изменяться пластические деформации при стружкообразовании и деформации поверхностного слоя детали, изменяются условия наростообразования и скорость движения стружки по передней поверхности, контактные процессы и свойства инструментального материала. В связи со случайным характером влияния всех этих процессов и факторов на виброакустические колебания, а также в связи со случайным характером самого изнашивания частота  $f_R$  и амплитуда  $A_R$  виброакустических колебаний корреляционно связаны с состоянием режущего инструмента.

Действительно, в случае большего отставания (сплошные линии графика  $R = f(A_R)$  на рис. 7.9) сила отталкивания в точке  $Z$  будет больше, чем сила в точке  $Z'$  при меньшем отставании (пунктирная линия). Большая сила вызовет большую амплитуду самовозбуждающихся колебаний.

Типичная зависимость математического ожидания амплитуды виброакустического сигнала от износа инструмента на задней поверхности представлена на рис. 7.10, а, где сплошная линия показывает изменение математического

ожидания амплитуды колебаний  $mA_R$ , а пунктирные линии определяют границы ее разброса. Существенный рост  $mA_R$  после достижения определенной величины износа позволяет использовать амплитуду виброакустического сигнала для диагностики инструмента.

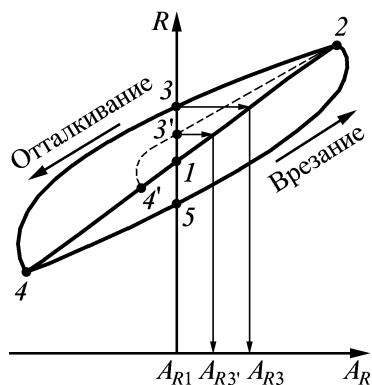


Рис. 7.9. Схема изменения амплитуды самовозбуждающихся колебаний при изменении контактных процессов

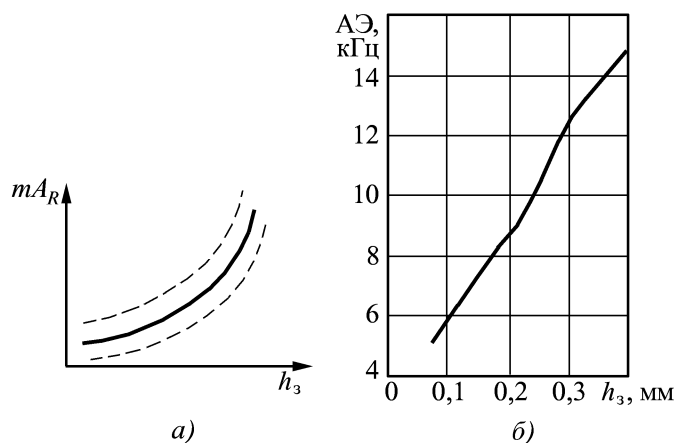


Рис. 7.10. Влияние износа  $h_3$ :

*a* — на математическое ожидание амплитуды  $mA_R$  виброакустического сигнала; *б* — на частоту АЭ

Источником акустической эмиссии из зоны резания являются процессы трения и деформирования. АЭ представляет собой упругую энергию, мгновенно высвобождающуюся в материале при разрушении. Высокочастотные колебания возникают также в результате соударения микронеровностей контактирующих поверхностей, разрыва адгезионных связей, образования макро- и микротрещин, движения дислокаций. Эти процессы генерируют упругие волны, распространяющиеся по инструменту, обрабатываемой детали и деталям станка. Они отображаются постоянной составляющей сигнала АЭ.

Изменение в характере протекания процессов вызывают изменение параметров сигналов АЭ. Причинами этого могут быть нарушение образования и схода стружки, увеличение контактных площадок на рабочих поверхностях инструмента в связи с его изнашиванием.

На рис. 7.10, б показана зависимость  $AЭ = f(h_3)$ , полученная при точении стали 30ХГСН2А (50–52 HRC) резами из Т15К6. Характер этой зависимости иллюстрирует высокую информативность сигнала АЭ при диагностировании износа инструмента.

Высокочастотные колебания АЭ позволяют регистрировать в инструментальном материале процесс трещинообразования, который является предвестником хрупкого разрушения режущей части инструмента. Рост трещин приводит к снижению уровня потенциальной энергии тела. Перераспределяются поля напряжений в металле. Это приводит к распространению высокочастотных волн упругой деформации. Их регистрация с помощью аппаратуры позволяет оценить интенсивность процесса трещинообразования, например, в твердосплавной пластине. Частотный диапазон, в котором осуществляется регистрация сигналов АЭ, находится в пределах от десятков до сотен килогерц. Область информативных частот выделяется полосовым фильтром.

Достоинством метода диагностики по сигналам АЭ является независимость параметров диагностических сигналов от динамических характеристик станка, так как анализируемый уровень частот колебаний, которые несут информацию из зоны резания, значительно превышает частоты колебаний работающих агрегатов станка.

Недостатком метода является существенное ослабление сигнала при его прохождении стыков упругой системы станка. Поэтому сигнал должен сниматься непосредственно с инструмента, а установить датчик вблизи зоны резания не всегда представляется возможным (например, на станках с автоматической сменой инструмента).

Из рассмотрения колебаний следует, что каждый из отмеченных частотных диапазонов несет доминирующую информацию именно о тех процессах при обработке резанием, который по своей динамике соответствует выбранному при измерении сигналов частотному диапазону. Параметры колебаний в каждом диапазоне частот могут быть применимы как информативные признаки соответствующих процессов.

Помимо того, что колебания используются в качестве диагностических признаков состояния режущего инструмента, они могут являться признаками состояния технологического оборудования.

Датчики колебаний — акселерометры используют для регистрации низкочастотных колебаний, возникающих при резании. Конструкция датчиков основана на использовании пьезоэлектрического эффекта. Датчик преобразует в электрический сигнал ускорение колебательных движений инструмента или той части станка, на которой он установлен. Датчик состоит из трех основных компонентов: корпуса, пьезоэлемента и так называемой «сейсмической массы» — груза. Пьезоэлемент деформируется согласно второму закону Ньютона силой, равной произведению «сейсмической массы»  $m$  на ее ускорение  $a$ :  $F = -ma$ . Знак минус показывает, что вектор силы направлен противоположно ускорению.

Величина электрического заряда на гранях пьезокристалла и величина электрического напряжения между противоположными гранями будет изменяться пропорционально ускорению колебательных движений, т.е. механические колебания будут отображаться колебаниями электрического тока. Регистрируется электрический сигнал с помощью измерительного устройства.

Конструкция пьезодатчика АЭ показана на рис. 7.11. Пьезоэлемент 1 опирается на изоляционную шайбу 2. К посеребренной поверхности пьезоэлемента припаян проводник 5, через который электрические заряды подаются на токосъемник 4, закрепленный на шайбе 6. Другая поверхность пьезоэлемента соединяется с корпусом 3. Датчики могут быть настроены на различные частоты колебаний. Для получения информативного сигнала важно правильно определить место установки датчика. Критерием правильности выбора места является наибольшая разница между уровнями сигнала в процессе резания и на холостом ходу станка.

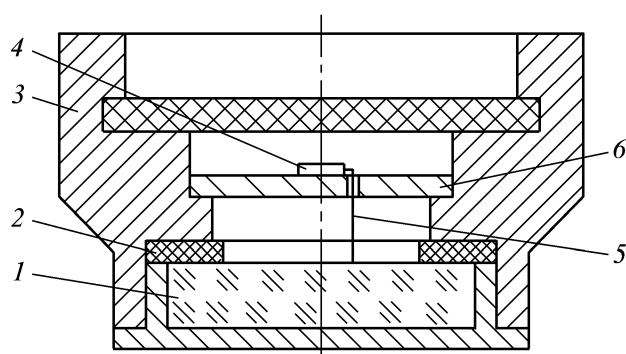


Рис. 7.11. Пьезодатчик акустической эмиссии

Для преобразований и анализа электрического сигнала, отображающего колебательные процессы, используют комплект аппаратуры (рис. 7.12).



Рис. 7.12. Комплект виброизмерительной аппаратуры

Электрический сигнал несет информацию о колебаниях, как указывалось ранее, в широком спектре частот. Сигнал от датчика, усиленный с помощью предварительного усилителя, поступает в блок фильтров частот. Здесь для дальнейшего анализа отфильтровывается сигнал той частотной октавы, которая необходима для цели исследований. Далее сигнал поступает в интегрирующий усилитель. В качестве усиливаемого параметра сигнала может использоваться амплитуда перемещений  $X$ , скорость  $v_X$  и ускорение  $a_X$  перемещений в колебательном процессе. Для гармонических колебаний эти параметры связаны между собой следующими соотношениями:

$$X = A \cos \omega t ,$$

$$v_X = X'(t) = -A\omega \sin \omega t = A\omega \cos \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right),$$

$$a_X = v'(t) = A\omega^2 \cos \omega t = A\omega^2 \cos(\omega t + \pi),$$

где  $\omega$  — круговая частота колебаний;  $t$  — время;  $A$  — амплитуда колебаний.

Наибольший сигнал получается при измерении ускорений  $a_X$ , а наименьший — при измерении амплитуд  $A$  (рис. 7.13). В связи с этим параметр измерения выбирается в зависимости от интенсивности колебаний.

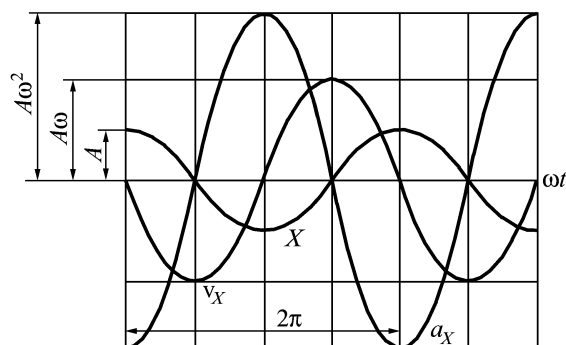


Рис. 7.13. Соотношение величин сигналов параметров колебаний

Рассмотренные диагностические признаки состояния инструмента — сила резания и колебания в широком спектре частот — несут обобщенную информацию о ряде явлений, сопутствующих процессу резания. Из нее извлекают

ту информацию, которая непосредственно связана с контактными процессами на рабочих поверхностях инструмента и отображает их изменения, вызванные износом, выкрашиванием или скалыванием режущей части. Однако извлечь полезный сигнал «чистым» не всегда удастся. Кроме того, датчики сил и колебаний обычно удалены от зоны резания, что приводит к потерям полезной информации в передаточных звеньях технологической системы.

В связи с этим предпочтительнее использовать для диагностирования инструмента сигналы тех физических эффектов, которые непосредственно сопровождают контактные процессы. К ним относятся электрические явления при резании.

Для определения средней температуры резания используется *метод естественной термопары*. Для этого измеряется ЭДС резания, генерируемая в зоне скользящего контакта режущего инструмента со стружкой и поверхностью резания заготовки. Эту зону рассматривают как естественно образующийся в процессе резания горячий спай термопары и принимают, что измеряемая ЭДС резания имеет термоэлектрическую природу. В этой термопаре, образованной двумя разными металлическими проводниками, возникает термоэлектродвижущая сила (ТЭДС). Носителем электричества являются свободные электроны, концентрация которых в проводниках повышается с ростом температуры горячего спаивания. ТЭДС зависит от разности температур горячего и холодного спаев. Помимо этого, в ТЭДС входит составляющая, обусловленная механическим, деформационным возбуждением электронов металлических поверхностей. Такое толкование физической сущности ТЭДС резания используется для получения информации из зоны резания о состоянии режущей части инструмента, о наростообразовании и др. При этом сигнал поступает непосредственно из зоны резания, и для его получения не требуется специальных датчиков.

Для измерения ТЭДС станок, например токарный, оснащается токосъемником, закрепляемым на задней части шпинделя (рис. 7.14, а) и соединяемым с входом измерительного прибора И с большим электрическим сопротивлением. Второй вход прибора соединяется с инструментом. При этом электрическое сопротивление шпиндельных подшипников должно быть существенно больше сопротивления площадки контакта инструмента с обрабатываемой деталью. Надежность измерения ТЭДС снижается при нарушении условий работы подшипников, когда возможно уменьшение их электрического сопротивления из-за потери целостности масляной пленки между деталями подшипников.

Существенным достоинством сигнала ТЭДС в процессе резания является то, что для его обработки не требуется специальных преобразователей, поскольку сразу получается электрический сигнал.

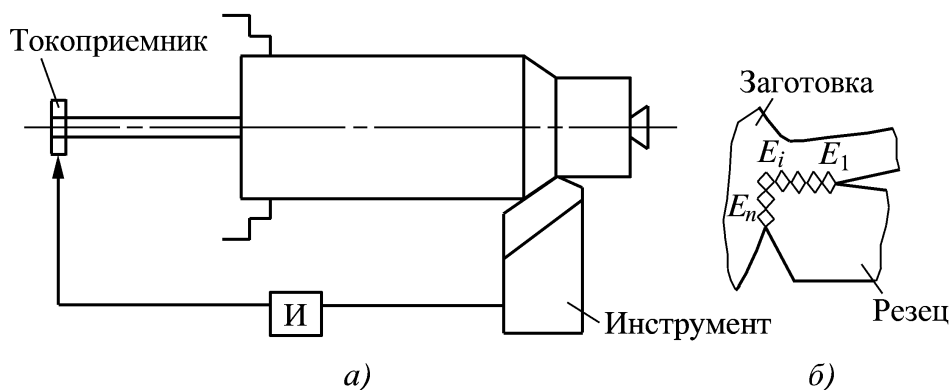


Рис. 7.14. Схема измерения ТЭДС в процессе резания (а) и схема образования импульсов напряжения  $E_i$  (б)

ТЭДС резания представляет собой совокупность элементарных импульсов напряжения  $E_i$ , возникающих на микровыступках площадок контакта передней и задней поверхности инструмента с обрабатываемым металлом (рис. 7.14, б).

Для данной пары металлов режущего инструмента и обрабатываемой заготовки измеряемая величина ТЭДС определяется соотношением  $R_0/R_k$ , где  $R_0$  и  $R_k$  — переходные электрические сопротивления контакта соответственно «резец — заготовка» и «резец — стружка», при этом с увеличением отношения  $R_0/R_k$  увеличивается и ТЭДС.

С ростом износа на задней или передней поверхностях инструмента увеличиваются соответствующие площадки контакта, а вместе с ними уменьшаются электрические сопротивления  $R_0$ ,  $R_k$ . В зависимости от расположения очага превалирующего износа будет возрастать или уменьшаться измеряемая величина ТЭДС.

Так, при превалирующем износе на задней поверхности  $R_0$  будет уменьшаться быстрее, чем  $R_k$ , а это вызывает уменьшение измеряемой величины ТЭДС. При превалирующем износе по передней поверхности, напротив, ТЭДС возрастает.

Измерять ТЭДС для определения состояния инструмента рекомендуется в начале прохода, пока не нагрелись поверхности резцедержателя и не появилась паразитная ТЭДС, искажающая полезный контролируемый сигнал.

Зависимости ТЭДС от износа по задней поверхности твердосплавного резца (рис. 7.15) показывают, что с начала работы инструмента до  $h_3 = 0,5-0,6$  мм более интенсивно уменьшается сопротивление  $R_k$  вследствие приработки передней поверхности и увеличения площадки фактического контакта со стружкой. Затем, когда начинается ускоренный износ на задней поверхности, более интенсивно падает  $R_0$  и ТЭДС уменьшается.

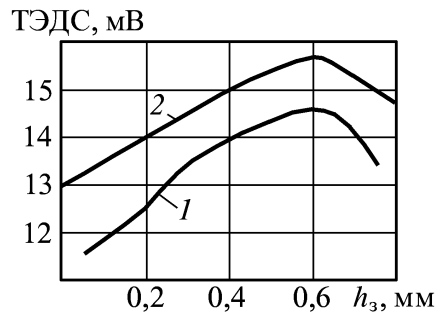


Рис. 7.15. Зависимости ТЭДС от износа  $h_3$  резца из T15K6:  
 1 —  $v = 290$  м/мин; 2 —  $v = 240$  м/мин;  
 обрабатываемый материал — сталь 45,  $S_0 = 0,2$  мм/об,  $t = 0,5$  мм

Температура является доминирующим фактором, определяющим состояние режущей части инструмента. Рост износа  $h_3$  вызывает увеличение мощности источника тепла, а затем и повышение температуры. При больших скоростях резания температура определяет структуру и свойства инструментального материала, от которых зависит интенсивность изнашивания и наработка до отказа. Следовательно, температура может служить информативным признаком состояния инструмента, но практически воспользоваться этим диагностическим свойством температуры не представляется возможным в связи с тем, что методы ее измерения в инструменте малопригодны для производственных условий при эксплуатации технологической системы.

Измерения температуры используют в предэксплуатационный период при исследовании инструмента в лабораторных условиях, а также при диагностировании тепловых деформаций станков.

Для этих целей применяют термисторы или терморезисторы — полупроводниковые резисторы, электрическое сопротивление которых существенно изменяется с ростом температуры.

Используют также бесконтактные методы инфракрасной термографии с помощью тепловизоров и пирометров.

**Инфракрасная термография** — это метод получения термоизображений (термограмм) не воспринимаемого глазом инфракрасного излучения объектов. Он позволяет контролировать тепловое состояние оборудования без непосредственного с ним контакта, не прерывая технологического процесса. Получают температурные поля или локальные температуры тех узлов и деталей станка, тепловые деформации которых существенно влияют на точность обработки. Контролируются подшипники, зубчатые передачи и муфты, можно контролировать и состояние инструмента.



**Тепловизор** представляет собой систему формирования и обработки термоизображений в реальном масштабе времени, которая преобразует инфракрасное излучение объекта в видеосигнал, подобный телевизионному.

**Инфракрасные пирометры** — это приборы для дистанционного измерения температуры в точке объекта. Это позволяет использовать их для диагностирования.

Наиболее достоверные данные о температуре дают тепловизоры.

### 7.3. Выявление отказа инструмента

На автоматизированных ТС основной целью диагностирования процесса резания и инструмента является своевременное определение предельного состояния или отказа инструмента для его замены и тем самым восстановления работоспособности ТС. Попутная цель при этом — определение текущего состояния инструмента с целью управления процессом резания: коррекция траектории движения инструмента, изменение режима резания и т.п.

Системы диагностирования должны выполнять следующие *процедуры* [60]:

- измерение параметров диагностических признаков состояния и отказа инструмента;
- распознавание текущего состояния инструмента и его отказа;
- принятие решений по замене инструмента или управлению технологическим процессом.

В действующих системах диагностирования чаще используют следующий алгоритм для распознавания отказов инструмента. Текущий диагностический сигнал  $\Pi$  сопоставляется с предварительно заложенным в память ЭВМ значением параметра  $\Pi$ , соответствующим по уровню предельному значению  $h$  при отказе из-за износа или соответствующим по уровню в форме сигналу, возникающему при поломке или выкрашивании. Алгоритм, описывающий процедуру распознавания, вытекает из результатов исследований, а обучение системы диагностирования состоит в установлении предельных границ изменения контролируемого сигнала, а также скорости его изменения. Все это выполняется в предэксплуатационный период на стендах. Зарубежные системы диагностирования инструмента приведены в табл. 7.4.

При диагностическом признаке  $\Pi$ , который возрастает с течением времени работы инструмента по мере его износа (рис. 7.16), отказ инструмента регистрируется тогда, когда кривая  $\Pi = f(T)$  пересечет установленный в экспериментах предел, что соответствует предельно допускаемому износу  $h$ . Для определения этого момента в течение всего времени обработки детали система

диагностики периодически опрашивает датчик признака  $\Pi$ . Текущие средние значения  $\Pi$  за этот отрезок времени, показанные в виде кривой на рис. 7.17, сопоставляются с  $\Pi_{\max}^h$ .

Таблица 7.4

### Системы диагностирования инструмента [60]

Фирма, страна	Диагностический признак и средства измерения	Время диагностирования	Дополнительная информация
Fanuc, Toshiba (Япония)	Мощности, потребляемые приводом шпинделя и приводами подач и сравнение с эталонными значениями	На протяжении всего $T_{\text{маш}}$ с заданной частотой дискретизации	Обнаружения повреждений режущей части инструмента для черновой обработки
Wolnert Werkstoffprumaschineen (Германия)	Сила резания. Измеряется тензометрическими подшипниками	На протяжении всего $T_{\text{маш}}$	На основе определения состояния инструмента осуществляется управление подачей
Mitsuseiky (Япония), Steinel, Lucas Brice (Великобритания)	Крутящий момент, силы резания измеряются соответствующими датчиками	На протяжении всего $T_{\text{маш}}$	Система диагностирования с управлением подачей
Samsomatic (Германия)	Положение режущей кромки резца. Измеряется пневмодатчиком	На протяжении всего $T_{\text{маш}}$	Осуществляется подналадка резца с дискретностью 1 мкм
Fritz Werner (Германия)	Размеры детали с помощью датчиков касания	Послеоперационное измерение с последующей подналадкой инструмента	Работа в режиме контрольно-измерительной машины. Точность 0,5 мкм

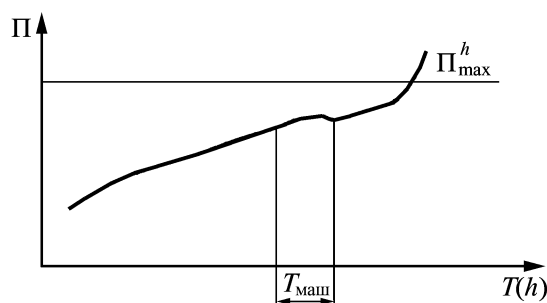


Рис. 7.16. График изменения диагностического признака  $\Pi$  с течением времени работы инструмента  $T$  или износа  $h$

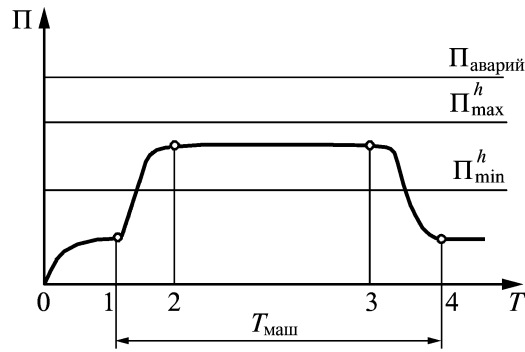


Рис. 7.17. Изменение диагностического признака  
в течение одного цикла обработки детали:

0–1 — участок подвода инструмента к детали; 1–2 — участок врезания;  
2–3 — участок резания; 3–4 — выход инструмента из детали

Последний график  $\Pi = f(T)$  построен по точкам, представляющим собой среднее значение  $\Pi$ , полученное из множества измерений, отражающих реальную картину колебания в процессе резания  $\Pi$  как случайного параметра. Изменения, например, силы  $P_z$  за один опрос датчика протяженностью в 100 мс показаны на рис. 7.18. По точкам, взятым на этом графике, рассчитывается среднее значение диагностического признака для построения графика на рис. 7.17. Использование усредненного сигнала возможно только при диагностировании износа, поскольку скорость изнашивания невелика. Случайные выбросы  $\Pi$  (см. рис. 7.18) за пределы  $\Pi_{\max}^h$  при диагностировании износа не вызывают ложного сигнала об отказе.

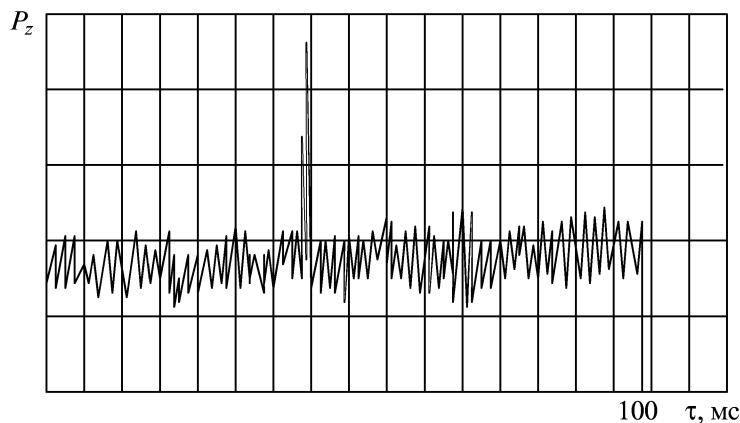


Рис. 7.18. Распечатка диагностического сигнала за один опрос датчика

Значение  $\Pi_{\max}^h$  устанавливают, умножая текущее  $\Pi$ , зафиксированное при работе острым инструментом, на коэффициент запаса  $K$ :

$$\Pi_{\max}^h = K \Pi .$$

Коэффициент  $K$  как постоянный или зависящий от условий обработки коэффициент выбирает технолог.

При определенном характере развития очагов износа может произойти не рост, а снижение значений некоторых диагностических параметров процесса резания. Так, при превалирующем износе по передней поверхности инструмента сила резания падает. Может снижаться амплитуда низкочастотных колебаний до определенной величины износа по задней поверхности. В этих случаях для распознавания предельного состояния инструмента необходимо устанавливать не верхний, а нижний предел диагностического признака  $\Pi_{\min}^h$  (см. рис. 7.17). Порядок его назначения такой же, как для  $\Pi_{\max}^h$ .

При распознавании износа часто возникает необходимость использовать в качестве диагностического признака не только его среднее значение, но и другие статистические характеристики, а также цифровое преобразование сигналов.

Так, при точении стали 18Х12НЮТ на скорости резания  $v = 160$  м/мин, подаче  $S_0 = 0,3$  мм/об и глубине  $t = 1$  мм, зависимости математического ожидания составляющих сил резания  $P_x, P_y, P_z$ , амплитуд низкочастотных (до 1 кГц) и среднечастотных (до 20 кГц) колебаний от износа  $h_3$  твердосплавного резца не позволяют выявить информативный диагностический признак износа (рис. 7.19, а), так как все исследуемые параметры процесса резания изменяются с износом  $h_3$  неоднозначно и незначительно. Однако зависимости их дисперсии от износа, приведенные на рис. 7.19, б, показывают, что дисперсии ряда параметров, начиная с износа  $h_3 = 0,16$  мм растут однозначно и существенно, что позволяет использовать их в качестве диагностических признаков.

При диагностировании поломок (скальвания) инструмента приходится сталкиваться с большими сложностями. Это связано с тем, что возможны разные причины поломок, определяющие различное проявление диагностических признаков в момент времени, предшествующий поломке. Основные **причины поломок** следующие:

а) постепенный до предельного значения рост силы, вызванный износом инструмента или тепловыми деформациями. Поломке по этой причине предшествует не только рост момента, но и рост интенсивности колебаний;

б) усталостные процессы механического и термоциклического происхождения в инструментальном материале. Разрушению инструмента может в этом случае предшествовать повышение амплитуды и частоты колебаний. В то время как сила резания не возрастает.

Сложность диагностирования поломок определяется также взаимодействием отделившейся при скальвании части режущей пластины с обрабатыва-

емой заготовкой. Например, режущая пластина может сразу выйти из контакта с заготовкой или же отделившаяся часть пластины может развернуться на опорной поверхности корпуса резца, осуществляя резание, но с иными подачей и глубиной. Эта часть пластины на какой-то момент времени может заклинить-ся между заготовкой и корпусом резца. Отсюда возникают неоднозначность сигналов из зоны резания, возникающих вслед за поломкой инструмента.

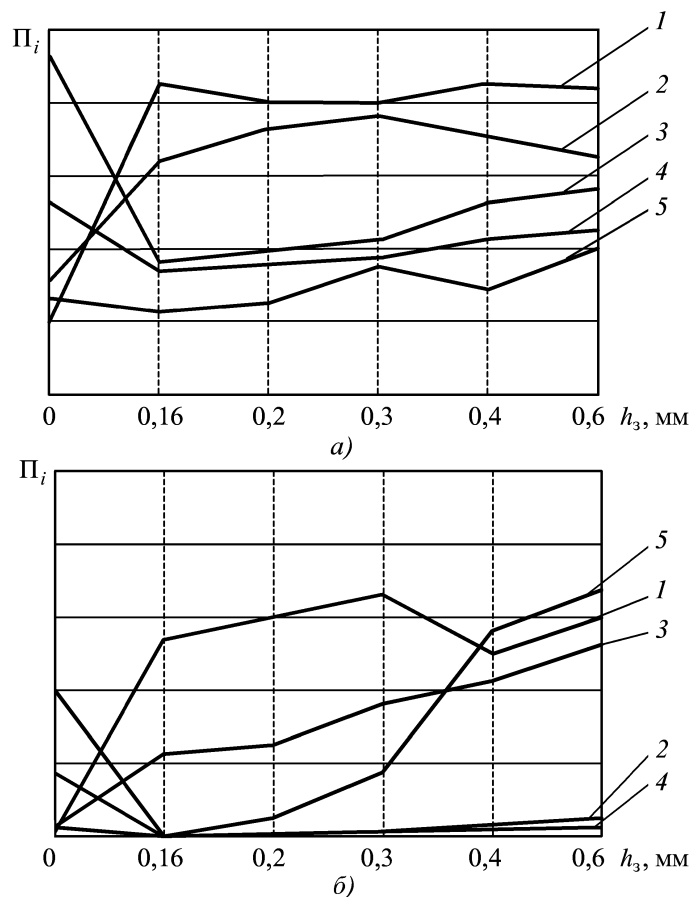


Рис. 7.19. Зависимости от износа  $h_s$ :

$a$  — математического ожидания;  $b$  — дисперсий:

1 — амплитуды высокочастотных колебаний; 2 —  $P_x$ ;

3 — амплитуды низкочастотных колебаний; 4 —  $P_z$ ; 5 —  $P_y$

Поломка является результатом сил, действующих на режущую часть инструмента и изменяющихся в процессе разрушения. В связи с этим сила может быть информативным диагностическим признаком поломки. Поэтому большинство применяющихся на практике алгоритмов диагностирования поломок основаны на использовании силы резания как диагностического признака отказов инструмента. Исследования показали, что в наибольшей мере особенности процесса поломки отражает составляющая силы резания  $P_z$ .

Так, при поломке из-за роста силы изменение составляющей  $P_z$  во времени характеризуется зависимостью, представленной на рис. 7.20. После кратко-

временного превышения силой верхнего порогового значения  $P_{z \max}$ , наступает ее падение. Длительность нахождения сигнала за пределами  $P_{z \max}$  составляет порядка 0,1 мс. Это время, характерное для процесса поломки, больше времени возрастания силы за счет, например, случайных всплесков сигнала. Оно позволяет отличать поломку от других случаев, вызывающих рост силы, но не приводящих к поломке.

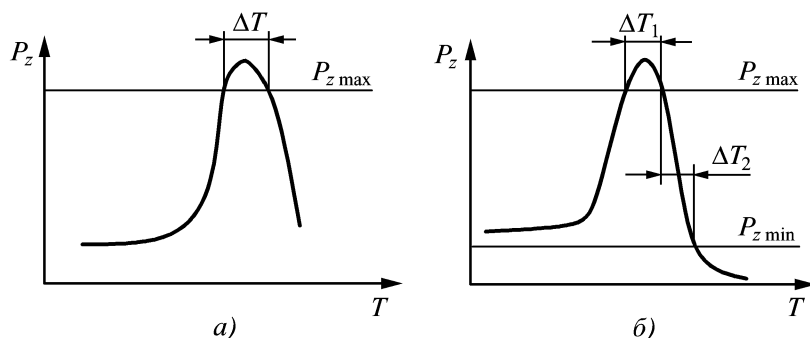


Рис. 7.20. Графики изменения составляющей силы при поломке инструмента

Алгоритм диагностирования поломок по верхнему уровню силы приведен на рис. 7.21. В нем для исключения действия кратковременных помех вводится задержка времени  $\Delta T$  между началом превышения  $P_{z \max}$  и формированием информации о поломке. Информация фиксируется тогда, когда неравенство  $P_z > P_{z \max}$  продолжается в течение времени  $\Delta T > \Delta T_1$ , определенного экспериментально. Далее подается команда на отключение движения подачи и вращения шпинделя.

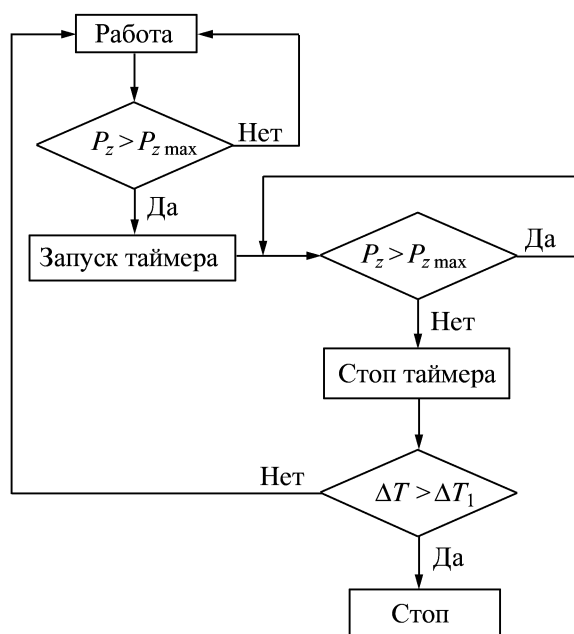


Рис. 7.21. Алгоритм распознавания поломки инструмента по верхнему уровню силы

Однако алгоритм, показанный на рис. 7.21, не обеспечивает достаточной надежности распознавания поломки (скалывания) инструмента. Это связано с тем, что неоднозначно соотношение между временем  $\Delta T$ , характерным для процесса поломки и временем нахождения  $P_z$  за пределом  $P_{z \max}$  из-за внешних электрических помех или, например, локального повышения твердости обрабатываемой заготовки. Все эти временные параметры носят случайный характер. В результате трудно отличить случайные всплески силы от роста ее, вызывающего разрушение инструмента. Возможны ложные команды.

Для повышения надежности распознавания поломок токарных резцов принимают несколько иной подход к формированию алгоритма. Экспериментально установлено, что при поломке режущей пластины резца сила резания на малое время превышает  $P_{z \max}$ , после чего быстро снижается до величины меньше  $P_{z \min}$  (рис. 7.20, б). Фиксируются моменты перехода текущим значением  $P_z$  через границы  $P_{z \max}$  и  $P_{z \min}$  и отсчитывается время  $\Delta T_1$  — продолжительность превышения  $P_{z \max}$  и  $\Delta T_2$  — время от момента обратного перехода до момента перехода через  $P_{z \min}$ . Решение о поломке принимается, если  $\Delta T_1 \geq \Delta T_1^{\text{ЭГ}}$  и  $\Delta T_2 \leq \Delta T_2^{\text{ЭГ}}$ , где  $\Delta T_1^{\text{ЭГ}}$  и  $\Delta T_2^{\text{ЭГ}}$  — установленные экспериментально периоды времени.

Этот алгоритм обладает большой помехозащищенностью, так как при случайных всплесках нагрузка далее не снижается до величины меньше  $P_{z \min}$ .

В случае, когда разрушение инструмента носит усталостный характер, сила резания, предшествующая поломке, не возрастает. После поломки в зависимости от того, как сколовшаяся часть пластины удаляется из зоны резания, сила резко падает или постепенно уменьшается до значения ниже  $P_{z \min}$  (см. рис. 7.22). Применительно к алгоритму распознавания это означает, что сигнал о поломке должен формироваться как только  $P_z < P_{z \min}$ . Для исключения ложных команд, вызванных выполнением этого неравенства из-за случайного падения силы, вводится задержка  $\Delta T$ , в течение которой, а не менее ее, должно сохраняться неравенство.

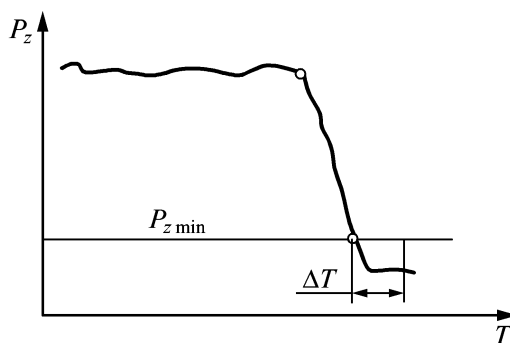


Рис. 7.22. График изменения составляющей силы  $P_z$  при поломке резца из-за усталостного разрушения

Отказ инструмента или процесса непрерывного резания может произойти вследствие образования неблагоприятной для нормального течения технологического процесса обработки формы стружки. Образование ленточной, «шпагообразной» или путаной стружки недопустимо при автоматизированной обработке по следующим *причинам*:

- она может привести к выкрашиванию режущей части инструмента;
- возможно нарушение целостности контактных измерительных датчиков, закрепленных на станке;
- снижается чистота обработанной поверхности;
- затрудняется транспортирование стружки из зоны резания и из рабочей зоны станка.

Можно в процессе резания получить и благоприятную форму стружки в виде элементов небольшой длины. Дробление на такие элементы чаще всего обеспечивается за счет:

- назначения режима резания и геометрии инструмента, при которых образуется суставчатая, дробленая стружка. Но эти режимы часто неприемлемы из соображений качества обработки, производительности и др.;
- изменения направления стекания стружки с помощью стружколомающих и стружкозавивающих устройств.

Дроблению в последнем случае способствует принудительное завивание стружки в спираль, в результате чего на ее прирезцовой поверхности возникают высокие напряжения изгиба. Сильно деформированная стружка в зоне ее образования при завивании полностью теряет запас пластичности. В ней развиваются трещины, и она легко дробится при соприкосновении с обрабатываемой деталью или корпусом инструмента.

На СРП отпрессовываются стружкозавивающие канавки различных профилей. Каждый профиль рекомендуется изготовителем для определенных условий обработки: режимов резания, обрабатываемого материала и др. В каталогах фирм приводятся диаграммы дробления, подобно той, которая показана на рис. 7.23. По этой диаграмме назначается сочетание подачи  $S$  и глубины резания  $t$ , обеспечивающие образование благоприятной формы стружки.

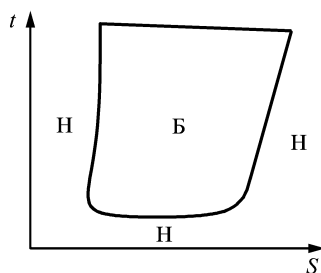


Рис. 7.23. Пример диаграммы дробления стружки:  
Б — благоприятная форма стружки; Н — неблагоприятная



## 7.4. Диагностирование по результатам обработки

На рис. 7.24 показана диаграмма точности обработки, устанавливающая взаимосвязь параметров качества обрабатываемой детали и параметров состояния инструмента. Из всех параметров обрабатываемой детали практическое использование в качестве диагностических признаков состояния инструмента имеют размер детали и шероховатость обработанной поверхности [7].

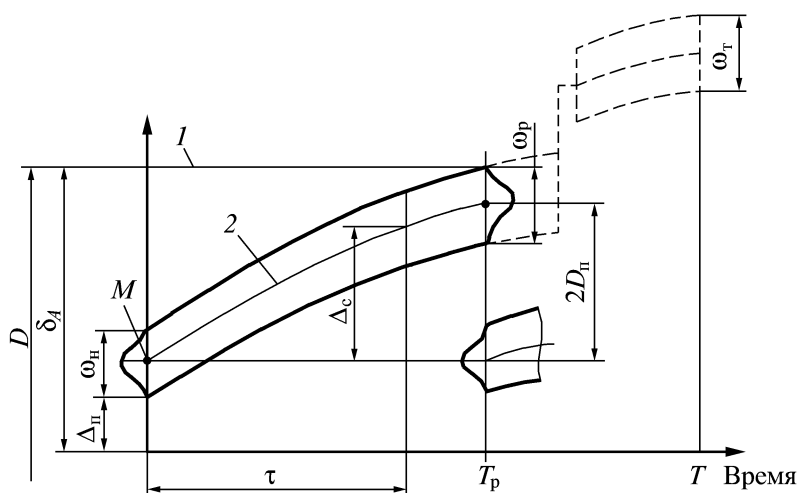


Рис. 7.24. Диаграмма точности обработки:

$1$  — номинальный размер детали;  $2$  — линия центров группирования случайных погрешностей;  $\omega_n$  — поле рассеяния размеров детали в начале периода стойкости инструмента;  $\omega_p$  — то же, в конце периода стойкости инструмента

Размеры  $D$  деталей, обработанных за период стойкости инструмента, изменяются под действием различных факторов, вызывающих систематические и случайные погрешности. *Систематические погрешности* могут быть постоянными и переменными. Постоянной систематической погрешностью обработки считается погрешность установки детали  $\Delta_d$  и установки инструмента  $\Delta_{ин}$ . Погрешность  $\Delta_{ин}$  является постоянной за период его стойкости, и величина ее изменяется только при замене инструмента.

Переменные систематические погрешности возникают вследствие износа инструмента и тепловых деформаций, связанных с процессом резания и работой механизмов станка. Тепловые деформации механизмов станка вызывают переменные систематические погрешности в начальном периоде неустановившегося температурного режима. При установившемся температурном режиме деформации деталей станка, направленные по нормали к обработанной поверхности, представляют собой постоянную систематическую погрешность  $\Delta_t$ . Сумма постоянных систематических погрешностей  $\Delta_n = \Delta_d + \Delta_{ин} + \Delta_t$ .

Случайные погрешности обработки, являющиеся следствием большого количества различных факторов, сводятся к кинематическим и динамическим погрешностям. Кинематические погрешности возникают при рабочих перемещениях механизмов станка без нагружения их силами резания и остаются примерно постоянными в течение всего периода работы инструмента. Динамические погрешности возникают в процессе резания, зависят от жесткости технологической системы, случайных изменений сил резания и возрастают при износе инструмента, поэтому границы поля рассеяния размеров во времени увеличиваются.

Отклонения размеров деталей от линии группирования соответствуют закону нормального распределения Гаусса, который отражает изменения размера  $D$  деталей, обработанных резцом за период стойкости в условиях установившегося температурного режима работы станка (см. рис. 7.24). Текущая величина среднего размера обработанных деталей (кривая 2) представляет собой суммарную величину переменных систематических погрешностей обработки  $\Delta_c$  и зависит от износа  $h_3$  за период времени работы инструмента  $\tau$ . Оптимальной точкой поля допуска, в которую нужно установить вершину резца с целью обеспечения максимального запаса на его износ, а следовательно, с целью получения максимальной размерной стойкости  $T_p$ , является точка  $M$ . Стойкость  $T$  инструмента в несколько раз превышает его размерную стойкость  $T_p$ . С целью использования всего периода стойкости резца после периода размерной стойкости нужно произвести его подналадку. Удвоенная величина подналадки  $2D_{\text{п}} = \delta_A - (\Delta_{\text{п}} + \omega_p)$ . При этом целесообразно учитывать величину поля рассеяния размеров для максимально изношенного резца.

Основываясь на этой зависимости, для достижения заданной точности обработки применяют подналадку инструмента на заданный размер обрабатываемой детали. Здесь осуществляются принципы обратной связи — воздействие выходного параметра (размера обрабатываемой детали) на положение инструмента и реализуются принципы активного контроля. Подналадка возможна в связи с тем, что по технологическому критерию отказа инструмента величина предельного износа, которая при чистой обработке определяется допуском на размер детали, часто значительно меньше, чем величина оптимального износа, определяющая начало полного затупления инструмента. После подналадки инструмент должен иметь достаточный ресурс стойкости.

Подналадки могут выполняться до достижения инструментом предельной по оптимальному критерию величины  $h_3$ . Для этого необходимо знать зависимости  $h_3 = f(\Delta_c)$ , с помощью которых можно определять текущее значение  $h_3$  по величинам  $\Delta_c$  и оценивать возможность дальнейшей подналадки.

*Размерный контроль при обработке в автоматизированном производстве* осуществляется двумя способами: или вне станка, после завершения обработки детали, или на станке после выполнения очередного технологического перехода. Послеоперационный контроль выполняется на специальном контрольном приспособлении или на контрольно-измерительной машине. При выявлении погрешности обработки вводят необходимую коррекцию для повышения точности обработки следующих деталей. Такие контрольные проверки позволяют оценить и износ инструмента.

Выполнение координатных измерений непосредственно на обрабатывающем станке обеспечивает оперативность при контроле и расширяет возможности адаптивного управления точностью обработки. Однако при этом уменьшается коэффициент технического использования станка, так как во время измерения станок простаивает.

Для контроля размеров детали и параметров разрушения инструмента непосредственно в зоне обработки широкое распространение получили *датчики касания* (контактные датчики), обладающие универсальностью и позволяющие измерять контролируемые размеры с точностью до 1 мкм.

Принципиальная схема датчика касания представлена на рис. 7.25, а. Конструкция датчика (рис. 7.25, б) включает в себя следующие основные узлы. В корпусе 1, закрепляемом на подвижной части станка, размещается узел 2 установки (подвески) измерительного наконечника 3. Наконечник имеет соединенные между собой стержни 4 с контактными элементами 5. Предохранительное устройство 6 предотвращает поломку измерительной головки в случае большого смещения наконечника. Кроме того, головка имеет узел создания измерительного усилия и ориентации 7, чувствительные элементы 8 и электронную схему обработки сигналов 9.

При отклонении наконечника 3 в любом из указанных стрелками направлений опорный диск 2 поворачивается относительно оси, перпендикулярной оси головки, или смещается вдоль ее оси. Вместе с диском смещается связанный с ним якорь индуктивного датчика 8. Вызванное этим изменение электрического сигнала используется для определения момента касания наконечником головки контролируемой детали. Для получения сигнала о касании достаточно перемещения наконечника на величину до 1 мкм с усилием до 0,2 Н.

Для контроля размера детали измерительная головка устанавливается или в шпинделе станка (например, обрабатывающего центра) вместо режущего инструмента, или в позиции режущего инструмента револьверной головки токарного станка с ЧПУ. При измерении станок работает в режиме координатно-

измерительной машины. Так, для измерения расстояния между двумя поверхностями следует определить координаты точек на каждой из них и вычислить их разность.

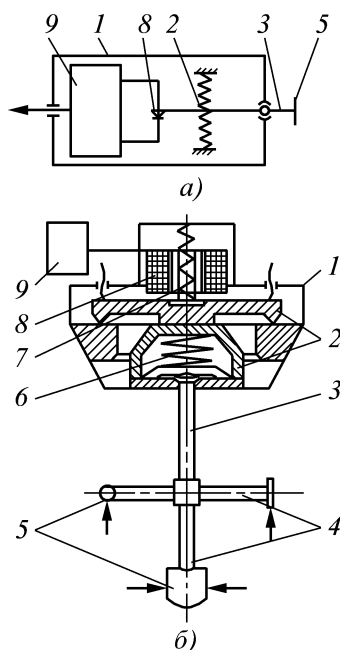


Рис. 7.25. Принципиальная схема датчика касания

Электрический сигнал, возникающий в момент касания, передается в систему ЧПУ для отсчета и запоминания координаты касания по кабелю, что связано с определенными сложностями.

Широкому распространению координатных измерений на станке способствовало создание датчиков касания, передающих сигналы бескабельным способом. Применяют индуктивную и оптическую связь между измерительной головкой и приемником сигнала. Система индуктивной связи состоит из двух модулей: один на измерительной головке в подвижном узле станка, например, в шпинделе; второй в сопряженном невращающемся узле. В положении измерения модули находятся на расстоянии 2 мм друг от друга. Питание к измерительной головке подается через индуктивную связь. Аналогично подается сигнал касания от головки к неподвижному приемнику.

В датчиках с оптической системой передачи сигналов используются инфракрасные лучи. Схема обмена информацией показана на рис. 7.26.

Возможна передача сигнала на расстояние до 3 м. При наличии визуального контакта передатчика с приемником масляный туман, охлаждающая жидкость и дым в зоне обработки не являются препятствием для инфракрасного излучения. Используют также радиочастоты 2,4 ГГц с передачей сигналов на расстояние до 15 м по 70 каналам.

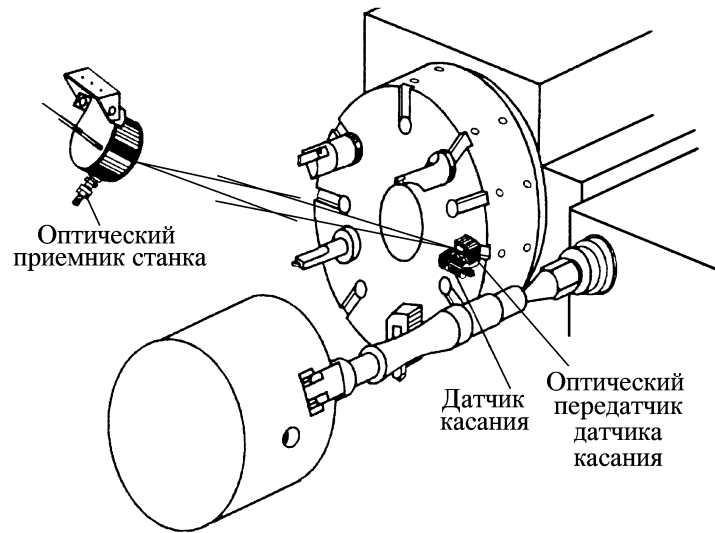


Рис. 7.26. Обмен информацией между датчиком касания и приемником в инфракрасном спектре

Для определения износа резца путем измерения диаметра обработанной детали наконечник измерительной головки 1 (рис. 7.27, а) вводится в контакт сначала с обрабатываемой поверхностью детали, и координата  $x_1$  фиксируется в запоминающем устройстве ЧПУ. Затем после обработки с глубиной резания  $t$  наконечник вводится в контакт с обработанной поверхностью. Новая координата касания  $x_2 = x_1 + t + \Delta_c$ , где  $\Delta_c$  — погрешность обработки, вызванная износом инструмента по задней поверхности. По предварительно полученной зависимости  $h_3 = f(\Delta_c)$  с помощью алгоритма ЭВМ определяет величину  $h_3$ .

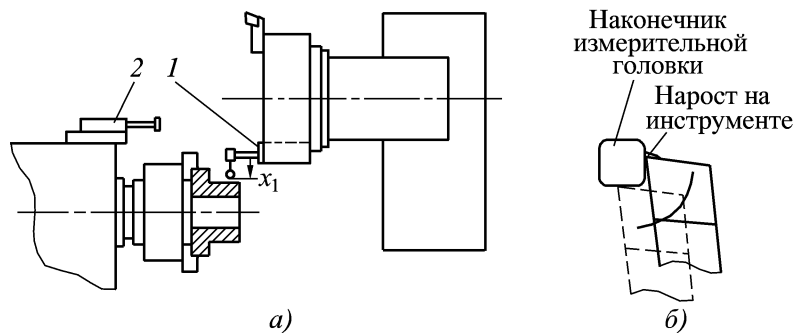


Рис. 7.27. Схема измерения размеров обрабатываемой детали (а) и величины износа режущего инструмента (б)

Описанные измерительные головки используются также для прямого контроля размерного износа или определения возможного разрушения инструмента. Для этого головка 2 (рис. 7.27, а) может быть установлена на передней бабке станка. Отсчет ведется от координаты касания наконечником головки режущей кромки острого резца.

Недостатком этого метода является то, что на точность измерения может оказать влияние наличие на рабочих поверхностях инструмента нароста, образовавшегося в процессе резания.

В качестве диагностического признака состояния инструмента могут быть использованы *параметры шероховатости обработанной поверхности детали*. Шероховатость постепенно возрастает по мере износа инструмента в стадии установившегося изнашивания и резко повышается с начала катастрофического изнашивания. В связи с этим диагностирование по шероховатости возможно как при технологическом, так и при оптимальном критерии затупления.

Для контроля шероховатости рекомендуются *оптические датчики*, с помощью которых оценивается отражательная способность поверхности, зависящая от ее шероховатости.

Датчик состоит из зонда, источника света, фотодиодов и электронного блока обработки сигналов. Зонд имеет световоды, предназначенные для передачи луча от источника к измеряемой поверхности, и световоды, передающие отраженный луч к фотодиодам. Сигнал фотодиодов, зависящий от интенсивности отраженного луча, поступает в электронный блок, который выдает среднюю на некотором участке измерения величину  $Ra$ . В настоящее время созданы датчики на основе использования лазерного луча.

Для передачи информации от датчиков, расположенных на подвижных частях технологического оборудования или инструмента, применяют бескабельные методы, а также радиотелеметрические и оптические методы. Основные блоки системы передачи информации показаны на упрощенной схеме на рис. 7.28.

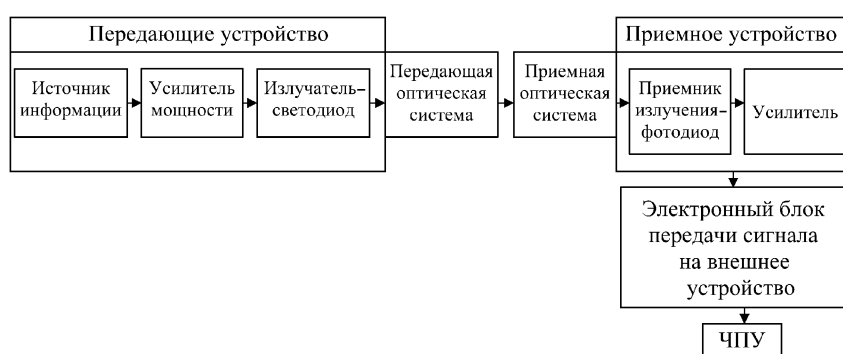


Рис. 7.28. Упрощенная схема передачи информации

Источником информации могут служить вышеперечисленные датчики. Потребитель информации — система ЧПУ. В качестве передающего устройства может служить кремниевый фотодиод.

В том случае, когда приемник находится вне зоны визуального контакта с датчиком, например, контролируется датчиком касания отверстие, оптическая связь невозможна. В этом случае информация от датчика передается на радиочастоте. Для этого на многоцелевых станках устанавливают датчики касания с миниатюрными радиопередатчиками. Информация передается в реальном масштабе времени.

Совершенствование систем диагностирования состояния инструмента в процессе резания осуществляется за счет:

- а) расположения датчиков в деталях режущего инструмента;
- б) использования миниатюрных первичных преобразователей;
- в) создания программных продуктов, ориентированных на выпускаемые унифицированные конструкции станков и инструментов.

## ГЛАВА 8. АВТОМАТИЧЕСКАЯ СМЕНА ИНСТРУМЕНТА

Гибкость ГПС в значительной мере зависит от числа инструментов, хранящихся в станочных магазинах-накопителях. Если для обработки партии одних и тех же заготовок на токарном станке ГПС достаточно 8–12 инструментов, установленных в одной или двух револьверных головках, то для обработки различных заготовок малыми партиями в 20–50 шт. требуется значительное число инструментов. Необходимо также наличие инструментов-дублеров для замены затупившегося инструмента. В связи с этим возникает необходимость создавать системы автоматической смены инструмента (АСИ), включающие:

- а) накопители готового к работе инструмента (инструментальные магазины);
- б) устройства автоматической транспортировки инструмента из накопителей в рабочие узлы станков;
- в) устройства закрепления инструмента на станках;
- г) идентификаторы начала смены инструмента; д) унифицированную инструментальную оснастку (вспомогательный инструмент, средства настройки инструмента и его кодирования).

### 8.1. Устройства для автоматической смены инструмента

Для взаимодействия с АСИ на ГПМ для обработки корпусных деталей и на многоцелевых станках применяют устройства автоматического закрепления вращающегося инструмента. Один из вариантов такого устройства показан на рис. 8.1. При закрепленном положении оправки тяга (шомпол) *б* находится в крайнем правом положении под действием тарельчатых пружин *8*, которые размещены в расточке шпинделя *2* и упирается в гайку *10*, связанную с тягой *б*. Оправка *1* удерживается за хвостовик *3* специальными рычагами *4*, которые находятся под действием пружин *5* и связаны плечом с тягой *б*. Надежность захвата рычагами хвостовика *3* обеспечивается тем, что при движении тяги вправо верхние выступы рычагов *4* воздействуют с конусной расточкой переходной ступени отверстия в шпинделе.

Для раскрепления оправки служит гидроцилиндр *12* одностороннего действия. При подаче масла под давлением в правую полость гидроцилиндра его поршень *11* смещается и через подшипник воздействует на торец тяги *б*, сжимая комплект тарельчатых пружин. Рычаги *4*, попадая в расточку отверстия шпинделя, освобождают хвостовик *3*, а тяга своим торцом при дальнейшем ходе упирается в хвостовик *3* оправки *1* и выталкивает оправку с инструментом из шпинделя примерно на 5–6 мм. Автооператор системы АСИ вынимает оправку



из шпинделя и заменяет ее следующей по программе. Для закрепления следующей оправки следует сигнал на снятие давления в полости гидроцилиндра и происходит втягивание оправки в шпиндель. Для надежного удерживания хвостовика на оправки рычагами 4 в конце хода тяги под действием пружин рычаги попадают в суженую часть отверстия шпинделя и тем самым удерживаются в сжатом состоянии. Чтобы исключить опасность включения вращения шпинделя при незакрепленной оправке, в системе установлен микропереключатель 13, на который воздействует удлиненный конец штока 14, связанный с поршнями 11 гидроцилиндра 12. Рассмотренная конструкция шпинделя смонтирована в шпиндельной бабке 9 на подшипниках 7.

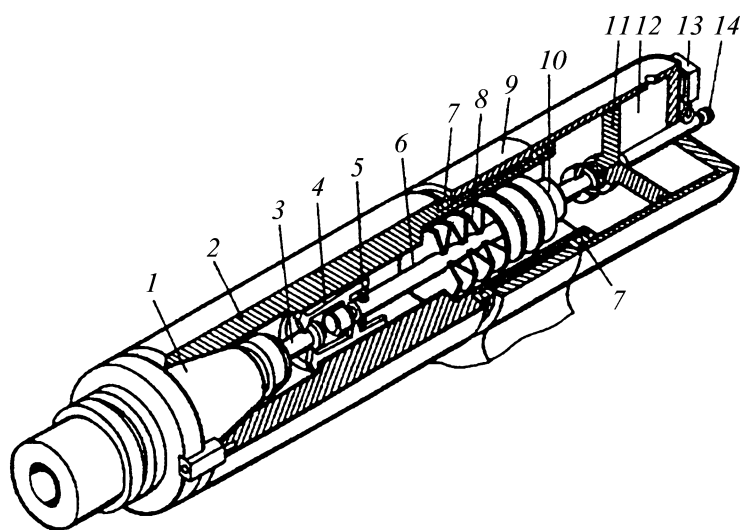


Рис. 8.1. Устройство автоматического крепления инструмента в шпинделе

Устройства АСИ конструктивно исполняются в различных вариантах, которые можно подразделить на **две основные группы**:

- 1) устройства АСИ без автооператора,
- 2) устройства АСИ с автооператором.

Устройство АСИ без автооператора часто представляет собой сочетание револьверной головки и дополнительных узлов, обеспечивающих разжим, поворот и закрепление револьверной головки, а также вращение шпинделя револьверной головки, когда он находится в рабочей позиции.

В револьверных головках токарных станков с горизонтальной осью инструмент может быть размещен как параллельно оси головки, так и перпендикулярно к ней. Конструктивно револьверные головки выполняют с базовыми отверстиями в поворотном корпусе.

В револьверных головках с вращающимся инструментом расположены соответствующие шпиндельные узлы.

Устройства АСИ с автооператорами представляют собой сочетание инструментальных магазинов, автооператоров и других устройств. В качестве автооператора используется часть устройства АСИ, которая обеспечивает автоматический обмен инструментом между накопителями и шпинделем станка.

Классификация устройств АСИ приведены на рис. 8.2.

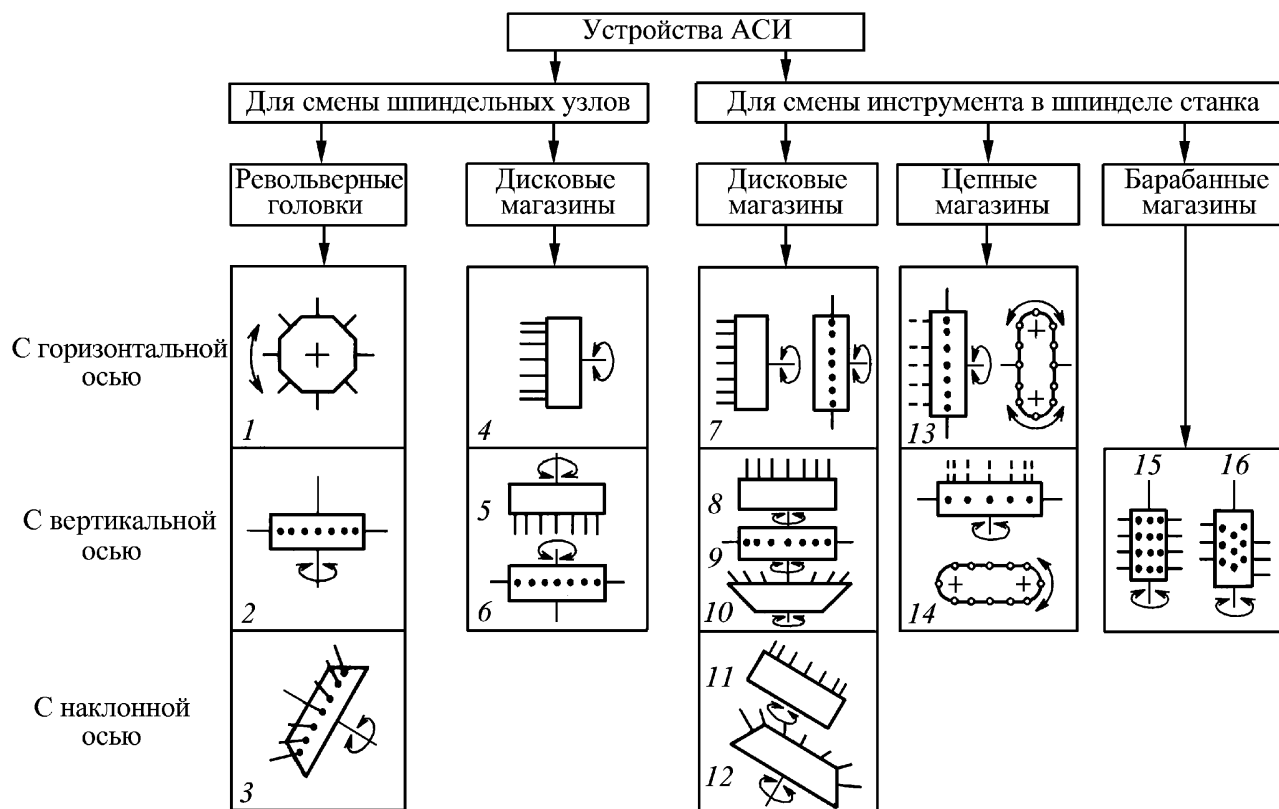


Рис. 8.2. Классификация устройств автоматической смены инструмента

В устройствах АСИ для смены шпиндельного узла в качестве магазинов могут быть применены револьверные головки 1–3, в которых инструменты устанавливаются в той последовательности, в которой производится обработка заготовки. Автоматическая смена инструмента осуществляется расфиксацией, поворотом и фиксацией револьверной головки. Преимуществами таких устройств являются простота конструкции, малое время, затрачиваемое на смену инструмента, недостатками – ограниченность рабочей зоны, малая емкость револьверной головки как магазина инструментов, а также невысокая жесткость шпинделей.

Дисковые магазины 4–6 изготавливаются с горизонтальной, вертикальной или наклонной осью поворота. Один из шпиндельных узлов поочередно присоединяется к приводу. При смене инструмента шпиндельный узел отсоединяется от привода, магазин поворачивается в положение, при котором очередной шпиндель устанавливается соосно с валом привода и присоединяется к послед-

нему. Преимуществом устройства АСИ с магазином шпинделей по сравнению с устройствами с револьверными головками является увеличение вместимости магазина, большая жесткость шпинделя, меньшие ограничения зоны обработки.

Устройства для смены инструмента в шпинделях станков выполняются на базе дисковых цепных или барабанных магазинов — накопителей инструмента. Наиболее простой является конструкция устройств АСИ с инструментальными магазинами дискового типа 8–12 (см. рис. 8.2.), установленным на шпиндельной бабке таким образом, что в одной из его позиций гнездо магазина устанавливается соосно со шпинделем станка. Автоматическая смена инструмента осуществляется поворотом магазина и осевым перемещением шпинделя. После окончания очередного перехода оправка с инструментом отсоединяется от шпинделя и закрепляется в магазине. Затем магазин поворачивается в положение, при котором очередной инструмент устанавливается соосно со шпинделем. Шпиндель с новым инструментом проходит через отверстие магазина в позицию обработки. Такая конструкция исключает необходимость в специальном автооператоре.

В магазинах цепного типа инструменты размещают в гнездах подвижной цепи 13 (см. рис. 8.2) и подаются в промежуточную позицию для захвата автооператором.

В барабанных магазинах 14, 15 для инструмента предусмотрено несколько рядов гнезд, обеспечивающих его радиальное расположение. Смена инструмента осуществляется с помощью автооператоров, которые вынимают инструмент из соответствующего гнезда магазина и вставляют в шпиндель станка или выполняют обратную операцию.

Автооператоры, предназначенные для смены инструмента в шпинделе станка, по количеству захватов подразделяются на одно-, двух- и многозахватные. Захват инструментальных блоков осуществляется в радиальном направлении за *V*-образную канавку во фланце механизмами захвата с подпружиненным зажимом клещевого или тисочного типа. Конструкции однозахватных автооператоров предусматривают возможность поворота относительно оси, параллельной или перпендикулярной к оси шпинделя, а также поступательного перемещения в плоскости, перпендикулярной к оси шпинделя.

Автооператор 1 для станка с цепным магазином 2 (рис. 8.3) выдвигается из корпуса каретки, а вся каретка — перемещаться вверх или вниз по направляющим стойки станка и в направлении, параллельном оси магазина и шпинделя. В нижнем положении каретки автооператор, выдвигаясь, захватывает инструментальный блок из магазина. При ходе каретки вдоль оси инструментальный блок вынимается из гнезда магазина, и каретка передвигается по стойке в положение напротив шпиндельной бабки 3. Совершая аналогичный цикл движений,

правый захват автооператора вытаскивает отработавший инструмент из шпинделя, после чего происходит поворот автооператора на  $180^\circ$  и смена инструментов.

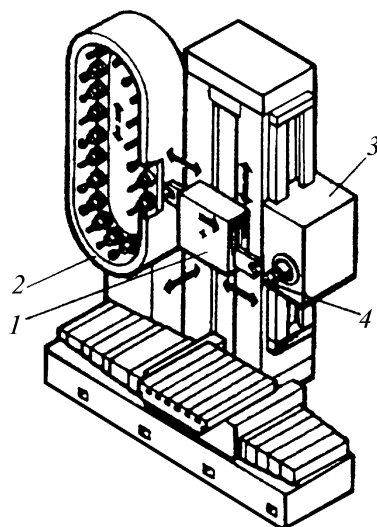


Рис. 8.3. Цепной магазин инструмента

Для включения в базу данных важны такие сведения, как допускаемые размеры и масса инструмента, емкость инструментального магазина (например, на рис. 8.3) цепной магазин 2 имеет 20 гнезд, из которого автооператор 1 перемещает инструмент в шпиндель 4 при определенном положении бабки 3.

Сведения о допускаемых размерах и массе компоновок инструментальных блоков в инструментальных магазинах приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

### Допускаемые размеры и масса инструментальных блоков

Конус 7:24	$t$ , мм	$s$ , мм	$d_{н\ max}$ , мм	$D_{н\ max}$ , мм	$L$ , мм	$m$ , кг
40	38,1	76	75	225	400	16
		88	85	250		
		114	110			
		133	130			
		152	150			
50	50,8	101	100	300	500	25
		133	130			
		152	150			
		177	170			
		203	200			

**Обозначения:**  $t$  — расстояние между шпонками гнезд магазина;  $s$  — расстояние между гнездами;  $d_{н\ max}$  — максимальный диаметр инструмента, установленного в магазин при соседних заполненных гнездах;  $D_{н\ max}$  — то же при соседних пустых гнездах;  $L$  — общая длина инструмента;  $m$  — масса инструментального блока.

В гибких производственных системах применяют комбинированную схему АСИ (рис. 8.4). Главным элементом здесь является стеллажный инструментальный склад 1. Он размещен вдоль всей ГПС, составленной из нескольких многооперационных станков 3, имеющих цепные инструментальные магазины 2 с устройствами АСИ. Станки обслуживаются транспортными тележками 6, обеспечивающими подачу заготовок на столах-спутниках с загрузочной позиции 5 на приемные столы 4, размещенные перед каждым станком.

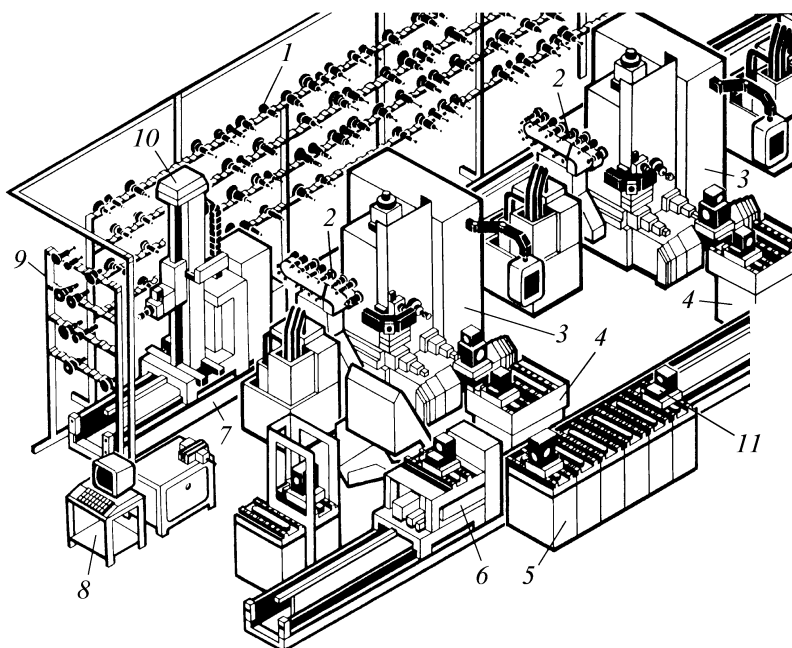


Рис. 8.4. ГПС с комбинированной АСИ

Вдоль инструментального склада, где в ячейках размещен различный инструмент по направляющим 7 может перемещаться робот 10, который по соответствующим командам из центра управления или по командам с пульта 8 оператора ГПС загружает и разгружает инструментальные цепные магазины всех станков линии. Робот заменяет изношенный инструмент на новый из номенклатуры инструмента, размещенного в ячейках инструментального склада, комплектует магазины станков инструментом в зависимости от характера предстоящих технологических операций, размещает в ячейках склада новый инструмент. Новый инструмент проходит предварительный контроль и размещается наладчиками вручную в ячейках приемного стеллажа 9 инструментального склада.

На станках токарной группы для смены инструмента применяют револьверные головки, в которых для установки инструмента применяют различные способы (рис. 8.5).

Применяется базирование с помощью цилиндрического хвостовика (рис. 8.5, а–г) с креплением зажимными сухарями или рифленным клином за риф-

ления по лыске цилиндрического хвостовика. На одной грани револьверной головки может быть закреплено несколько резцедержателей с режущим инструментом для наружной и внутренней обработки.

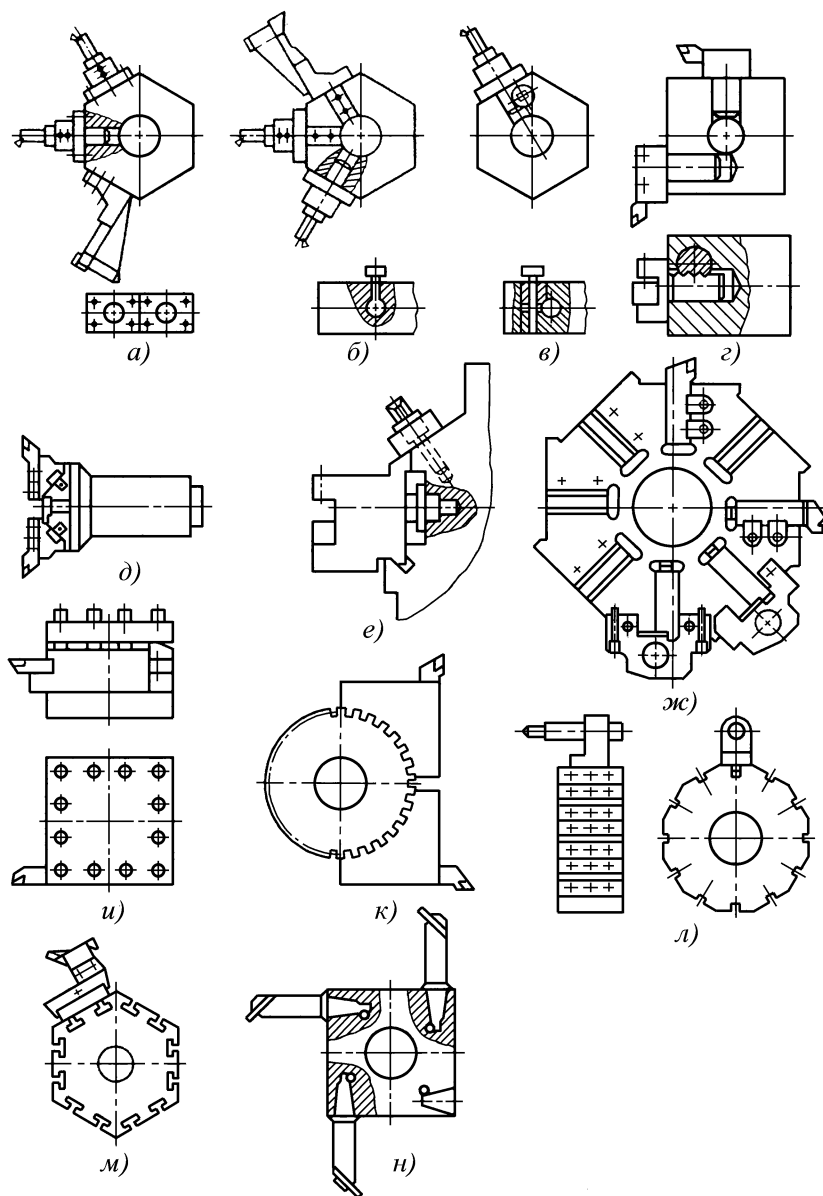


Рис. 8.5. Способы крепления инструмента на токарных станках с ЧПУ

В станках с ЧПУ используется комбинированная установка режущего инструмента во вспомогательном, который представляет собой мини-револьверную головку с (рис. 8.5, д). Также используется установка резцедержателей на призматические направляющие: две призмы или призма и плоскость в сочетании с цилиндрическим хвостовиком. (рис. 8.5, е).

Применяется и непосредственное крепление режущего инструмента в револьверных головках (рис. 8.5, ж) и поворотных резцедержателях (рис. 8.5, и).

Реже выполняется базирование вспомогательного инструмента по зубчатому венцу с креплением винтами (рис. 8.5, *к*), базирование по пазу и шпонке с креплением винтами (рис. 8.5, *л*), по Т-образным пазам (рис. 8.5, *м*), а также базирование по конусу с креплением эксцентриком (рис. 8.5, *н*).

Способ базирования и закрепления с помощью цилиндрического хвостовика широко используется на станкостроительных заводах, изготавливающих и эксплуатирующих универсальные револьверные станки, токарные полуавтоматы и автоматы. Конструкция цилиндрического хвостовика у вспомогательного инструмента для станков с ЧПУ для повышения надежности видоизменена: введена плоская лыска, на которой в ряде случаев выполняют рифления (рис. 8.6). Базирование резцедержателя проводится по цилиндру хвостовика и штифту, обеспечивающему точную угловую установку инструмента, который крепится в револьверной головке с помощью сухаря или клина, также имеющего рифления, но смещенные относительно рифления хвостовика. Вспомогательный инструмент прижимается к револьверной головке станка с усилием 5–6 кН, в результате радиальная жесткость соединения превышает жесткость соединения без рифлений в 3 раза.

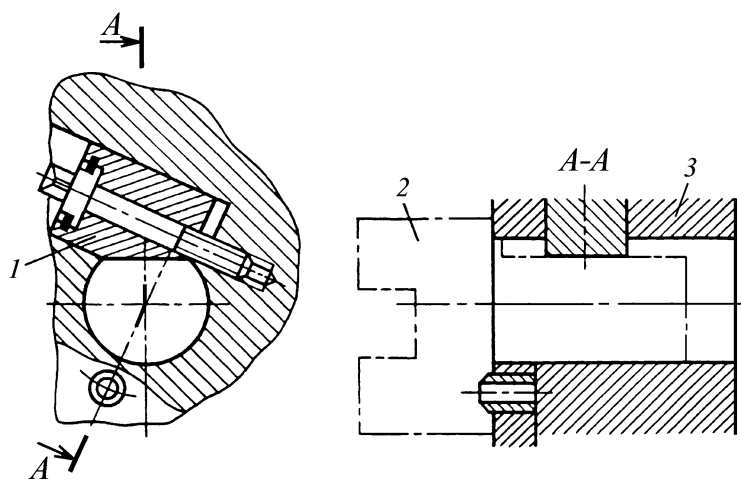


Рис. 8.6. Закрепление резцедержателя в револьверной головке

В станках с ЧПУ используется также мини-револьверные головки с комбинированной установкой режущего инструмента во вспомогательном (рис. 8.5, *д*).

Для сокращения времени смены инструмента в револьверных головках на некоторых токарных станках ГПС предусмотрены револьверные головки с быстросменными инструментальными дисками, в которых вне станка во время его работы заранее устанавливаются требуемые инструменты. Диски с предварительно настроенными инструментами для обработки различных партий деталей хранятся на стеллаже около станка. Токарные станки ГПС оснащаются магази-

нами инструментальных головок и манипуляторами, осуществляющими замену инструментальных головок в державках револьверных головок, во время остановки станка (время смены инструмента 20–30 с).

Наличие магазинов инструментальных головок обеспечивает значительное увеличение числа инструментов и их дублеров, что обуславливает возможность обработки в ГПС большой номенклатуры различных заготовок в мелкосерийном производстве при работе по безлюдной технологии.

Магазины инструментальных головок имеют большую вместимость (до 150 головок) и выполняются плоскими, цепными или барабанными.

На рис. 8.7 показано устройство автоматической смены инструментальных головок из секционного барабанного магазина 2 с помощью манипулятора 1 в державки, установленные в револьверной головке.

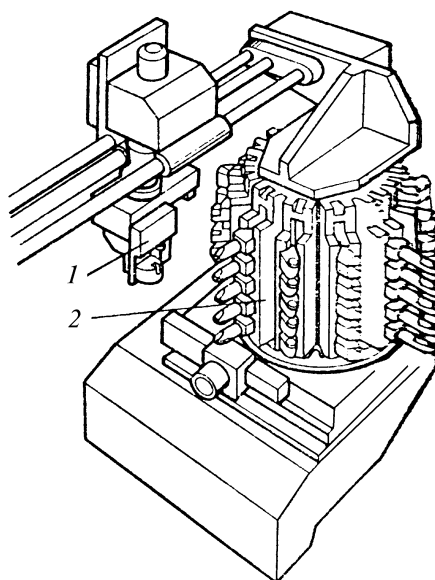


Рис. 8.7. Устройство автоматической замены инструментальных головок на токарных ГПС

Вместимость инструментальных магазинов многоцелевых станков в большинстве случаев недостаточна для обработки одной заготовки по безлюдной технологии, поскольку в этом случае необходимо наличие в магазине инструментов-дублеров для автоматической замены изношенного и сломанного инструмента. Потребности в инструменте не удовлетворяются даже на станках с магазинами большой вместимости, в том числе с цепными магазинами вертикальной компоновки. Увеличение числа инструментов в магазине позволяет расширить номенклатуру деталей, которые можно обработать комплектом инструмента, находящегося в магазине многоцелевых станков. Увеличение числа инструментов, дающих возможность обработки различных заготовок минимальными партиями по безлюдной технологии, обеспечивается различными способами.



## 8.2. Контроль смены инструмента

Эффективная работа ГПС, в особенности при работе по безлюдной технологии, возможна лишь при наличии системы автоматического контроля состояния и наличия режущего инструмента для идентификации начала его смены. Необходимо осуществлять контроль момента достижения лимитирующего износа или поломки режущего инструмента для его замены инструментом-дублером из накопителя.

Контроль состояния режущего инструмента может быть осуществлен различными способами, основанными на использовании прямого и косвенного методов измерения. При *прямом* методе измеряется непосредственно величина износа режущей кромки инструмента, а при *косвенном* — параметр, более легко поддающийся измерению и связанный с износом определенной корреляционной зависимостью. Возможен контроль состояния режущего инструмента как непосредственно в процессе резания, так и после его окончания. Измерение может производиться посредством механических, акустических пневматических, индуктивных и других устройств. Методы измерения могут быть контактными и бесконтактными.

Наиболее простым способом определения износа инструмента является контроль каждого инструмента по его стойкости (времени его работы). Период стойкости инструмента (срок службы) определяется на основании статистических данных или на основе данных завода-изготовителя инструмента. Данные стойкости каждого инструмента (данные о допускаемой длине траектории режущей кромки), зависящие от условий его применения, вводятся в память УЧПУ. В процессе обработки заготовок ведется непрерывный счет фактического времени работы каждого инструмента.

Износ инструмента контролируется путем фиксации и накопления в памяти УЧПУ суммарного времени работы инструмента в зависимости от вида обрабатываемого материала. Перед началом обработки УЧПУ автоматически определяет оставшееся время работы каждого инструмента путем вычитания из запрограммированного времени стойкости инструмента времени применения инструмента на предыдущих операциях и длительности цикла обработки на данной операции. Когда сумма времени работы какого-либо инструмента будет равна запрограммированной, УЧПУ подает сигнал на замену инструмента. Недостатком такого способа является необходимость надежного определения периода стойкости инструмента, что достаточно сложно. Поэтому предельный период стойкости инструмента следует назначать так, чтобы, с одной стороны, исключить полный износ, а с другой — не допустить замены инструмента до

истечения периода фактической его стойкости. Определение износа инструмента посредством контроля инструмента по стойкости целесообразно применять для обдирочных операций, для которых характерны большие колебания припусков на обработку и, следовательно, заданных и действительных сил резания.

Контактный способ прямого метода определения износа инструмента осуществляется непосредственно автоматическим измерением износа.

Для этого режущая кромка инструмента автоматически подводится к измерительному щупу (рис. 8.8, *а*), который выдает данные об износе в систему УЧПУ, где они сравниваются с запрограммированными. Наряду с износом инструмента при этом определяется и геометрия режущей кромки: наличие нароста на режущей кромке (рис. 8.8, *в*) или скола режущей кромки (рис. 8.8, *б*). В зависимости от знака разности между фактическим и заданным значениями можно судить о сколе или об образовании нароста.

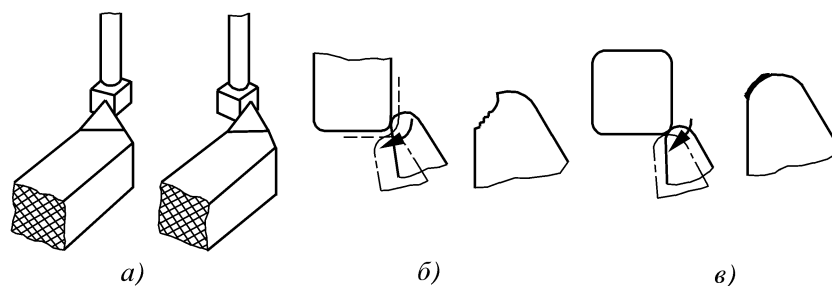


Рис. 8.8. Автоматическое определение износа инструмента

Косвенный метод контроля состояния инструмента может осуществляться автоматическим измерением обрабатываемой заготовки щупом, установленным в одном из гнезд револьверной головки станка или в гнезде магазина, откуда он автоматически устанавливается в шпиндель станка. Датчик измерительной системы измеряет в основном только те отклонения, которые зависят от износа инструмента. При достижении запрограммированной суммы коррекций дается команда на замену инструмента.

Контроль состояния инструмента в процессе резания является одним из основных факторов, обеспечивающих высококачественную обработку заготовок на станках с ЧПУ, особенно на станках ГПС при работе по безлюдной технологии. Одним из наиболее простых устройств для контроля косвенным методом в процессе резания, основанных на измерении потребляемой мощности, является датчик, реагирующий на мощность, затрачиваемую на резание. Принцип работы таких датчиков основан на регистрации мощности, потребляемой приводными электродвигателями станка.

При обработке эталонной детали заточенным инструментом при заданных режимах резания регистрируют мощность электродвигателя. Эти данные заносятся в память УЧПУ. Если в процессе последующей работы фактическая мощность будет превышать зарегистрированную на данном переходе, то станок отключится и выдаст сигнал на замену инструмента. Так как сила тока электродвигателя пропорциональна крутящему моменту на шпинделе, то, регистрируя на дискретном измерительном устройстве от 0 до 100 % номинального значения крутящего момента двигателя, учитывают фактическую нагрузку и сопоставляют ее с расчетной. Однако при обработке заготовок с небольшой глубиной резания этот метод не применим, так как определяемая только главной (тангенциальной) силой резания потребляемая мощность зачастую очень мала по сравнению с мощностью, затрачиваемой на преодоление сил трения и инерции.

Широкое распространение получил косвенный метод контроля состояния инструмента по силе резания и крутящему моменту на шпинделе, поскольку износ или поломка инструмента отражается на увеличении силы резания и потребляемого электроприводом тока. Для измерения сил и моментов резания применяются следующие **чувствительные датчики**:

– динамометрический тензодатчик, в котором зависящее от нагрузки сжатие кольцевого элемента обуславливает изменение сопротивления наклеенных тензодатчиков;

– пьезоэлектрический динамометрический датчик, в котором деформация пьезоэлектрических кристаллов обуславливает образование электрического заряда, преобразуемого посредством усилителя в пропорциональное электрическое напряжение;

– магнитоупругий динамометрический датчик (датчик сопротивления), в котором от нагрузки кольцевого элемента зависят магнитные характеристики материала и индуктивность катушки;

– магнитоупругий динамометрический датчик (датчик напряжения), в котором под действием нагрузки изменяется электрическая связь между первичной и вторичной обмотками;

– магнитоупругий датчик крутящего момента с четырьмя магнитоупругими динамометрическими датчиками, встроенными в неподвижную часть револьверной головки таким образом, что они выдают сигнал, зависящий от силы резания.

Наиболее широкое применение получили системы непрерывного контроля, построенные на базе силоизмерительных подшипников — динамометрических тензодатчиков, встроенных в подшипники, позволяющих измерять силы, действующие на опору шпинделя, либо силы подачи, которые можно оценивать

по силе тока при приводе постоянного тока. Под влиянием осевой составляющей силы резания, которая передается от инструмента на опору шпинделя станка, упругий элемент, оснащенный тензодатчиками, деформируется. Преимуществом такой системы являются высокие чувствительность и разрешающая способность, обеспечивающие надежный контроль инструмента даже малого диаметра или измерение небольших осевых составляющих силы резания.

На рис. 8.9, *а* показана схема тензометрического устройства для контроля осевой силы, возникающей в передней опоре инструментального шпинделя *1*. Посадочное место под упорные подшипники *2* выполнено как единое целое с деформируемым корпусом *3*, воспринимающим осевую силу резания. Корпус приварен к наружному кольцу. Тензодатчики расположены на наружной поверхности деформируемого корпуса. Конструкция обеспечивает герметичность устройства и защиту датчиков от попадания смазочного материала и влаги, а также от механических повреждений.

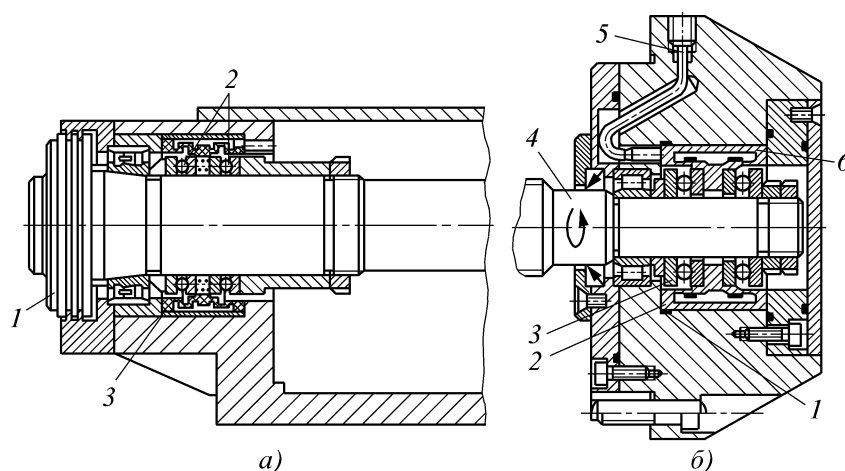


Рис. 8.9. Тензометрические устройства с чувствительным элементом

На рис. 8.9, *б* показано тензометрическое устройство с чувствительным элементом *1* датчика *2*, установленного между подшипником *3* винта *4* привода подачи. Чувствительный элемент состоит из двух концентричных колец, которые образуют прецизионный корпус для подшипников. Внутреннее кольцо имеет форму упругого элемента, несущего тензометрические датчики. Датчики защищены опорной гильзой *б*. Для изоляции соединительного кабеля *5* используется керамика.

Инструментальный монитор позволяет выявить величину износа инструмента, его поломку, а также наличие инструмента при обработке. Принцип работы прибора контроля состояния инструмента основан на изменении параметров, характеризующих процесс резания. Входные параметры регистрируются путем

установки датчиков или преобразования других электрических сигналов. Система контроля работает, ориентируясь на три граничных значения осевой силы. Первая соответствует границе износа, вторая — границе поломки, третья — границе нормальной работы.

Контроль поломок и инструмента играет большую роль при автоматической обработке. При поломке инструмента наступает быстрое увеличение силы подачи, система немедленно реагирует на этот процесс и формирует команду системы управления станком, которая выключает подачу и подает звуковой сигнал обслуживающему персоналу.

На рис. 8.10 показаны варианты изменения контролируемой силы резания (пунктир) в процессе резания по сравнению с заложенной в память УЧПУ стандартной зависимостью (сплошная). Возрастание сил резания свидетельствует об износе инструмента (рис. 8.10, а). Если износ превышает заданный уровень I, монитор дает сигнал о замене инструмента. Если сила резания внезапно превысит уровень II, монитор фиксирует поломку инструмента и станок останавливается (рис. 8.10, б). При отсутствии инструмента сила резания отсутствует и не превышает уровень III.

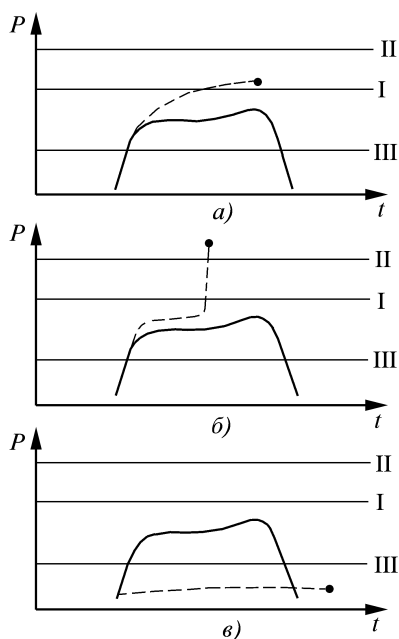


Рис. 8.10. Варианты измерения силы резания  $P$  в процессе обработки

На рис. 8.11 показаны устройства для непрерывного одновременного контроля состояния инструмента в процессе обработки по величинам составляющих сил резания по осям  $X$  и  $Z$  при обработке заготовок на токарном станке. Тензометрические датчики  $l$  смонтированы между подшипниками ходовых винтов продольного и поперечного суппортов.

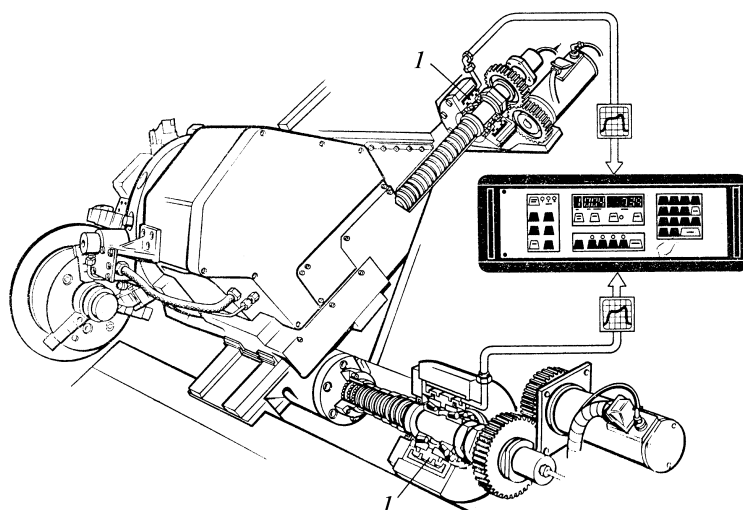


Рис. 8.11. Устройства для контроля состояния инструмента на токарном станке

При оптоэлектронном методе измерения износа инструмента оптический датчик перемещается вдоль режущей кромки резца. Полученное в видеокамере изображение контролируемого инструмента преобразуется в цифровую форму, которая сравнивается с данными, соответствующими заранее введенному в память запоминающего устройства изображению контролируемого инструмента.

Идентификация момента начала смены инструмента в автоматическом цикле может осуществляться путем измерения параметров обрабатываемой детали методом ее непосредственного ощупывания. На токарных станках по результатам измерения автоматически рассчитывается величина коррекции, которая вводится через систему управления в виде перемещения суппорта инструмента. Вместо одного из инструментов в шпиндель или револьверную головку станка вставляется резцедержатель с измерительным щупом, что позволяет после переключения из рабочей в измерительную позицию подавать управляющий сигнал в систему ЧПУ. Измерительный щуп при измерительном цикле подводится к запрограммированному месту детали, измеряет ее истинный размер, после чего система управления сравнивает его с заданным значением. Как только отклонение размера достигнет границы поля допуска, принимается решение о необходимости коррекции.

На токарных станках для автоматического измерения диаметральных размеров применяются автоматические измерительные устройства, которые могут находиться вне зоны обработки или в рабочей зоне станка. В первом случае они устанавливаются взамен инструментального блока, а во втором — измерение происходит параллельно с работой инструмента. При этом измерительные устройства могут быть установлены на суппорте станка. По величине составля-

ющих суммарного отклонения можно оценить отклонение фактического размера детали от заданного в программе и ввести коррекцию на это отклонение.

Измерительное устройство ВБ-4195 конструкции ОАО «ВНИИИзмерения» состоит из двух измерительных блоков (для контроля наружных и внутренних диаметров и длины), токоподводящего разъема и отчетно-командного устройства. Измерительные блоки размещаются в инструментальном магазине токарного станка и по команде ЧПУ подаются на суппорт станка. Датчик измерительного блока встроен в корпус, конфигурация которого аналогична конфигурации корпуса инструментального блока.

Устройство ВБ-4211 состоит из двух приборов: для измерения наружных и внутренних диаметров детали. Результат измерения в виде абсолютного размера фиксируется устройством цифровой индикации и может быть введен в систему управления станком. Особенностью измерительного устройства является возможность последовательных с инструментом действий без съема инструментального блока с суппорта. Устройство устанавливается на продольной каретке станка между инструментальным блоком и шпиндельной бабкой.

На токарных станках с ЧПУ применяются также встраиваемые в револьверные головки измерительные датчики, обеспечивающие контроль размеров в процессе обработки. Сравнение заданных и фактических величин (сигнал рассогласования) является базой для автоматической корректировки положения инструмента, осуществляемой УЧПУ станка.

Измерения могут являться не только средством, обуславливающим возможность установить степень соответствия размеров обработанной детали размерам чертежа, но и средством управления точностью обработки. Это может быть достигнуто созданием устройств активного контроля размеров деталей с обратной связью, контролирующих точность обработки в широком диапазоне размеров и вносящих соответствующие корректировки.

Применение активного контроля повышает степень автоматизации станков с ЧПУ, что особенно необходимо в гибких технологических системах при обработке заготовок по безлюдной технологии (при отсутствии обслуживающего персонала во вторую и третью смены).

Бесконтактные методы непрерывного измерения заготовки в процессе обработки без остановки станка и активный контроль деталей являются наиболее перспективными, базируются на использовании оптико-электронных датчиков вместо механических щупов. При этом обеспечивается контроль размеров и формы деталей, а также их сортировка.

Оптико-электронные измерительные устройства реагируют на интенсивность излучения света. Полупроводниковые фотодетекторы генерируют световые сигналы, сканирующиеся электронным измерительным устройством. Электрический сигнал генерируется пропорционально интенсивности падающего светового потока. Устройство измерения состоит из строчечной камеры, источника света, системы измерения перемещений, микроЭВМ. От источника света через оптическую систему световой поток проектируется на строку диодов, воздействуя на каждый отдельный фотодиод. Интенсивность освещения пропорциональна входному напряжению.

На рис. 8.12 показана схема расположения прибора в рабочей зоне токарного станка. Строчечная камера 2 установлена в гнезде револьверной головки 1 токарного станка, револьверную головку перемещают посредством поперечного 6 и продольного 7 суппортов в направлении осей  $X$  и  $Z$ . Источник света 5 освещает обрабатываемую заготовку 4. Затененная заготовкой зона 3 проектируется на чувствительный элемент 8 камеры. Число неосвещенных фотодиодов  $A$  позволяет определить радиус  $R$  детали. Перед обработкой контролируются размеры зажатой заготовки и определяется фактический припуск. При продольном перемещении суппорта тень от заготовки попадает на камеру, что обеспечивает контроль размеров заготовки. По результатам измерения припуска производится контроль программы.

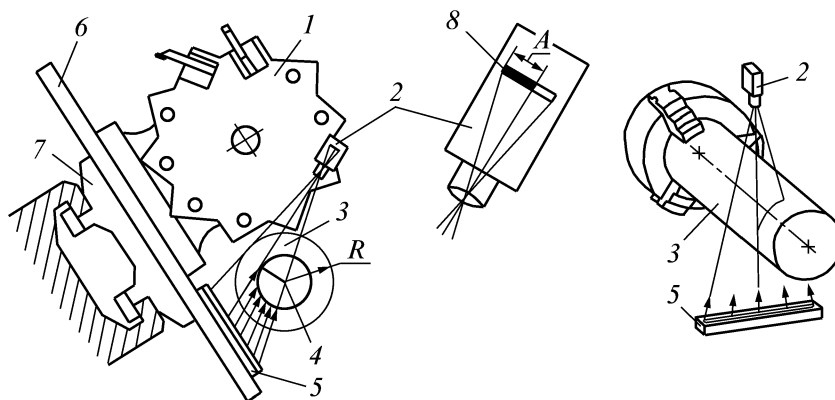


Рис. 8.12. Схема расположения прибора в рабочей зоне токарного станка

В последние годы ведутся работы по использованию лазерной техники для измерения обрабатываемых деталей. Принцип измерения состоит в следующем. Луч лазера, совмещенный с осью, проходящей через центр фотоэлемента, сфокусирован в общей точке пересечения; линза концентрирует на фотодетекторе луч, отраженный от детали. Фотоэлемент определяет положение фокальной точки в трех положениях: перед поверхностью детали, за этой по-



верхностью или непосредственно на поверхности. С помощью передачи винт-гайка головка перемещается таким образом, чтобы фокальная точка совмести-лась с поверхностью обрабатываемой заготовки. Оптический прибор активного контроля для станков с ЧПУ, выполненный на основе лазера, обеспечивает контроль геометрических параметров детали непосредственно в процессе обра-ботки. Данные измерения фактических размеров детали используются для управления положением инструмента с помощью обратной связи. При этом возможно скорректировать ряд погрешностей обработки. Принцип измерения основан на особенности деталей — их незеркальной поверхности. В приборе использован модулированный лазерный источник малой мощности, функционирующий на основе гелий-неоновой смеси.

На многоцелевых станках наибольшее распространение получил метод измерения деталей посредством индикаторов контакта (датчиков касания) — щуповых измерительных головок, шариковые наконечники которых переме-щаются в заданную точку, и считывания координат измерительной системы станка. Наконечник может легко перемещаться под действием силы, действу-ющей в любом направлении. Обработка данных результатов измерения осу-ществляется ЭВМ. Разрешающая способность измерительных головок — 0,001 мм. Такие трехкоординатные головки (триггерные щупы) аналогичны датчикам, применяемым в трехкоординатных измерительных машинах. Кон-троль детали на станке осуществляется трехкоординатной щуповой головкой, сигнальная система которой связана с системой измерения перемещения. Нали-чие в системе ЭВМ позволяет обработать результаты измерений с учетом си-стематических погрешностей станка.

Трехкоординатная щуповая головка состоит из измерительного шарико-вого щупа, измерительной головки и системы передачи сигнала. Сигнальная система щуповой головки связана с системой измерения перемещений. Под-наладка станка и корректировка программы осуществляются в ходе обработки по результатам измерения первой детали. В щуповых головках индуктивного типа беспроводная передача сигнала от измерительного устройства к щупу передается индуктивно. В качестве сигнала, соответствующего измеряемому размеру, используют частоту, изменяющуюся от 11 до 5 кГц.

В хвостовой части головки размещена батарея или аккумулятор для при-вода осциллятора, который включается автоматически при вводе щуповой головки в шпиндель станка. Головка содержит аналоговую индуктивную изме-рительную систему и устройство, бесконтактно передающее сигнал, соответ-ствующий измеренной величине, в преобразователь, состоящий из приемника, микропроцессора для переработки входных данных, печатного устройства для

регистрации отклонений и устройства вывода информации для передачи коррекции в систему ЧПУ. Беспроволочная передача сигнала от измерительного устройства к станку осуществляется индуктивно при возможном зазоре в пределах 0,5–1,5 мм. При оптической передаче сигнала в щуповых головках используется инфракрасное излучение. Результаты измерений могут быть переданы также с помощью радиоволн в приемник сигнала.

На многоцелевых станках для выполнения измерений необходимо предусматривать в управляющих программах выделение специальных измерительных циклов. Измерения могут производиться по каждой из координат. Щуповая измерительная головка на этих станках хранится в инструментальном магазине и автоматически подается манипулятором в шпиндель станка. Щуповые головки проверяют положение заготовки перед обработкой и между отдельными проходами. По команде ЧПУ измерительный наконечник головки приводится в соприкосновение с поверхностью детали и перемещением узла станка вдоль одной из координатных осей. В момент соприкосновения шарового наконечника головки выдает импульс (сигнал), по которому УЧПУ фиксирует координатный размер в измерительной системе станка.

На рис. 8.13 показаны схемы контроля деталей щуповой головкой, а на рис. 8.14 — автоматические циклы измерения щуповой головки.

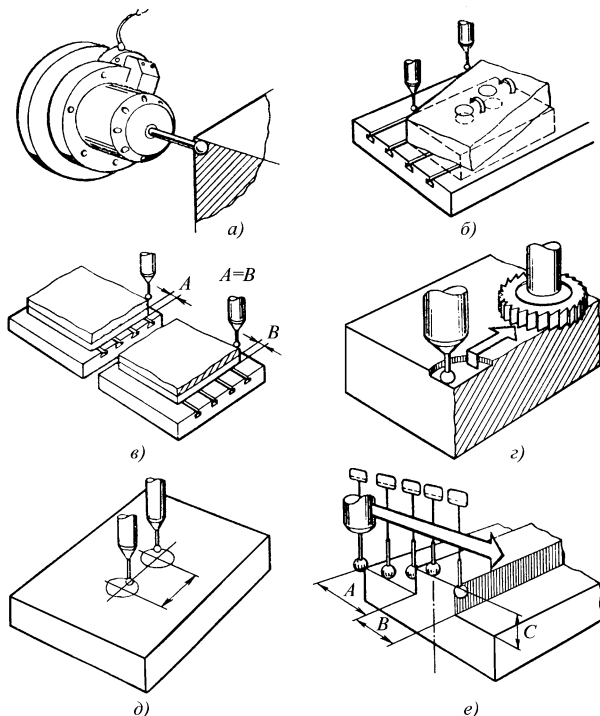


Рис. 8.13. Схемы контроля деталей щуповой головкой:

- a* — установка головки в нулевое положение; *б* — контроль непараллельности стороны заготовки перемещению стола станка и корректировка в процессе обработки;
- в* — контроль припуска на обработку; *г* — контроль глубины обработки;
- д* — контроль межосевого расстояния; *е* — контроль размеров детали

Измерительное задание	Изображение	Измерительное задание	Изображение				
Расстояние в координатном направлении		Плоскость					
Пространственное расстояние (длина)		Круглость					
Расстояние до оси отверстия		Плоскостность					
Центр круга		Параллельность					
Диаметр круга		Угол					
Точка сечения		Перпендикулярность					
Прямая пересечения		Точка пространства					
Прямая		Учитывание шарикового наконечника					
		без учета	+D	-D	+D/2	-D/2	

Рис. 8.14. Автоматические циклы измерения деталей щуповой головкой

## ГЛАВА 9. ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ В АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Цель разработки операционной технологии заключается в том, чтобы, зная зависимости, ограничения и условия, определяющие нормальную работу ТС, решить многовариантную технико-экономическую задачу выбора наиболее эффективной (выгодной) комбинации искомых параметров с учетом особенностей эксплуатации автоматизированного оборудования.

Решения технологических задач при подготовке обработки на ТС для мелкосерийного (переналаживаемого часто) и серийного (переналаживаемого редко) производства существенно различны.

Для *серийного производства* наиболее актуальны задачи сокращения затрат на переналадки станков, отладку технологии и управляющих программ (УП). Для решения задач серийного производства целесообразно использование инструментальных систем из агрегатированного переналаживаемого инструмента и типизация конфигурации обрабатываемых поверхностей с учетом приемов обработки [71]. Отработка технологии и УП в этом случае включается во время переналадки станков. Поэтому отладка операционной технологии обычно заканчивается обработкой нескольких деталей в соответствии с техническими требованиями к ним, УП в дальнейшем не корректируют.

Для серийного производства главное — сокращение станкостоемости, высокая надежность и удобство обслуживания. Объем и содержание работ, связанных с отладкой технологии и УП, также в значительной степени зависят от количества деталей, которые в дальнейшем будут изготавливаться по откорректированной программе. Для решения задач такого производства целесообразно использовать комбинированный и специальный инструмент и другие решения для сокращения времени обработки. Типизация обрабатываемых поверхностей осуществляется только по их конфигурации. При отладке операционной технологии и УП в этом случае значительное внимание следует уделять техническим требованиям к детали, а также автоматизации установки, снятия и измерения детали и т.п.

Разработка операционной технологии для ТС, используемых в массовом производстве, практически не отличается от подготовки этого документа для других видов автоматического оборудования — подробное описание установки, операции, инструмента, оснастки, проходов, переходов, карты эскизов, карты наладки и т.п.

Анализ работы программистов и создателей устройств ЧПУ показал, что проектирование операционной технологии, на основании которой разрабатывают

УП для отдельных станков с ЧПУ, как правило, основано на опыте разработчика. При этом операционная технология, не встретившая возражений со стороны потребителя станка, принимается в качестве образца для последующей разработки. Операционная технология не совершенствуется, и технико-экономических оценок операций, как правило, не проводят. Это связано с тем, что частая смена объектов обработки затрудняет накопление исходных данных для подобных расчетов, а относительно небольшая величина обрабатываемых партий делает малоэффективным экспериментальное совершенствование операционной технологии на рабочем месте. Поиск оптимальных решений для операционной технологии станков с ЧПУ в производственных условиях не стимулируется.

Вместе с тем условия оптимальности технологических процессов для современных ТС существенно отличаются от условий, обеспечивающих минимальную себестоимость обработки при заданном качестве на автоматических станках в массовом производстве.

Для ТС, процесс обработки на которых осуществляется автоматически, все условия выполнения операции (выбор режущего инструмента, последовательность обработки и др.) должны быть заданы так же, как для автоматических станков, и занесены на программноноситель. Оператор практически лишен возможности вмешиваться в процесс обработки.

При многономенклатурном характере мелкосерийного и серийного производства использование ТС связано с частыми переналадками. По быстродействию, производительности и стоимости ТС значительно превосходят станки с ЧПУ. Инструменты, работающие в составе ТС, комплектуются в инструментальных магазинах (в виде многоинструментных наладок) и заменяются по результатам диагностирования износа или по программе. Технологическая подготовка обработки на ТС связана со значительными затратами, и при оценке эффективности технологического решения нельзя игнорировать затраты на отладку и переналадку ТС.

Для **оптимизации операций**, выполняемых на ТС, наиболее плодотворным является подход, предусматривающий использование метода проверенных технологических решений, метода поэлементной типизации операционной технологии и принципов формализации проектирования операции [7].

*Метод проверенных технологических решений* заключается в использовании множества оптимизированных решений, проверенных в конкретных производственных условиях, необходимых и достаточных для формирования операционной технологии обработки заданной совокупности деталей с четким определением областей применения этих технологических решений. Метод

предусматривает выявление технологических возможностей ТС в производственных условиях, разработку и проверку оптимальных технологических решений, учитывающих эти возможности и последующее использование в УП [72].

Метод проверенных решений позволяет ограничить объем исходной информации при высокой ее надежности; обеспечивает: надежность и стабильность операционной технологии, высокое качество УП; адаптируемость к изменению производства; инвариантность относительно типов и моделей оборудования, систем управления, технологической оснастки; простоту формализации процесса проектирования технологии и подготовки УП.

Для метода проверенных решений важным является:

- а) выявление групп вопросов, рассматриваемых как одно технологическое решение, подлежащее экспериментальной отработке в конкретных условиях;
- б) определение границ, характеризующих условия обработки, внутри которых технологическое решение остается оптимальным для совокупности деталей;
- в) методика экспериментальной отработки решений в производственных условиях.

*Метод поэлементной типизации* операционной технологии заключается в выявлении множества элементарных поверхностей, характеризующих конструктивно-технологической общностью и образуемых по общим правилам при одинаковых технологических решениях, необходимых и достаточных для описания всего многообразия форм деталей (полуфабрикатов), обрабатываемых на ТС, и в установлении типовых технологий обработки этих элементарных поверхностей с использованием проверенных технологических решений.

Метод поэлементной типизации дает возможность распространить проверенные решения на широкий круг деталей, которые могут быть изготовлены путем обработки составляющих их элементарных поверхностей.

Для метода поэлементной типизации существенно выявление элементарных поверхностей, для обработки которых используют общие технологические решения.

*Принципы формализации проектирования* операционной технологии предусматривают систематизацию технологических решений и процедур выбора решений при формировании УП, что позволяет осуществлять подготовку программ машинным способом.

Один из наиболее важных моментов при проектировании технологического процесса операции — выбор и вычисление критерия оптимальности. Для этого необходим анализ структуры штучного времени и всех категорий затрат, связанных с обработкой на ТС, включая затраты на подготовку УП и ее отладку.

Штучное время  $t_{шт.}$ , рассматриваемое без учета времени на организационно-техническое обслуживание, отдых рабочего и неизбежные простои определяются по формуле:

$$t_{шт.} = t_{уП} + t_{дет} + t_{п.з.},$$

где  $t_{уП}$  — время автоматической работы станка по УП:

$$t_{уП} = t_p + t_{х.н} + t_{пер},$$

$t_p$  — время рабочего хода на деталь (операцию), зависит от числа и типов инструментов наладки, последовательности их работы, величины резания, направлений подвода, выхода, а также режимов резания ( $t, S, v$ ):

$$t_p = t_{рез} + t_{х.р.},$$

где  $t_{рез}$  — время резания;  $t_{х.р.}$  — время холостых перемещений, связанных со временем резания;  $t_{х.н}$  — время холостых перемещений, не зависящее от времени рабочего хода. Например: время от пуска станка до выхода первого инструмента на позицию обработки; время возврата всех узлов станка в исходное положение после окончания работы последним инструментом; время возврата инструмента для следующего прохода и т.п.;  $t_{пер}$  — время, связанное с каждым их переходов, — время на смену инструмента, а точнее на отвод предыдущего инструмента из зоны обработки в позицию смены, смена инструмента, подвод и позиционирование последующего инструмента для выполнения перехода;  $t_{дет}$  — время, связанное с деталью, — время на установку, закрепление, снятие и промеры детали, выполняемые на станке или вне его, но при неработающем станке; время на пуск станка и установку программносителя в исходное положение;  $t_{п.з.}$  — подготовительно-заключительное время, приходящееся на деталь (операцию).

Время  $t_{ин}$  — это сумма времен  $\Pi_i^H$  простоя станка за период стойкости, связанное с заменой  $i$ -го инструмента. При работе различными инструментами, заменяемыми по мере их износа, выкрашивания или поломки:

$$t_{ин} = \sum_{i=1}^n (\Pi_i^H / Q_i),$$

где  $n$  — количество инструментов, используемых в операции;  $Q_i$  — стойкость  $i$ -го инструмента в штуках деталей.

Время  $t_{\text{пер}}$  — время технического обслуживания, связанное с наладкой инструмента на размер и регулирование в процессе обработки для обеспечения требуемой точности:

$$t_{\text{пер}} = \sum_{i=1}^n (\Pi_i^{\text{пер}} / Q_i),$$

где  $\Pi_i^{\text{пер}}$  — время простоя станка, связанное с регулированием  $i$ -го инструмента.

Из рассмотрения элементов штучного времени следует, что переменная доля  $\tau$  штучного времени  $t_{\text{шт}}$ , зависящая от построения операции, равна

$$\tau = t_p + t_{\text{ин}} + t_{\text{пер}} + t_{\text{пер}}.$$

### 9.1. Обработка тел вращения

В качестве критерия оптимальности технологического процесса токарной операции принимают переменную долю себестоимости операции. Для расчета используют себестоимость станко-минуты рабочего хода  $E_p$  и вспомогательной работы  $E_b$ , а также относительный эксплуатационно-инструментальный показатель  $\Theta_k$ . Эти величины изменяются в зависимости от организационно-производственных условий эксплуатации станков с ЧПУ.

При заданном объеме выпуска со станка значения  $E_p$  и  $E_b$  уменьшаются, период экономической стойкости инструмента  $T_{\text{ЭК}}$  увеличивается, скорость резания и переменная доля себестоимости снижаются. То же имеет место при много-станочном обслуживании, когда заработная плата рабочего с начислениями распределяется на определенное количество станков, снижая значения  $E_p$  и  $E_b$  для каждого из них. Экономическая стойкость  $T_{\text{ЭК}}$  соответственно увеличивается, скорость резания уменьшается и переменная доля себестоимости снижается. В этих случаях затраты, связанные с работой станка и заработной платой, являющиеся постоянными в минуту, сокращаются, поэтому преимущества от увеличения скорости резания и совершенствования технологии незначительны.

По мере увеличения цен на высокопроизводительное точное и жесткое оборудование существенно возрастает себестоимость станко-минуты  $E_p$ , что приводит к уменьшению второго слагаемого в формуле:



$$\mathcal{E}_{ki} = \Pi_i^a + (S_i/E_p),$$

где  $S_i$  — стоимость амортизации, заточки и регулирования  $i$ -го инструмента.

Дополнительно это слагаемое уменьшается благодаря совершенствованию конструкции и технологии изготовления режущего инструмента. В результате величина относительного эксплуатационно-инструментального показателя  $\mathcal{E}_k$  все в большей степени начинает зависеть от потерь времени работы оборудования, связанного с заменой инструмента. Повышение быстроты смены инструмента сокращает значение  $\mathcal{E}_k$ , форсировать режимы работы и увеличить производительность. Применение дублеров инструмента сокращает простои оборудования не только в связи с износом инструмента, но и при переналадках.

Качество операционной технологии тем выше, чем меньшим количеством инструмента выполняется заданный объем работ и чем меньше затрачивается времени на резание (при экономических режимах резания), если обеспечивается высокая надежность работы инструмента.

Например, конструкторско-технологический элемент (КТЭ) для тел вращения — цилиндр, конус, фасонная поверхность, плоскость и другие, которые можно обработать резцом с главным углом в плане  $\varphi = 5^\circ$  и вспомогательным углом  $\varphi_1 = 30^\circ$ . Этот КТЭ может быть на наружных, внутренних и торцевых поверхностях тел вращения.

*Структура* операции по существу соответствует перечню переходов обработки КТЭ в операции и последовательности их выполнения, предусмотренных маршрутным технологическим процессом.

Для подготовки УП необходимо знать параметры каждого прохода от начала до конца, поэтому важны технологические данные по режимам каждого прохода на всем его протяжении, специальные команды (охлаждение и т.п.) и последовательность выполнения этих проходов. С точки зрения подготовки УП проход — это цикл, включающий все необходимое для работы станка, а последовательность этих проходов — операционная технология. В операционной технологии проход может выполняться на различных участках КТЭ, с отличающимися режимами по траектории движения инструмента, с остановками и т.п., например: сверление отверстия; сверление с выводами сверла; сверление с изменением подачи на входе и выходе и т.п.

Из теории надежности известно, что вероятность безотказной работы нескольких последовательно включаемых элементов равна произведению вероятностей безотказной работы этих элементов. Следовательно, и с точки зрения надежности в токарной операции целесообразно использовать минимально не-

обходимое для заданного объема работ число инструментов. При добавлении инструмента в наладку он должен обеспечивать сохранение надежности работы этой наладки и обладать существенно большей надежностью, чем надежность наладки до его добавления [26].

Отдельные параметры технологического процесса токарной операции выбирают с учетом того, что содержание операции и требования к ней регламентированы маршрутным технологическим процессом изготовления детали, чертежом детали и ее служебным назначением. Предлагаемые ниже условия существенно облегчают выбор **параметров технологического процесса**:

а) выбор производится в последовательности, соответствующей разработке операционной технологии;

б) на каждом этапе разработки используют частный критерий оценки качества операционной технологии, исключающий необходимость пересмотра принятого решения на последующих этапах;

в) этот частный критерий не противоречит общему критерию оценки качества операционной технологии при всех рассматриваемых условиях.

*Инструмент, применяемый для токарной операции*, должен обеспечивать обработку поверхностей всех форм и размеров деталей, которые обрабатывают на аналогичных станках в конкретных условиях данного производства. Общее число типоразмеров используемого инструмента необходимо минимизировать:

а) путем замены фасонного инструмента более простым, но перемещающимся по сложной траектории;

б) путем замены мерного инструмента немерным (даже если при этом может потребоваться дополнительный проход);

в) применением инструмента, пригодного для различных видов работ (черновых, чистовых; обтачивания, растачивания и т.п.), за счет унификации геометрических параметров режущей части и присоединительных размеров [28].

При определении номенклатуры инструмента, закрепляемого за ТС, необходимо принимать во внимание стоимость инструмента, его надежность и экономичность, особенности инструментального обеспечения и опыт использования инструмента различных конструкций.

Из всех инструментов, позволяющих обработать одинаковые формы поверхностей, в номенклатуру включают тот, который обеспечивает наименьшее время обработки при одинаковой надежности. При этом режимы резания для сравниваемых инструментов должны соответствовать возможностям инструмента и станка. Ограничения, вызываемые жесткостью детали, прочностью и жесткостью средств крепления, можно не учитывать.

*Последовательность ввода инструментов в работу* определяется требованиями операции. В тех случаях, когда требования к операции могут быть выполнены благодаря различной последовательности ввода инструментов, необходимо выбрать такую последовательность, при которой сумма времен, связанных с выполнением перехода, минимальна.

*Оптимизационные расчеты* выполняют для часто встречающихся условий обработки. На основании результатов расчетов устанавливают простые правила, используемые при подготовке программ. В процессе подготовки оптимизационным расчетом пользоваться нецелесообразно [24].

*Траектории движения инструмента* проектируют так, чтобы минимизировать время обработки и увеличить надежность режущего инструмента. С точки зрения выбора критерия различают траекторию рабочих и траекторию вспомогательных перемещений. *Траекторию рабочих перемещений* разделяют на участки установившегося резания, врезания и выхода инструмента. На этом этапе разработки операционной технологии уже известны: режущий инструмент, последовательность его ввода и содержание работы каждого инструмента. Поэтому траекторию можно выбирать для каждого инструмента в отдельности.

Траекторию перемещений инструмента устанавливают до назначения режимов резания. Как следствие этого, определение оптимальной траектории сводится к оценке пути инструмента в металле при равенстве припусков за проход, снимаемых в сравниваемых вариантах. Таким образом, необходимо минимизировать выражение:

$$\sum_{i=1}^n l_i(t, \xi),$$

где  $l_i$  — путь  $i$ -го инструмента, зависящий от глубины резания  $t$  и формы траектории перемещений  $\xi$  при неизменных конфигурации и объеме припуска, снимаемого  $i$ -м инструментом.

Поскольку варианты сравнивают при условно одинаковых режимах резания, надежность инструмента сохраняется одинаковой в сравниваемых вариантах.

Надежность инструмента во многом зависит от организации его работы на участках врезания и выхода. На этих участках происходит нагружение (разгрузка) технологической системы силами резания, упругая деформация звеньев системы, выборка зазоров и др.

Неправильное построение траектории этих участков может привести к снижению производительности, появлению «зарезов», «выхватов» на обработанной поверхности, поломкам инструмента.

Вместе с тем участки врезания и входа существенно короче участков установившегося резания. Поэтому при выборе траектории врезания варианты следует оценивать по их влиянию на надежность инструмента. Предпочтительны траектории, обеспечивающие плавное увеличение (уменьшение) сил резания до значений, характерных для участка установившегося резания, и наименьшие отличия в направлении сил на этих участках. Если рассматриваемые варианты обеспечивают одинаковую надежность, то в качестве дополнительного критерия используют время выполнения врезания (выхода).

*Траектория вспомогательных перемещений инструмента* не влияет на надежность работы инструментальной наладки. Поэтому оценивать выбранные варианты можно по времени выполнения этих перемещений.

Траекторию вспомогательных перемещений (схему перемещений) определяют для часто встречающихся условий обработки. На основании результатов расчетов устанавливают простые правила, используемые при подготовке УП.

Затраты на токарную операцию и ее надежность во многом зависят от уровня режимов резания. Поэтому их следует назначать после установления остальных параметров операционной технологии. При этом необходимо учитывать технологические решения, принятые на предшествующих этапах разработки, а также организационно-технические условия выполнения операции.

## 9.2. Обработка корпусных деталей

Большой опыт по применению станков с ЧПУ в условиях серийного производства накоплен заводами автомобильной промышленности. Как показал анализ, этот опыт может быть использован в условиях заводов других отраслей с серийным характером производства [14].

Изготовление корпуса пневмогидроусилителя (рис. 9.1) включает в себя обработку двух базовых многоступенчатых отверстий с параллельными осями, одно из которых глухое, другое — сквозное. Каждое из отверстий имеет соответственно 4; 5 ступеней, в связи с чем для их обработки применяют комбинированный инструмент. Кроме основных отверстий деталь имеет соосные с ними цапфы для ее установки и монтажа, большое количество крепежных отверстий, а также мелких отверстий, служащих каналами для тормозной жидкости. К корпусу предъявляются следующие требования по точности.

1. Точность:

- основных отверстий — H7–H9;
- наружных цилиндрических поверхностей (цапф) — H9;
- линейных размеров, мм — 0,17.

2. Некруглость основных отверстий, мм — 0,01.

3. Биение поверхностей соосных отверстий, мм — 0,015.
4. Межцентровое расстояние, мм —  $94 \pm 0,07$ .
5. Параметр шероховатости поверхности  $Ra$ , мкм (по ГОСТ 2789–73):
  - основных отверстий — 1,25; 2,5;
  - базовых плоскостей — 2,5.

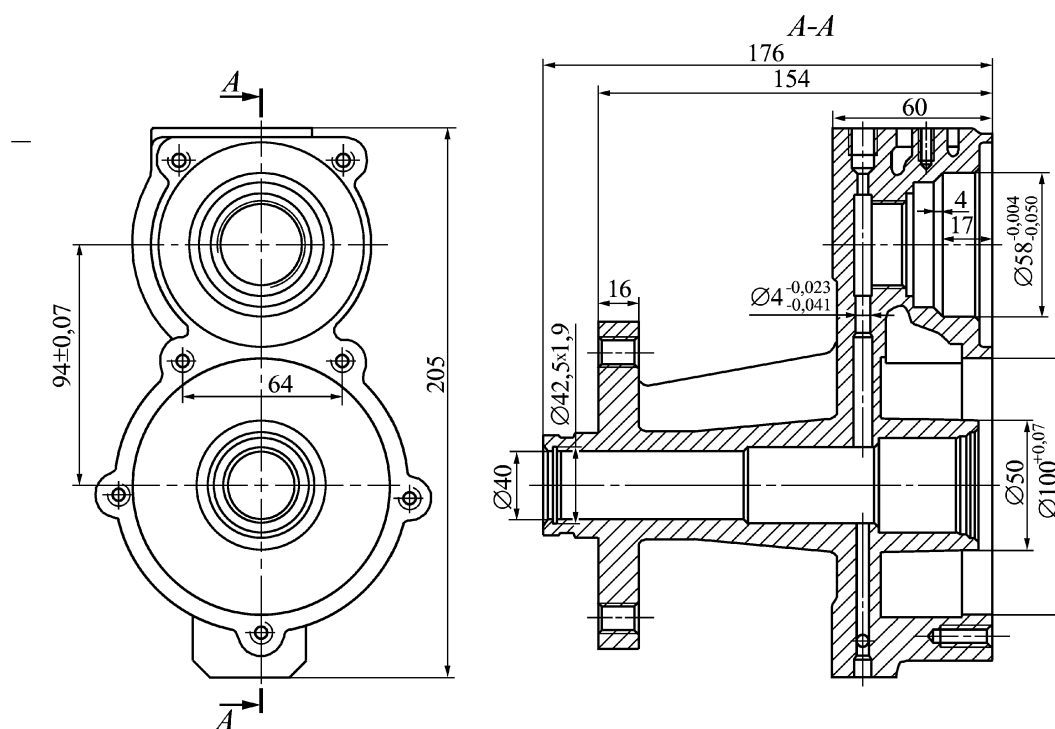


Рис. 9.1. Корпус пневмогидроусилителя

Заготовку получают литьем из чугуна СЧ 25 по 2-му классу точности с литейными припусками на обработку до 4 мм.

Корпус пневмогидроусилителя изготавливают на ГПМ с горизонтальной осью вращения шпинделя, поворотным столом размером 500×500 мм, мощностью привода шпинделя 11 кВт, магазином на 36 инструментов и пятикоординатной системой ЧПУ типа CNC.

Все работы по обслуживанию станка, его переналадке, настройке инструментов, проверке готовых деталей и сдаче деталей в ОТК выполняет рабочий. Заточка инструмента производится централизованно. Годовая программа выпуска детали 5 000 шт.

Выполняется следующая механическая обработка заготовки:

- предварительная черновая обработка, где осуществляется обработка передней и задней плоскостей и отверстия диаметром 100 мм с припуском 2 мм;
- получистовая и чистовая обработка заготовки с 6 сторон на станке с ЧПУ (две операции): первая включает в себя обработку основных базовых отверстий и плоскостей с 4 сторон, вторая — обработку 2 оставшихся сторон;
- сверление мелких отверстий.

Заготовку устанавливают в специальное приспособление вручную и ориентируют в призме по литой бобышке и двум упорам в направлении осей  $Y$  и  $Z$ . Прижимы выполнены шарнирными, что обеспечивает закрепление заготовки без перекосов относительно базовых поверхностей. Заготовку крепят динамометрическим ключом, позволяющим осуществлять зажим с предварительно установленным усилием. Приспособление снабжено откидным прихватом, который в нерабочем положении дает возможность легко очищать опоры от стружки, а также обеспечивает удобство при установке заготовки. Время установки (снятия) составляет 1–2 мин.

Общее количество инструментов в наладке 28 шт., в том числе 9 комбинированных. При изготовлении детали с использованием стандартного инструмента для тех же переходов понадобилось бы 43 инструмента.

Технологические переходы выполняются в следующем порядке: сначала торцовой и концевой фрезой фрезеруются внешние плоскости, затем уступы, выточки и выемки.

Время, затрачиваемое на смену инструмента (время «от реза до реза») больше, чем время, необходимое для поворота стола с заготовкой, поэтому обработку выполняют последовательно, начиная с внешних поверхностей, подлежащих фрезерованию на каждой стороне заготовки без смены инструмента. После этого выполняют получистовую и окончательную обработку отверстий. Получистовая обработка сквозного многоступенчатого отверстия комбинированным инструментом осуществляется по мере вступления в работу каждой последующей резцовой вставки. Скорость резания установлена по наибольшему обрабатываемому диаметру, равному 98 мм (размер по чертежу  $100^{+0,07}$  мм). Во время обработки при переходе от ступени к ступени частота вращения не изменяется. Величина подачи устанавливается экспериментально при отладке ТП.

При черновой обработке глухого четырехступенчатого отверстия применяют два твердосплавных комбинированных зенкера со ступенями диаметром 55,0/33,5 и 80,0/50,0 мм. Резание выполняют по литейной корке на режиме:  $v = 81,5$  м/мин,  $S_0 = 0,2$  мм/об. На последующих переходах осуществляют получистовое растачивание обработанных ранее многоступенчатых отверстий. Размеры ступеней из резцовых вставок сохраняются такими же, как и при черновом зенкерении. Там, где геометрия отверстия позволяет располагать резцовые вставки на расстоянии, соответствующем глубине ступеней, обработку выполняют одновременно. Режимы на получистовых расточных переходах назначают по [72]. Припуск на окончательное растачивание 0,45 мм.

На следующих переходах выполняют фрезерование канавок в отверстиях. Канавку  $\varnothing 42,5 \times 1,9$  мм обрабатывают специальной дисковой фрезой.

Затем производят центрование, сверление и нарезание резьбы отверстий одного диаметра, расположенных на разных сторонах заготовки.

Переходы чистовой обработки отверстий с точностью Н7 и Н9 выполняются последними. Эти отверстия также обрабатывают комбинированными расточными оправками. Окончательное растачивание совмещают со снятием фасок или растачиванием выточки.

В результате использования комбинированного инструмента при обработке пневмогидроусилителя на станке с ЧПУ обеспечивается:

- сокращение основного технологического времени  $t_{\text{маш}}$  на 24 % — с 44,9 до 34,07 мин;
- сокращение вспомогательного времени  $t_{\text{в}}$  на 35 % — с 14,3 до 9,33 мин;
- сокращение штучного времени обработки  $t_{\text{шт}}$  на 27 % — с 59,2 до 43,4 мин;
- возможность увеличения годового выпуска деталей примерно на 1 000 шт.

В качестве примера в табл. 9.1 приведены основные наладки инструмента для обработки корпуса топливного насоса высокого давления (ТНВД).

Заготовка корпуса — отливка АК9ч ГОСТ 1583–93, обрабатывается на ГПМ мод. СЦ ИС630НСК-А63 с системой ЧПУ «Sinumerik 840D».

Таблица 9.1

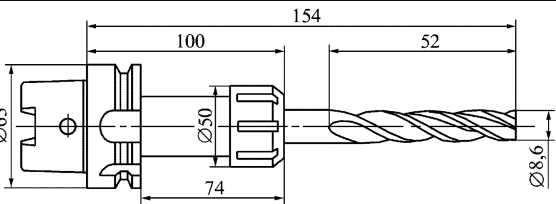
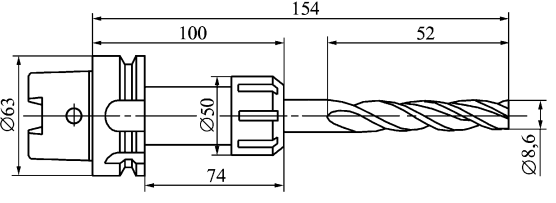
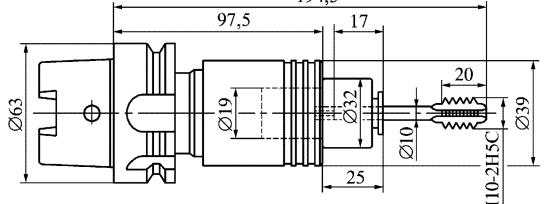
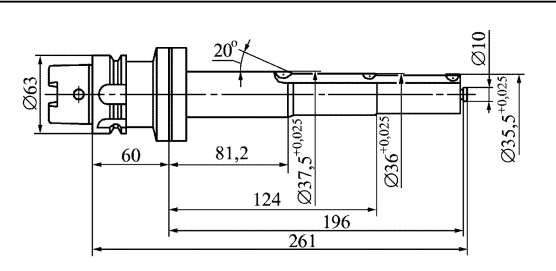
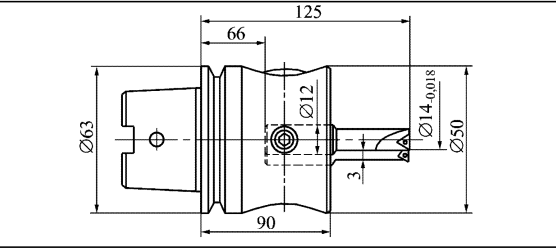
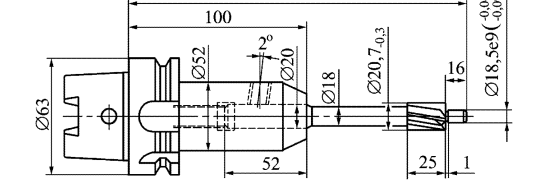
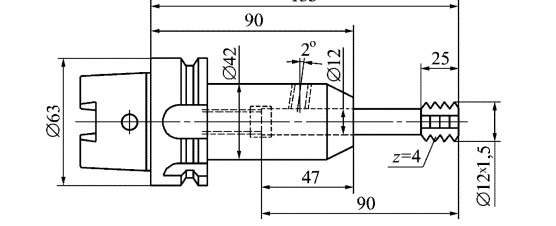
### Карта наладок инструмента для изготовления корпуса ТНВД

№ перехода	Содержание перехода	Режущий инструмент	Схема наладки	Режим резания		
				v м/мин	n мин <sup>-1</sup>	S <sub>0</sub> мм/об
1	Фрезеровать плоскость 276×80 мм в размер 183±0,145 мм	Фреза торцовая с СРП Ø80		301	1 200	0,6
2	Фрезеровать торец 235×89 мм в размер 280 мм у 2 заготовок			301	1 200	0,6
3	Фрезеровать плоскость 276×80 мм в размер 183±0,145 мм			301	1 200	0,6
4	Фрезеровать торец 235×89 мм в размер 276,6 <sub>-0,2</sub> мм у 2 заготовок			301	1 200	0,6

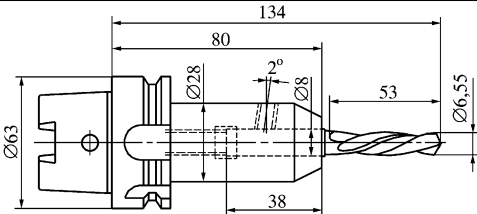
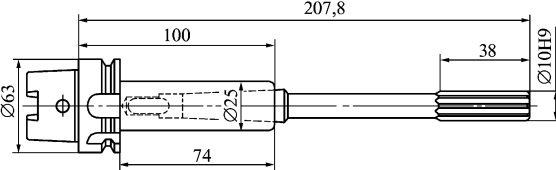
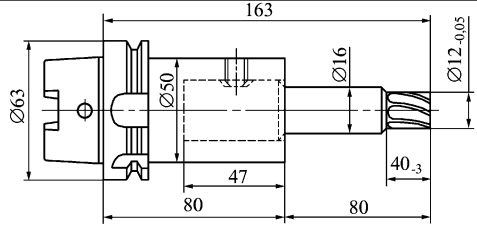
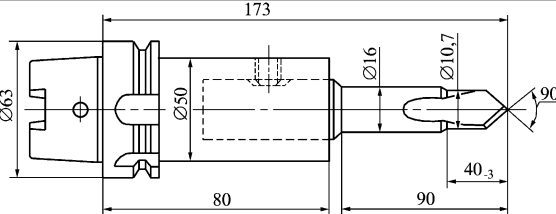
№ перехода	Содержание перехода	Режущий инструмент	Схема наладки	Режим резания		
				<i>v</i>	<i>n</i>	<i>S<sub>0</sub></i>
				м/мин	мин <sup>-1</sup>	мм/об
5	Сверлить отв. $\varnothing 17/18^{+0,021/}$ <math>15^\circ \times 1,6</math> мм глубиной 72/22 мм в 2 заготовках	Специальное твердосплавное сверло с ПКА $\varnothing 17/18/19$		113	2 000	0,16
6	Сверлить отв. $\varnothing 17/18^{+0,021/}$ <math>15^\circ \times 1,6</math> мм глубиной 72/22 мм в 2 заготовках			113	2 000	0,16
7	Сверлить до центра отв. $\varnothing 17$ мм в 2 заготовках	Ружейное сверло твердосплавное $\varnothing 17$		96	1 800	0,05
8	Фрезеровать $R56,2$ мм ( $Rz 20$ ) в 2 заготовках	Фреза концевая с СРП $\varnothing 40$		628	5 000	0,15
9	Фрезеровать $R56,2$ мм ( $Rz 20$ ) в 2 заготовках			628	5 000	0,15
10	Расточить предварительно $\varnothing 66,5$ мм и $\varnothing 70$ мм (проверка), $\varnothing 73,5 < 45^\circ$ мм, фаска $1,6 \times 30^\circ$	Резцовые вставки с СРП в специальной расточной оправке		714 461	3 250 2 000	0,18 0,05
11	Фрезеровать винтовой интерполяцией $\varnothing 70^{+0,72}$ мм на глубину 10 мм	Фреза концевая с СРП $\varnothing 32$		990	7 400	0,2
12	Фрезеровать винтовой интерполяцией $\varnothing 70^{+0,72}$ мм на глубину 10 мм			990	7 400	0,2
13	Ввести ориентированную оправку в отв. $\varnothing 62$ мм, установить в ось отверстия. Расточить $\varnothing 70$ мм глубиной 126,5 мм и $\varnothing 66,5$ мм глубиной 21 мм, фаску $1,6 \times 30^\circ$	Резцовые вставки с СРП в специальной расточной оправке		769 414	3 500 2 000	0,17 0,05



№ перехода	Содержание перехода	Режущий инструмент	Схема наладки	Режим резания		
				v	n	S <sub>0</sub>
				м/мин	мин <sup>-1</sup>	мм/об
14	Центровать отв. Ø20 мм; Ø6,2 мм; 17 отв. Ø10 мм (M8), отв. Ø8(Ø6) мм и Ø22 <sup>-0,02</sup> <sub>-0,041</sub> мм	Сверло центровочное твердосплавное 90° Ø20		195	3 100	0,1
15	Центровать 4 отв. Ø6 мм до Ø7 мм и 12 отв. M10 до Ø12 мм			117	3 100	0,1
16	Зачистить 6 отв. под расточку до Ø34 мм	Сверло с СРП Ø34		300	2 800	0,12
17	Расточить предварительно 6 отв. Ø35/Ø35,5/ <20°×Ø37/ <20°×Ø39 мм	Твердо- сплавные СРП в специальной расточной оправке		581	5 000	0,06
18	Расточить предварительно 6 отв. Ø35/Ø35,3/ <20°×Ø37/ <20°×Ø39 мм			581	5 000	0,06
19	Центровать с образованием фасок 4 отв. Ø18,5 <sup>+1</sup> мм	Сверло быстрорежущее с покрытием TiN Ø18,5		70	1 200	0,06
20	Сверлить 4 отв. Ø5,2 мм глубиной 16 мм под резьбу M6-6H	Сверло-зенкер твердо- сплавный Ø5,2		124	7 600	0,12
21	Нарезать резьбу M6-6H в 4 отв. глубиной не менее 9 мм	Метчик быстрорежущий M6-6H		7,5	400	1

№ перехода	Содержание перехода	Режущий инструмент	Схема наладки	Режим резания		
				<i>v</i>	<i>n</i>	<i>S<sub>б</sub></i>
				м/мин	мин <sup>-1</sup>	мм/об
22	Сверлить 12 отв. Ø8,6 мм глубиной 24,5 мм под резьбу М10-2Н5С	Сверло-зенкер твердосплавный Ø8,6		124	4 600	0,24
23	Сверлить 12 отв. Ø8,6 мм глубиной 24,5 мм под резьбу М10-2Н5С	Сверло-зенкер твердосплавный Ø8,6		124	4 600	0,24
24	Нарезать резьбу М10-2Н5С глубиной не менее 18 мм в 12 отв.	Метчик быстрорежущий М10-2Н5С		12,6	400	1,42
25	Развернуть начисто 6 отв. Ø35,5/Ø36/Ø37,5 мм	Специальная развертка с ПКА Ø35,5/Ø36/Ø37,5		100	850	0,18
26	Развернуть начисто 6 отв. Ø35,5/Ø36/Ø37,5 мм			100	850	0,15
27	Расточить начисто 2 отв. Ø14 <sub>-0,018</sub> мм во втулках	Резец с СРП в высокоскоростной чистовой расточной головке		246	5 600	0,06
28	Зенковать отв. Ø20,7 мм глубиной 1,6±0,5 мм	Специальная твердосплавная зенковка Ø20,7		98	1 500	0,3
29	Фрезеровать резьбу М20×1,5-6Н глубиной 12 мм	Резьбовая твердосплавная фреза Ø12×25×1,5/z4/		452	12 000	0,2

№ перехода	Содержание перехода	Режущий инструмент	Схема наладки	Режим резания		
				v	n	S <sub>0</sub>
				м/мин	мин <sup>-1</sup>	мм/об
30	Развернуть отв. $\varnothing 6_{-0,030}^{-0,055}$ мм глубиной 12 мм	Твердосплавная развертка $\varnothing 5,963$		13	700	0,17
31	Сверлить 3 отв. $\varnothing 5,1$ мм глубиной 18 мм с образованием фаски	Твердосплавное сверло $\varnothing 5,1$		99	6 200	0,2
32	Сверлить 3 отв. $\varnothing 5,1$ мм глубиной 18 мм с образованием фаски			99	6 200	0,2
33	Сверлить отв. $\varnothing 31,8$ мм на проход	Сверло с СРП $\varnothing 31,8$		300	3 000	0,12
34	Фрезеровать фаску $1 \times 45^\circ$ в отв. $\varnothing 31,8$ мм. Центровать отверстие М8	Сверло твердосплавное центровочное $90^\circ$		195	3 100	0,11
35	Расточить начисто отв. $\varnothing 32_{+0,025}$ мм на проход	Резцовая вставка с СРП в специальной оправке		372	3 700	0,06
36	Сверлить 3 отв. $\varnothing 22,5$ мм глубиной 23 мм; 42 мм на проход	Твердосплавное сверло $\varnothing 22,5$		106	1 500	0,25
37	Сверлить 3 отв. $\varnothing 22,5$ мм глубиной 23 мм; 42 мм на проход			106	1 500	0,25
38	Центровать 3 отв. $\varnothing 6,8$ мм с образованием фасок $2 \times 30^\circ$	Центровочное твердосплавное сверло		77	2 700	0,1

№ перехода	Содержание перехода	Режущий инструмент	Схема наладки	Режим резания		
				<i>v</i>	<i>n</i>	<i>S<sub>0</sub></i>
				м/мин	мин <sup>-1</sup>	мм/об
39	Сверлить 3 отв. Ø6,55 мм глубиной 38 мм	Сверло-зенкер твердосплав- ный Ø6,55		185	9 000	0,2
40	Развернуть начисто 2 отв. Ø10 <sup>+0,03</sup> мм глубиной 15 мм	Твердо- сплавная развертка Ø10		19	600	028
41	Зенковать 4 места под зацентровку отверстий Ø10,5 мм	Зенковка быстрорежущая специальная Ø12		35	1 000	0,08
42	Центровать 4 отв. Ø10,5 до Ø10,7 мм	Сверло быстрорежущее центровочное специальное Ø10,7		34	1 000	0,08

## ГЛАВА 10. НАЗНАЧЕНИЕ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ

### 10.1. Группирование материалов по обрабатываемости

Материалы, применяемые в машиностроении для изготовления несущих нагрузку деталей, принято называть конструкционными. Основными *конструкционными материалами* являются:

а) черные металлы и сплавы на основе железа (углеродистые, легированные и коррозионностойкие стали, специальные сплавы, чугуны);

б) цветные металлы и сплавы на основе меди, алюминия, титана и других элементов;

в) пластики.

Конструкционные металлы имеют различные механические свойства, зависящие от их химического состава и структурного состояния. Сочетание таких характеристик, как химический состав, механические свойства и структурное состояние металла, определяет его сопротивление обработке резанием. Обрабатываемость металлов резанием находит свое проявление в общих закономерностях процессов стружкообразования, формирования новых поверхностей и качества обработанных поверхностей.

Промышленностью выпускается прокат различного профиля из конструкционных сталей и сплавов более полутора десятка марок. В принятой в отечественном машиностроении стандартной маркировке большинства конструкционных металлов указывается процентное содержание в металле основных легирующих элементов. Маркировка конструкционных металлов состоит из сочетания букв русского алфавита и цифр. Для легирующих элементов приняты следующие буквенные обозначения:

Азот	А	Молибден	М	Углерод	У
Ниобий	Б	Никель	Н	Ванадий	Ф
Вольфрам	В	Фосфор	П	Хром	Х
Марганец	Г	Бор	Р	Цирконий	Ц
Медь	Д	Кремний	С	Алюминий	Ю
Селен	Е	Титан	Т		

В маркировке за каждой из букв обычно указаны цифры, которые показывают содержание (в процентах) соответствующего легирующего элемента. Отсутствие цифры означает, что среднее содержание легирующего элемента, закодированного этой буквой, равно одному проценту. Цифры, стоящие в маркировке пер-

выми, указывают содержание в металле углерода в сотых долях процента. Элементы, содержание которых в металле менее одного процента, в маркировку не включаются. Например, конструкционная углеродистая сталь 45 содержит 0,45 % углерода; хромистая сталь 40Х содержит 0,4 % углерода и 1 % хрома; хромоникелевая сталь 30ХН содержит 0,3 % углерода, 1 % хрома и 1 % никеля.

По составу и содержанию легирующих элементов конструкционные стали делят на **группы**:

– стали, содержащие только углерод, образуют группу наиболее широко применяемых в машиностроении *углеродистых конструкционных сталей* (стали 40, 45 и др.);

– стали, содержащие кроме углерода около одного процента хрома, образуют группу более качественных *хромистых конструкционных сталей* (стали 20Х, 40Х и др.);

– в машиностроении широко применяются стали, содержащие 0,2–0,5 % углерода и по 1 % хрома и никеля; они образуют группу *хромоникелевых сталей* (стали 20ХН, 30ХН и др.);

– стали, содержащие кроме углерода по 1 % еще три легирующих химических элемента, образуют группы *хромокремнемарганцовистых* (стали 20ХГСА, 30ХГСА и др.), *хромоникелевольфрамовых* (стали 30ХНВА и др.) и *хромоникелемолибденовых* (стали 40ХНМА и др.) сталей.

Некоторые, наиболее широко применяемые в машиностроении марки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей и их механические свойства представлены в табл. 10.1. Из приведенных в ней данных видно, что легированные стали имеют более высокие механические свойства, чем углеродистые. С повышением механических свойств металлов (твердости, предела прочности) возрастает сопротивление металлов обработке резанием, т.е. ухудшается их обрабатываемость.

Таблица 10.1

### Механические свойства сталей

Группа сталей	Марка	Твердость, НВ	Предел текучести $\sigma_t$ , Н/мм <sup>2</sup>	Предел прочности $\sigma_b$ , Н/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение $\delta$ , %
Углеродистые	40	187	340	580	19
	45	197	360	610	16
	50	207	380	640	14
Хромистые	20Х	179	650	800	11
	40Х	217	800	1000	10
	45Х	229	850	1050	9
	50Х	229	900	1100	9

Группа сталей	Марка	Твердость, НВ	Предел текучести $\sigma_t$ , Н/мм <sup>2</sup>	Предел прочности $\sigma_b$ , Н/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение $\delta$ , %
Хромоникелевые	20ХН	197	600	800	14
	30ХН	217	800	1000	14
	45ХН	207	850	1050	10
	50ХН	207	900	1100	9
Хромокремне-марганцовистые	20ХГСА	207	650	0800	12
	30ХГСА	229	850	1100	10
Хромоникеле-вольфрамовые	30ХНВА	241	800	1000	10
	40ХНВА	269	950	1100	12
Хромоникеле-молибденовые	40ХНМА	269	950	1100	12

В машиностроении применяются также высоколегированные качественные конструкционные стали. Высокое содержание легирующих элементов придает сталям необходимые эксплуатационные свойства: коррозионную стойкость, механическую прочность, пластичность. В то же время в связи с увеличением сопротивления обработке резанием имеет место существенное снижение параметров режимов обработки этих сталей режущими инструментами.

Высоколегированные качественные конструкционные стали делятся на **шесть классов**:

1) стали *мартенситного* класса марок Х5, Х5М, Х5ФВ, Х6СМ, 1Х8ВФ, 4Х9С2, 4Х10С2М, 1Х12Н2ВМФ, 2Х13, 3Х13, 9Х18, 1Х17Н2 и др.;

2) стали *мартенситно-ферритного* класса марок Х6СЮ, 1Х11МФ, 1Х12ВНМФ, 15Х12ВМФ, 2Х12ВМБФР, 1Х12В2МФ, 1Х13;

3) стали *ферритного* класса марок 1Х12СЮ, Х14, Х17, Х28, Х18СЮ, Х25Т и др.;

4) стали *аустенитно-мартенситного* класса марок 2Х13Н4Г9, Х15Н9Ю, Х17Н7Ю, 2Х17Н2;

5) стали *аустенитно-ферритного* класса марок Х20Н14С2, 1Х21Н5Т, Х23Н12 и др.;

6) стали *аустенитного* класса марок Х12Н22ТЗМР, 4Х18Н25С2, Х25Н20С2, Х16Н15МЗБ, 1Х14Н18В2БР и др.

Основными легирующими элементами высоколегированных марок конструкционных сталей являются хром (до 28 %), никель (до 25 %) и марганец (до 14 %).

Для удовлетворения нужд развивающейся техники были разработаны и применяются в качестве конструкционных металлов специальные жаро- и кислотостойкие сплавы **двух групп**:

1) сплавы на *железоникелевой* основе с содержанием 35–38 % никеля;

2) сплавы на *никелевой* основе с содержанием 60–80 % никеля.

Жаро- и кислотостойкие специальные сплавы весьма пластичны и трудно поддаются обработке резанием.

В машиностроении кроме широкой номенклатуры марок сталей различной степени легирования для изготовления корпусных деталей применяется чугун. Некоторые марки серых чугунов и их механические свойства приведены в табл. 10.2. Обрабатываемость чугунов резанием принято оценивать по их твердости. С повышением твердости обрабатываемость чугунов ухудшается и, оценивая в первом приближении влияние твердости на обрабатываемость, чугуны принято условно разделять на мягкие с твердостью в пределах 140–160 НВ, среднетвердые с твердостью 160–180 НВ и твердые с твердостью 180–220 НВ. Чугуны весьма малопластичны и хрупки. По сравнению со сталями при обработке чугунов силы резания и затраты энергии уменьшаются.

Таблица 10.2

### Механические свойства серых чугунов

Марка	Твердость, НВ	Предел прочности	
		на изгиб $\sigma_{и}$ , Н/мм <sup>2</sup>	на сжатие $\sigma_{сж}$ , Н/мм <sup>2</sup>
СЧ 12	140...224	280	500
СЧ 15	160...224	320	650
СЧ 18	167...224	360	700
СЧ 21	167...236	400	750
СЧ 24	167...236	440	850
СЧ 28	167...236	480	1000
СЧ 32	193...243	520	1100
СЧ 35	193...243	560	1200
СЧ 38	197...257	600	1300

Многие детали машин и приборов изготавливают из цветных металлов — латуни, бронзы и сплавов алюминия. Цветные металлы всех марок сравнительно легко поддаются обработке резанием.

По сравнительной обрабатываемости резанием, энергоемкости образования новых поверхностей на заготовках и на срезаемой стружке все конструкционные металлы могут быть условно разделены на **четыре группы**:

1) *легкообрабатываемые*, например, латуни, бронзы, деформируемые сплавы алюминия, мягкие чугуны;

2) *средней обрабатываемости* — углеродистые и низколегированные конструкционные стали, силумины, чугуны средней твердости;



3) *ниже средней обрабатываемости* — высоколегированные коррозионно-стойкие конструкционные стали мартенситного, мартенситно-ферритного, аустенитно-мартенситного классов, твердые чугуны;

4) *труднообрабатываемые* — высоколегированные конструкционные стали аустенитного класса, жаро- и кислотостойкие специальные никелеферритовые и никелевые сплавы, тугоплавкие сплавы.

Стали, поставляемые металлургической промышленностью машиностроительным заводам, находятся в отожженном состоянии. Если структурное состояние и механические свойства сталей в состоянии поставки не удовлетворяют требованиям изготовления из них качественных деталей, то эти стали подвергаются промежуточной термообработке с целью улучшить их структурное состояние и механические свойства (табл. 10.3).

Таблица 10.3

### Влияние термообработки на механические свойства конструкционных металлов

Группа конструкционных сталей	Марка	Термообработка			
		отжиг		улучшение	
		Твердость, НВ	Предел прочности $\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	Твердость, НВ	Предел прочности $\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>
Углеродистая	30	123–149	450–550	177–206	640–740
	35	140–160	510–590	192–208	690–780
	45	167–193	590–690	183–218	690–780
Хромистая	40Х	160–175	550–620	245–265	880–930
Марганцовистая	60Г	183–203	640–740	236–250	830–880
Хромомолибденовая	30ХМА	160–183	590–730	220–294	880–980
Хромокремне-марганцовистая	30ХГСА	177–216	640–740	294–314	980–108

После промежуточной термообработки твердость и предел прочности улучшенной конструкционной стали возрастают в среднем на 40 % по сравнению с аналогичными параметрами в состоянии поставки. Благодаря промежуточной термообработке существенно повышается качество обработанных поверхностей на деталях. В связи с изменением механических свойств использование термической обработки приводит к изменению обрабатываемости резанием одной и той же марки конструкционной стали.

В связи с тем, что повышение основных показателей механических свойств, а именно твердости и предела прочности, увеличивается сопротивление, которое оказывает металл обрабатывающему его режущему инструменту,

эти показатели приобретают качество режимных параметров. Они выражают качественное и количественное влияние механических свойств металлов на уровень практических режимов их обработки режущими инструментами.

Установлен целый ряд взаимосвязанных параметров и характеристик, отражающих различные физические явления, происходящие в процессе взаимодействия режущего инструмента с обрабатываемой заготовкой, и на протекание которых влияют свойства металла, подвергаемого обработке резанием [13].

Совокупность этих параметров и характеристик принято выразить общим термином — *обрабатываемость металлов резанием*, под которым понимается свойство конструкционных металлов подвергаться обработке резанием. Основные показатели обрабатываемости могут иметь как сравнительный, так и абсолютный характер.

К числу *показателей*, определяющих сущность термина «обрабатываемость резанием», относятся:

- сила резания (момент вращения) по сравнению с эталонным металлом (обычно сталь 45), измеренная в равных режимных условиях;
- эффективная мощность, затрачиваемая на резание по сравнению с эталонным металлом в равных режимных условиях.

Количественные выражения показателей обрабатываемости конструкционного металла данного химического состава и структурного состояния определяются твердостью, пределом прочности и относительным удлинением, коэффициентом трения в паре с инструментальным материалом, свойством изнашивать лезвия инструмента, теплопроводностью и т.д. В реальных производственных условиях перечисленные свойства конструкционных металлов в связи с отклонениями химического состава и неоднородностью микроструктуры не являются постоянными.

Кроме того, характеристики процесса резания, отражающие взаимосвязанные физические явления, имеющие место в зоне стружкообразования, изменяются в зависимости от режима резания, прогрессирующего износа инструмента и т.п. Поэтому сопоставление количественных оценок обрабатываемости, например, по стойкости инструмента, допустимо лишь при соблюдении равных условий резания, типичных для сравниваемых групп конструкционных и инструментальных материалов.

Используя стандарт ISO 513 «Материалы твердые инструментальные для обработки резанием. Обозначение основных групп резания и групп применения» (см. табл. 4.3) в качестве основы возможно классифицировать конструкционные материалы по такому же принципу. В табл. 10.4 приведены марки конструкционных металлов и сплавов с обозначениями по национальным стандартам зарубежных стран.

Таблица 10.4

## Сопоставление марок конструкционных металлов и сплавов

Группа резания по ISO 513	Группа обрабатываемости по VDI 3323	Обозначение по национальному стандарту									Удельная сила резания на 1 мм <sup>2</sup> сечения стружки, Н/мм <sup>2</sup> $k_{rL1}$	Показатель степени удельной силы резания $m_c$
		ГОСТ (Россия)	DIN (Германия)	AISI (США)	AFNOR (Франция)	UNI (Италия)	UNE (Испания)	SS (Швеция)	BS (Великобритания)	JIS (Япония)		
<i>Конструкционные стали</i>												
P	1	15	C15	1015	CC15	C15C16	F.111	1350	080M15	–	1 350	0,21
		20	C22	1020	CC20	C20C21	F.112	1450	050A20	–		
		A12	10SPb20	–	10PbF2	CF10PB20	10SPb20	–	–	–		
	2	35Г2	28Mn6	1330	20M5	C28Mn	–	–	150M28	SCMn1	1 500	0,22
		A30	35S20	1140	35MF4	–	F210G	1957	212M36	–		
	2/3	35	C35	1035	CC35	C35	F.113	1550	060A35	–	1 525	
		45	CK45	1045	XC42	C45	C45K	1650	080M46	–		
		40Г	40Mn4	1039	35M5	–	–	–	150M36	–		
		35ГЛ	36Mn5	1335	40M5	–	36Mn5	2120	–	SMn438(H)		
		50	Cf53	1050	XC48TC	C53	–	1674	060A52	S50C		
	3	55	C55/CK55	1055	XC55	C50	C55K	1655	070M55	S55C	1 675	
		60Г	CK60	1060	XC60	C60	–	–	080A62	S58C		
	6/7	ПХ15	100Cr6	52100	100C6	100Cr6	F.131	2258	534A99	SUJ2	1 675	
		12ХН3А	14NiCr10	3415	14NC11	16NiCr11	15NiCr11	–	–	SNC415(H)		
		18Х2Н4ФА	17CrNiMo6	–	18NCD6	–	14NiCrMo13	–	–	–		
	6/8	18ХГ	16MnCr5	5115	16MC6	16MnCr5	16MnCr5	2511	527M20	–	1 725	
		15Х	15Cr3	5015	12C3	–	–	–	523M15	SCr415(H)		
	6/9	35Х	34Cr4	5132	32C4	34Cr4(KB)	35Cr4	–	530A32	SCr430(H)	1 775	
		55С2	55Si7	9255	55S7	55Si8	56Si7	2085	250A53	–		
		40ХН2МА	36CrNiMo4	9840	40NCD3	38NiCrMo4(KB)	35NiCrMo4	–	816M40	–		
40Х		42Cr4	5140	42C4	41Cr4	42Cr4	2245	530M40	SCr440(H)			
50ХГА		55Cr3	5155	55C3	–	–	–	527A60	CUP9(U)			
5ХФА		50CrV4	6150	50CV4	50CrV4	50CrV4	2230	735A50	SUP10			
38ХМЮА		41CrAlMo7	–	40AD6,12	41CrAlMo7	41CrAlMo7	2940	905M39	–			
40Х5МФ	39CrMoV13,9	–	–	39CrMoV13	36CrMoV12	–	897M39	–				
<i>Инструментальные стали</i>												
6/9	9Х2	100Cr6	L3	Y100C6	–	100Cr6	–	BL3	–	1 775	0,24	
6/9	ХВГ	105WCr6	–	105WC13	100WCr6	105WCr5	2140	–	SKS31; SRS2			
6/9	50ХНМ	55NiCrMoV6	L6	55NCDV7	–	F.520.S	–	–	SKT4			
6/9	5ХВ2С	45WCrV7	S1	–	45WCrV8KU	45WCrSi8	2710	BS1	–			
10/11	4Х5МФ1С	X40CrMoV51	H13	Z40CDV5	X35CrMoV05KU	X40CrMoV51	2242	BH13	SKD61	2 450	0,23	
10/11	X12	X210Cr12	D3	Z200C12	X210Cr13KU	X210Cr12	–	BD3	SKD1			
10/11	X6ВФ	X100CrMoV51	A2	Z100CDV5	X100CrMoV51KU	X100CrMoV5	2260	BA2	SKD12			
10/11	3Х2В8Ф	X30WCrV9,3	H21	Z30WCV9	X28W09KU	ZX30WCrV9	–	BH21	SKD5			
10/11	40Х9S2	X45CrSi9,3	HW3	Z45C59	X4CrSi8	F.322	–	40IS45	SUH1			

Группа резания по ISO 513	Группа обрабатываемости по VDI 3323	Обозначение по национальному стандарту									Удельная сила резания на 1 мм <sup>2</sup> сечения стружки, Н/мм <sup>2</sup> $k_{r1.1}$	Показатель степени удельной силы резания $m_c$
		ГОСТ (Россия)	DIN (Германия)	AISI (США)	AFNOR (Франция)	UNI (Италия)	UNE (Испания)	SS (Швеция)	BS (Великобритания)	JIS (Япония)		
	10/11	P6M5	S6-5-2	M2	Z85WDCV	X82WMo0605KU	HS6-5-2	2722	BM2	SKH9	1 875	0,21
	10/11	P6M5K5	S6-5-2-5	M35	Z85WDKCV	HS6-5-2-5	F.5613	2723	–	SKH55		
	10/11	P18	S18-0-1	T1	Z80WCV	X75W18KU	HS18-0-1	–	BT1	SKH2		
	10/11	P18K5Ф2	S18-1-2-5	T4	Z80WKCV	X78WCo1805KU	HS18-1-1-5	–	BT4	SKH3		
	<i>Коррозионно-стойкие ферритные и мартенситные стали</i>											
	12/13	12X13	X10Cr13	410	Z10C14	X12Cr13	F.3401	2302	410S21	SUS410	1 875	0,21
	12/13	12X17	X8Cr17	430	Z8C17	X8Cr17	F.3113	2320	430S17	SUS430		
	12/13	40X13	X46Cr13	420	Z40CM	X40Cr14	F.3405	2304	420S45	SUS420J2		
	12/13	20X17H12	X22CrNi17	431	Z15CNi6.02	X16CrNi16	F.3427	2321	431S29	SUS431		
	<i>Коррозионно-стойкие ферритно-мартенситные и аустенитные стали</i>											
М	14.1	X18H10T	X10CrNiTi189	321	Z6CNT18.10	X6CrNiTi1811	F.3553	588	321S12	SUS321	2 150	0,20
	14.1	03X17H14M3	X2CrNiMo1812	316L	Z2CND17.13	X2CrNiMo1713	–	2353	316S12	SCS16		
	14.1	03X18H11	X2CrNi189	304L	Z2CN18.10	X2CrNi1811	F.3503	2352	304S12	SCS19		
	14.1	08X18H10	X6CrNi189	304	Z6CN18.09	X5CrNi1810	F.3551	2332	304S15	SUS304		
	14.1	10X17H13M2T	X10CrNiMoTi1810	316Ti	Z6NDT17.12	X6CrNiMoTi1710	F.3535	2350	320S17	–		
	14.1	10X23H18	X12CrNi2521	310S	Z12CN25.20	X6CrNi2520	F.331	2361	310S24	SUH310		
	14.1	12X18H9	X12CrNiSi188	303	Z10CNF18.09	X10CrNiSi1809	F.3508	2346	303S21	SUS303		
	14.1	15X23H13	X15CrNiSi20.12	309	Z15CNS20.12	–	–	–	309S24	SUH309		
	14.1	20X23H18	X15CrNiSi2520	S31000	Z15CNS25.20	X6CrNi2520	F.331	2361	310S24	SUH310		
	14.1	40X24H1CJL	G-X40CrNiSi2512	793503	–	XG50NiCr	–	–	309C30	SCH15		
14.1	40X24H1CJL	X2CrNiMo1816	317L	Z2CND25-07	X2CrNiMo1816	–	2367	317S12	SUS317L			
<i>Серый чугун</i>												
К	15	СЧ 10	GG10	No20B	Ft10D	–	–	0110	–	FC100	1 150	0,2
	15	СЧ 15	GG15	No25B	Ft15D	G15	FG15	0115	Grade 150	FC150		
	15	СЧ 20	GG20	No30B	Ft20D	G20	–	0120	Grade 220	FC200		
	15/16	СЧ 25	GG25	No35B	Ft25D	G25	FG25	1125	Grade 260	FC250		
	16	СЧ 30	GG30	No45B	Ft30D	G30	FG30	0130	Grade 300	FC300	1 350	0,28
	16	СЧ 35	GG35	No50B	Ft35D	G35	FG35	0135	Grade 350	FC350		
	16	СЧ 40	GG40	No55B	Ft40D	–	–	0140	Grade 400	–		
	<i>Высокопрочный чугун (с шаровидным графитом)</i>											
	17	ВЧ 42-12	GGG40	60-40-18	FGS400-12	GS370-17	FGE38-17	07 17-02	SNG420/12	FCD400	1 225	0,25
	18	ВЧ 50-2	GGG50	80-55-06	FGS500-7	GS500	FGE50-7	07 27-02	SNG500/7	FCD500	1 350	0,28
	18	ВЧ 60-2	GGG60	–	FGS600-3	–	–	07 32-03	SNG600/3	FCD600		
	18	ВЧ 70-2	GGG70	100-70-03	FGS700-2	GS700-2	FGS70-2	07 37-01	SNG700/2	FCD700		
	<i>Ковкий чугун</i>											
	19	КЧ 35-10	GTS-35	32510	MN35-10	–	–	–	B340/12	FCMW330	1225	0,25
20	КЧ 45-6	GTS-45	40010	MN450	GMN45	–	0852	P440/7	FCMW370	1420	0,30	
20	КЧ 55-4	GTS-55	50005	MP50-5	GMN55	–	0854	P510/4	FCMP490			
20	КЧ 60-3	GTS-65	70003	MP60-3	–	–	0858	P570/3	FCMP540			
20	КЧ 70-2	GTS-70	80002	MN700-2	GMN70	–	0862	P690/2	FCMP690			
<i>Алюминиевые и медные сплавы</i>												
N	25	АЛ-2	GK-ALSi12	AO4132	A-S12	–	Al-12SiFe	4247	ALSi12	AG061	700	2,25
	24	АЛ-5	G-ALSi5Mg	305.0	–	Al-5SiCuMg	Al-5SiCuMg	4252	LM16	AC4A		

Группа резания по ISO 513	Группа обрабатываемости по VDI 3323	Обозначение по национальному стандарту									Удельная сила резания на 1 мм <sup>2</sup> сечения стружки, Н/мм <sup>2</sup> $k_{c1.1}$	Показатель степени резания $m_c$	
		ГОСТ (Россия)	DIN (Германия)	AISI (США)	AFNOR (Франция)	UNI (Италия)	UNE (Испания)	SS (Швеция)	BS (Великобритания)	JIS (Япония)			
А	24	АЛ9-1	G-FISi7Mg	356	–	–	AlSi7Mg	–	LM25	A5052	700	0,25	
	24	АЛ27	G-FIMg10	520	–	–	AlMg10	–	LM10	–			
	23	АЛ30	AlSi12CuNiMg	AO3360	A-Si12UGN	–	–	–	LN13	–			
	24	ВАЛ8	G-FISi9Cu3	A380.0	–	AlSi9Cu3	–	4250	LM24	A7075			
	21	1350	AlMgSi1	1350	A-SGM0.7	–	6351	–	6082	–			
	21	1530	AlMg3	5154A	5154	–	5154A	–	5154A	–			
	22	АВ	AlMg1SiCu	6061	A-GSUS	–	6351	–	6061	–			
	22	АД31(1310)	AlMgSi0.5	6060	6063	–	6063	–	6060	–			
	22	АД33(1330)	AlMg1SiCu	A96061	6061	–	–	–	6061	–			
	22	АК8(1380)	AlCu4SiMg	358	–	–	2014	–	2014A	–			
	22	В95(1950)	AlZnMgCu1.5	AA7075	A-Z5GU	–	–	–	C77S	–			
	22	В1(1110)	AlCuMgSi	A91110	1110	–	Al-4CuSiMg	–	–	–			
	22	В16(1160)	AlCuMg2	A92024	A-U4G1	–	–	–	2024	–			
	<i>Алюминиевые и медные сплавы</i>												
А	26	ЛС60-2	CuZn36Pb3	C35330	CuZn36Pb3	–	–	–	CZ124	–	700	0,27	
	27	Л63	CuZn37	C27200	CuZn37	CuZn36	–	–	CZ108	–			
	27	Л70	CuZn30	C26000	CuZn30	CuZn30	–	–	CZ106	–			
	27	Л85	CuZn15	C23000	CuZn15	CuZn15	–	–	CZ102	–			
	28	БрАЖН10-4-4	CuAl10Ni5Fe4	C63000	U-A10N	–	–	–	Ca104	–			
<i>Жаропрочные и титановые сплавы</i>													
S	31	ХН32Т	X12NiCrAlTi32	INCOLOY800	SIRIUS800	–	F-3313	–	NA15	SUH	2 600	0,24	
	31	ЭК77	NiCr22Mo9Nb	INCONEL (08028)	NC22FeDN6	–	–	–	HR5.203	–			
	33	ХН38ТТ	NiCr21MO	INCONEL (825)	–	–	–	–	NA16	–			
	33	ХН77ТЮР	NiCr20TiAl	NIMONIC 80	NC20TA	–	–	–	2R201	–	3 300	0,24	
	33	ХН78Т	Nicofer7216	INCONEL 600	ZSNCDT42	–	–	5660	NA14	–			
	35	ХН73МВТЮ-ВД	NiCr16Fe7TiAl	HASTELLOY (C)	Ni-Mo28	–	–	–	ANC15	–			
	36	ВТ1-00	Ti1Pd	R50250	T35	–	–	L7021	–	2NA	–	2 110	0,22
	37	ВТ5-1	TiAl5Sn2.5	R54520	T-A5E	–	–	L7101	–	BS.TA14	–		
	37	ВТ6	TiAl6V4	AMSR56400	T-A6V	–	–	–	–	BS.2TA.11	–		
	37	ВТ18y	–	–	–	–	–	–	–	–	–		
	37	ВТ20	–	–	–	–	–	–	–	–	–		
37	ВТ22	–	–	–	–	–	–	–	–	2 417	0,24		
37	ВТ23	–	–	–	–	–	–	–	–	2 417	0,23		
37	ВТ25	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–		
Н	38	110Г13Л	X110CrMoV15	610	–	–	–	2534-05	–	AC4A	2 900	0,22	

**Примечания:**

1. Значения  $k_{c1.1}$  даны для значений переднего угла  $0^\circ$ . угла и, соответственно, снизить на 1 % при отрицательных углах.
2. Значения  $m_c$  — показатель степени в расчетах требуемой мощности.

В табл. 10.4, наряду с группами применения по ISO, указаны группы обрабатываемости по рекомендации Общества немецких инженеров VDI 3323 (Германия). Обрабатываемость материала по этой рекомендации характеризует эффективная мощность  $N_э$ , затрачиваемая на процесс резания. Для упрощения расчета величины  $N_э$  в табл. 10.4 для каждой группы обрабатываемости приведены коэффициент  $k_{c1.1}$  и показатель степени  $m_c$ . Коэффициент  $k_{c1.1}$  представляет собой удельную силу резания при срезании стружки со средней толщиной, равной 1 мм. При других толщинах стружки  $a_{cp}$  используется показатель степени  $m_c$  для вычисления удельной силы резания  $k_c$ :

$$k_c = k_{c1.1} a_{cp}^{-m_c}. \quad (10.1)$$

Эффективная мощность, расходуемая на резание, рассчитывается по формуле:

$$N_э = t S_0 v k_c / (6 \cdot 10)^3, \quad (10.2)$$

где  $t$  — глубина резания, мм;  $S_0$  — подача, мм/об;  $v$  — скорость резания, м/мин.

Необходимая мощность электродвигателя:

$$N_{эд} = N_э / \eta, \quad (10.3)$$

где  $\eta$  — к.п.д. главного привода.

Значения удельной силы резания  $k_c$  приведены в табл. 10.5.

Таблица 10.5

### Удельная сила резания

Обрабатываемый материал	Прочность, Н/мм <sup>2</sup> (твердость)	Удельная сила резания $k_c$ , Н/мм <sup>2</sup> , при подаче $S_0$ , мм/об				
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Малоуглеродистые стали	520	3 610	3 100	2 720	2 500	2 280
Среднеуглеродистые стали	620	3 080	2 700	2 570	2 450	2 300
Высокоуглеродистые стали	720	4 050	3 600	3 250	2 950	2 640
Инструментальные стали	670	3 040	2 800	2 630	2 500	2 400
Хромомарганцевые стали	770	3 830	3 250	2 900	2 650	2 400

Обрабатываемый материал	Прочность, Н/мм <sup>2</sup> (твердость)	Удельная сила резания $k_c$ , Н/мм <sup>2</sup> , при подаче $S_0$ , мм/об				
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Хромомолибденовые стали	730	4 500	3 900	3 400	3 150	2 850
Высокопрочные чугуны	46 HRC	3 190	2 800	2 600	2 450	2 270
Ковкие чугуны	360 HB	2 300	1 930	1 730	1 600	1 450
Серые чугуны	200 HB	2 110	1 800	1 600	1 400	1 330

В табл. 10.6 показано распределение обрабатываемых металлов по группам резания.

Таблица 10.6

### Распределение обрабатываемых материалов

Группа резания	Обрабатываемые материалы	Группа обрабатываемости по VDI 3323	Типовые представители
P	Углеродистые (нелегированные) стали	2/3	45
	Легированные стали	6/7	18ХГТ
	Ферритные стали	12/13	12Х13
	Легированные инструментальные стали	6/9	ХВГ
	Легированное стальное литье	2/3	35ГЛ
	Литье из ферритных и мартенситных сталей	12/13	12Х17
M	Аустенитные и ферритно-мартенситные стали	14,1	10Х23Н18
	Жаростойкие стали	35	ХН73МБПО-В1
	Стали немагнитные и износостойкие	14,1	17Х18Н9
K	Серый чугун (нелегированный и легированный)	15/16	СЧ 25
	Чугун с шаровидным графитом (высокопрочный) чугун	17/18	ВЧ 42-12
	Ковкий чугун	19/20	КЧ 35-10
N	Цветные металлы	24/25	–
	Сплавы Al	22/23	АЛ30
	Сплавы Cu	26/27	Л70
S	Жаропрочные сплавы	33	ХН78Т
	Титановые сплавы	37	ВТ6
H	Особопрочные сплавы	38	110Г13
	Термообработанные стали 48–60 HRC	39	–
	Упрочненные (кокильные) чугуны	40	–

## 10.2. Выбор режущего материала

С учетом характера нагрузки на режущую часть участка инструмента в процессе резания возможно сформулировать требования, предъявляемые к режущим материалам. У различных видов инструмента при разных условиях резания характер силовых и тепловых нагрузок весьма разнообразен. Нагрузки определяют различные виды отказа. Для того чтобы противостоять им, режущие материалы должны иметь высокие показатели целого комплекса основных свойств. Однако пока не созданы универсальные материалы, обеспечивающие высокую надежность инструмента при разнообразном характере нагрузки на его режущий участок. Режущие материалы специализированы для определенных условий работы и, следовательно, имеют различные основные свойства. Свойства, а по ним и марка режущего материала должны выбираться такими, чтобы снизить интенсивность изнашивания и выкрашивания инструмента, а также вероятность появления непрогнозируемых отказов при заданных условиях работы.

Большинство режущих инструментов работает в заданных условиях, при которых отказ их связан с изнашиванием. Правильное назначение исходных параметров инструмента позволяет снизить вероятность прогнозируемых отказов-сколов, поломок. Производственный опыт показывает, что отказы 80 % всех инструментов удается свести к износу. Однако отказы инструмента из-за износа могут быть вызваны разными физическими причинами, предоставляемыми условиями резания. Поэтому различные свойства режущего материала будут по-разному препятствовать наступлению отказов вследствие изнашивания. На стадии проектирования технологического процесса в него должны быть включены параметры начального и конечного состояния инструмента.

С этими параметрами начального состояния режущий инструмент вступает в работу при условиях, для которых он создан. В процессе резания с течением времени под действием термодинамических нагрузок параметры начального состояния изменяют свои значения.

Для обеспечения минимальной себестоимости или необходимой производительности, или заданного расхода инструмента на стадии проектирования инструмента должны прогнозироваться показатели его надежности. Определяется соответствующая стойкость  $T_{эж}$ . Одним из часто используемых критериев оценки эффективности работы ТС является показатель минимальной стоимости.

Как известно [37], себестоимость операции выражает в денежной форме часть издержек производства, включающую затраты на средства труда и заработную плату:



$$Q = t_p E + t_b E + t_{пр} E + Q_{инн} + Q_{пр}, \quad (10.4)$$

где  $Q$  — полная себестоимость операции механической обработки детали, руб.;  $t_p$  — продолжительность рабочего хода и дополнительных движений, зависящих от режима резания, мин;  $t_b$  — продолжительность вспомогательной работы, включающая время вспомогательного хода и не зависящая от режима резания, мин;  $t_{пр}$  — продолжительность внеплановых простоев, вызванных случайным выходом инструмента из строя или по другим причинам, зависящим от инструментальной оснастки, мин;  $E$  — себестоимость станко-минуты, руб. (в себестоимость станко-минуты учитываются затраты на средства труда и заработную плату, которые остаются постоянными во времени и не зависят от темпа операции);  $Q_{инн}$  — плановые затраты, связанные с изнашиванием инструмента и отнесенные к одной детали, руб.;  $Q_{пр}$  — прочие постоянные затраты на деталь, не зависящие от темпа операции, руб.

В формуле (10.4) переменная доля себестоимости, зависящая от инструмента:

$$Q_{пер} = t_p E + Q_{инн} = t_p E + t_p \left( \frac{\Pi_1 E + \Pi_2 E_n + S_n}{T_p} \right), \quad (10.5)$$

где  $\Pi_1$  — плановые потери времени работы станка на установку и замену инструмента, мин.;  $\Pi_2$  — плановые потери времени работы станка на наладку, подналадку или размерное регулирование инструмента, мин;  $S_n$  — затраты на амортизацию и заточку инструмента за период его работы без замены, т.е. за период стойкости, коп.;  $E_n$  — заработная плата наладчика за 1 мин, руб.;  $T_p$  — продолжительность работы инструмента без замены в течение 1 мин рабочего хода ( $T_p = T/\lambda$ , где:  $T$  — нормативное значение стойкости инструмента по принятому критерию затупления;  $\lambda$  — отношение длительности резания к длительности рабочего хода).

Доля себестоимости, связанная с простоями оборудования,  $Q_{пр} = t_{пр} E$ , частично зависит от инструментальной оснастки и обусловлена со случайным (преждевременным) выходом инструмента из строя или из-за неудовлетворительного формирования стружки. Как следует из формулы (10.5), переменная доля себестоимости операции зависит: от режима резания, потерь времени на установку и замену инструмента, потерь времени на наладку инструмента на размер обрабатываемой детали, стоимости инструмента за период его стойкости.

Зависимость составляющих переменной доли себестоимости операции от скорости резания качественно можно представить в виде кривых, приведенных на рис. 10.1. Кривая 4 характеризует зависимость переменной доли себестоимо-

сти операции от скорости резания и качества инструмента. Она имеет минимум при скорости резания, называемой экономической скоростью резания, обеспечивающей минимальную себестоимость операции. Экономическая скорость резания  $v_{\text{эк}} = v(T/T_{\text{эк}})^m$ , где  $v$  и  $T$  — нормативные значения скорости резания и стойкости;  $v = C_v T^m$ ;  $m$  — показатель степени.

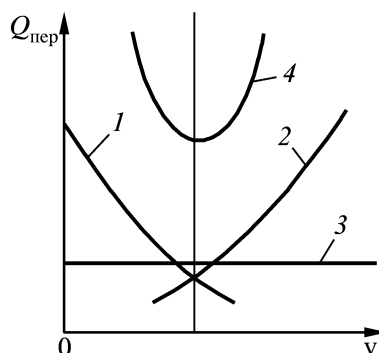


Рис. 10.1. Зависимость составляющей переменной доли себестоимости операций от скорости резания:

1 — стоимость машинного времени обработки; 2 — затраты на инструмент, его замену и наладку; 3 — непроизводительные затраты, учитывающие постоянную долю себестоимости; 4 — суммарная кривая

Величина экономической стойкости:

$$T_{\text{эк}} = \left( \frac{1}{m} - 1 \right) \frac{\Pi_1 E + \Pi_2 E + S_{\text{и}}}{E} \quad (10.6)$$

определяется при условии, когда величина  $Q_{\text{пер}}$  стремится к минимуму.

Из формулы (10.6) следует, что с ростом затрат на эксплуатацию станка уменьшается  $T_{\text{эк}}$ . Для большинства дорогостоящих ТС расчетное значение  $T_{\text{эк}}$  лежит в пределах 10 мин. Соответствующие этой стойкости высокие скорости могут неблагоприятно изменить структуру отказа инструмента: возрастает доля отказов из-за хрупкого разрушения или пластического деформирования режущего лезвия; снижаются показатели надежности.

В связи с этим на стадии эксплуатации необходимо оценивать структуру отказов. При неблагоприятной структуре следует принимать стойкость бóльшую, чем расчетная. В ряде работ [42] не рекомендуют на ТС из станков с ЧПУ устанавливать стойкость ниже 20–30 мин.

Таким образом, при назначении стойкости должны учитываться два взаимоисключающих требования: с одной стороны, необходимо форсировать режимы резания для сокращения срока окупаемости станка, а с другой — следует

снижать скорость для повышения надежности инструмента и уменьшения затрат на замену инструмента.

В современных условиях конкурирующие между собой производители режущих материалов осуществляют их оценку по комплексу технико-экономических показателей. Для этого используются как данные лабораторных испытаний, так и сбор данных об эксплуатации инструмента у потребителя. Разработаны методы оценки эффективности применения тех или иных режущих материалов по показателям минимальной себестоимости обработки на ТС, оптимальной сменной потребности в инструменте и максимально сменной выработки.

Для наглядности функциональные зависимости стойкости  $T$  и технико-экономических показателей от скорости резания  $v$  в графическом виде приведены на рис. 10.2.

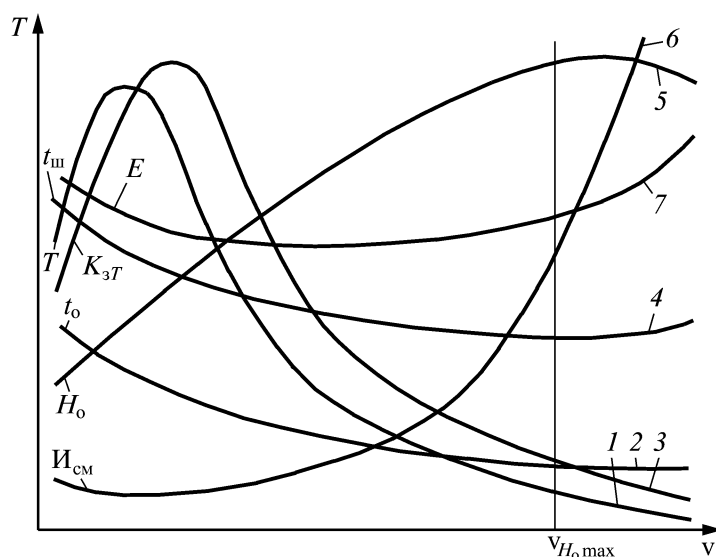


Рис. 10.2. Взаимосвязь параметров режимов резания и технико-экономических показателей

Зависимости на рис. 10.2 построены с использованием выведенных аналитических уравнений [13]:

- 1 — стойкость  $T$ ;
- 2 — основное технологическое время  $t_0$ ;
- 3 — ресурс инструмента, выражаемый числом  $K_{3T}$  заготовок, обработанных инструментом за период его стойкости;
- 4 — штучное время  $t_{шт}$ ;
- 5 — объем сменной выработки  $H_0$ ;
- 6 — сменная потребность  $I_{см}$  в режущем инструменте;
- 7 — себестоимость  $E$  обработки на ТС.

Показанные на рис. 10.2 зависимости определены для конкретного случая обработки заготовок из металла с известной твердостью, с определенными значениями глубины резания  $t$  и подачи  $S$  инструментом из конкретного режущего материала и с конкретными значениями геометрических параметров. Из рис. 10.2 следует, что:

а) значения всех режимных параметров и технико-экономических показателей взаимосвязаны и находятся в сложной функциональной зависимости от скорости резания  $v$ ;

б) изменение значения любого из режимных параметров ведет к изменению формы и положения кривых на сводном графике и, следовательно, к изменению значений технико-экономических показателей на данном режиме резания;

в) функциональные зависимости технико-экономических параметров от скорости резания, за исключением кривой зависимости  $t_0(v)$ , имеют экстремальный характер;

г) каждой скорости резания соответствует только одно сочетание конкретных значений режимных параметров и технико-экономических показателей и, следовательно, возможно столько вариантов режимов резания при обработке конкретной заготовки с выбранной глубиной резания и подачей, сколько скоростей обеспечивает станок.

Таким образом, задача выбора материала сводится к тому, чтобы из возможного числа вариантов выбрать один, наилучшим образом отвечающий технологическим требованиям и ограничениям.

Наличие в условиях реального производства большого количества ограничивающих факторов значительно усложняет задачу оптимизации, и поэтому полную оптимизацию удается осуществить редко. Чаще при выборе марок режущего материала проводят частичную оптимизацию, учитывая наиболее существенные ограничивающие факторы.

Себестоимость  $E$  в интервале скоростей резания  $v < v_{E_{\min}}$  (см. рис. 10.2) с увеличением скорости резания снижается. При скорости  $v_{E_{\min}}$  достигается наименьшая себестоимость  $E_{\min}$ . При  $v < v_{E_{\min}}$  себестоимость растет.

Если в качестве исходной (стартовой) принять скорость  $v_{E_{\min}}$ , при которой цеховая себестоимость минимальна, и по ней рассчитать прочие режимные параметры, то такие режимы резания можно характеризовать как экономичные.

Сопоставление и анализ режимов резания, обеспечивающих максимальную сменную выработку без учета сменной потребности в режущем инструменте, позволяют выявить следующие закономерности. Максимуму объема сменной выработки  $H_{o \max}$  на режимных параметрах, рассчитанных без учета

нормы потребности в инструменте, соответствует бóльшая частота вращения и скорость резания  $v_{H_{\text{омах}}}$ , для которых, в свою очередь, характерны малые значения стойкости  $T$  и ресурса  $K_{3T}$ , минимум штучного времени  $t_{\text{шт min}}$ , повышенная цеховая себестоимость и высокая сменная потребность  $I_{\text{см}}$  в режущем инструменте. Сменная потребность в режущем инструменте, обычно в несколько раз превышающая сложившуюся норму, является основным препятствием для широкого практического использования экономичных режимов резания.

Поэтому предпочтительными являются режимы резания, которые по сравнению с режимами максимальной сменной выработки, имеют меньшую скорость резания, обеспечивают меньшую норму сменной выработки и себестоимость обработки и предполагают несколько повышенную стойкость и ресурс инструмента. Себестоимость  $E$  обработки на ТС для таких режимов близка к минимальной.

Из выявленных зависимостей следует, что на ТС, используемых в массовом производстве, целесообразно работать с малыми скоростями и малым расходом инструмента, но с большой стойкостью и большим ресурсом инструмента  $K_{3T}$ . На ТС для мелкосерийного производства целесообразно обработку заготовок вести на таких режимах резания, при которых ресурс инструмента  $K_{3T}$  равен числу заготовок в партии. При выполнении этого условия целесообразно малые партии однотипных заготовок обрабатывать с большими скоростями и малыми стойкостями, обеспечивая полное использование ресурса инструмента. Подобные режимы позволяют сократить штучное время и обеспечить большую сменную выработку.

Инструментальные фирмы, осуществляя оценку вновь разработанного режущего материала, определяют области его эффективного применения и дают соответствующие рекомендации потребителю. Для предлагаемого режущего материала указываются: группа резания, предпочтительные группы применения, группа обрабатываемости обрабатываемого материала, рекомендуемые диапазоны режимных параметров.

В табл. 10.7–10.10 приведены сведения о типах твердых сплавов, режущей керамики и СТМ, предназначенных для токарной обработки и фрезерования. На рис. 10.3 и 10.4 показаны области предпочтительного применения разработанного типажа режущих материалов. В таблицах приняты следующие сокращения названий изготовителей режущих материалов: КЗ — Кировградский завод твердых сплавов; ЗК — Завод «Композит» (Санкт-Петербург); SC — Sandvik Coromant (Швеция); Кн — Kennametal (США); Кр — Korloy (Республика Корея); СТ — CeramTec (Япония); NT — NTK (Япония).

## Типы и области применения режущей керамики (см. табл. 4.16)

Тип	Наименование	Группа применения	Типовые представители	Основная область применения
1	Оксидно-карбидная (смешанная)	K01–K15	SC = CC650 CT = SH2 NT = HW3	Точение и растачивание серого чугуна
		S05–S10	SC = CC650 CT = SH3	Точение жаропрочных сплавов
		H01–H05	SC = CC650	Чистовая обработка закаленных сталей
2	Оксидная (белая)	K01–K10	SC = CC620 Kn = KY1615 CT = SN60	Точение ферритных ковких чугунов и незакаленных сталей. Высокоскоростная обработка серых чугунов
3	Нитридная (силинит)	K10–K20	SC = CC6090 Kn = KY3500 NT = SX9	Высокоскоростная получистовая обработка серых чугунов. Черновая обработка в благоприятных условиях. Черновое фрезерование серого чугуна
		S10–S15	NT = SX2	Фрезерование жаропрочных сплавов
		H10		Обработка закаленных материалов (до 65 HRC)
4	Нитридная с покрытием CVD	K10–K30	SC = GC1690 Kn = KY3400	Черновая и получистовая обработка серого чугуна. Высокоскоростная обработка чугуна с шаровидным графитом в условиях прерывистого резания
5	Сиалон	S10–S15	SC = CC6050 Kn = KY2100	Обработка жаропрочных и поверхностно-закаленных материалов
			K01–K20	
6	Армированная	P01–P05	NT = WA1	Высокоскоростное точение стали и отбеленного чугуна
		K05–K20	Kn = KY4300 NT = WA1	Получистовая и черновая обработка серого чугуна
		S01–S10	SC = CC6700 Kn = KY4300 NT = WA1	Обработка жаропрочных и титановых сплавов
7	Оксидная с покрытием	K05–K10	Kn = KY4400 NT = HC5	Чистовая обработка серого чугуна
		H10	Kn = KY4400 NT = HC5	Обработка закаленных материалов (до 65 HRC)
8	На основе TiC	K20	NT = HC6	Высокоскоростное точение серого чугуна с применением СОТС. Получистовое точение ковкого чугуна

## Типы твердых сплавов для токарной обработки

Тип	Наименование	Группа применения	Типовые представители	Основная область применения
9	Без покрытия (см. табл. 4.4)	N05–N15	K3 = MC321 SC = H10 Kr = K10 MC = HTi10	Черновая и чистовая обработка алюминиевых сплавов
		S25–S35	K3 = MC221 SC = H10F	Получистовая и черновая обработка титановых сплавов
10	С покрытиями CVD (см. табл. 4.8)	P05–P15	K3 = MC2215 SC = GC4215	Высокоскоростная получистовая и черновая обработка сталей без СОТС
		P10–P20	K3 = TC1T SC = GC4225	Высокоскоростная чистовая и легкая черновая обработка стального литья с применением СОТС
		H05–H20		Чистовая и получистовая обработка закаленных сталей
		P15–P30	K3 = MC1465 SC = GC4225	Высокопроизводительная получистовая и легкая черновая обработка сталей с ударом
		P20–P45	K3 = MC1465 SC = GC4235 Kn = KC9125	Черновая обработка стального литья в условиях прерывистого резания
		M05–M20	K3 = MC1466 SC = GC2015	Чистовая обработка коррозионно-стойких сталей в условиях прерывистого резания
		M15–M35	K3 = MC1465 SC = GC2035	Получистовая и черновая обработка аустенитных коррозионно-стойких сталей на низких скоростях в условиях прерыви- стого резания
		M25–M40		
		K01–K15	K3 = ВП3115 SC = GC3205	Высокоскоростная обработка серого чугуна
		K05–K20	K3 = ВП3115 SC = GC3205	Высокопроизводительная обработка чугуна с шаровидным графитом
		K10–K25	K3 = ВП3325 SC = GC3215 KN = KC9325	Обработка всех видов чугуна на низких скоростях с большими подачами в условиях прерывистого резания
		S05–S20	SC = S05F CT = СТР5240	Высокоскоростная чистовая обработка жаропрочных и титановых сплавов
11	С покрытиями PVD (см. табл. 4.10)	M10–M25	K3 = MC221H	Чистовая обработка коррозионно-стойких сталей
		S05–S20	SC = GC1025	Чистовая обработка жаропрочных сплавов

Тип	Наименование	Группа применения	Типовые представители	Основная область применения
12	Керметы (см табл. 4.14)	P01–P10	SC = CT5005 Kr = CN100 MC = AP25N	Высокопроизводительная чистовая обработка сталей и чугунов, дающих сливную стружку
		P05–P20	SC = CT5015 Kr = CN10 MC = AP25N	Чистовая обработка низколегированных и легированных сталей
		P10–P30	SC = GC1525 Kr = CN2000 MC = AP25N	Получистовая и чистовая обработка низкоуглеродистых и низколегированных сталей

Таблица 10.9

### Типы твердых сплавов для фрезерования

Тип	Вид твердого сплава	Группа применения	Типовые представители	Основная область применения
9	Без покрытия	N05–N15	K3 = MC321 SC = H10A MC = HTi10	Чистовая обработка алюминиевых сплавов
		S25–S35	K3 = MC221 SC = H10F	Получистовая и легкая черновая обработка титановых сплавов
13	С покрытиями CVD (см. табл. 4.9)	P05–P25	K3 = TC1F SC = GC4220	Высокоскоростная чистовая и черновая обработка сталей
		H15–H30		Высокоскоростная чистовая и получистовая обработка закаленных сталей (до 60 HRC)
13	С покрытиями CVD (см. табл. 4.9)	P10–P40	K3 = TC1F SC = GC4230	Получистовая и черновая обработка низколегированных сталей (до 300 HB)
		P30–P50	K3 = MC1465H SC = GC4240	Черновая обработка с повышенными требованиями к прочности режущей кромки
		K10–K30	K3 = MC3215 SC = GC3020	Получерновая и черновая обработка серого чугуна
		K20–K40	K3 = MC3216 SC = GC3040 Kn = KC9320	Обработка чугуна с шаровидным графитом
14	С покрытиями PVD (см. табл. 4.11)	P30–P50	K3 = TT7K12H SC = GC2030 NT = ZM3	Черновая обработка вязких низкоуглеродистых сталей
		M10–M20	K3 = MC221H SC = GC2030	Чистовая обработка коррозионно-стойких сталей
		M15–M35	K3 = MC146H SC = GC2030	Получистовая обработка аустенитных коррозионно-стойких сталей



Тип	Вид твердого сплава	Группа применения	Типовые представители	Основная область применения
		S10–S20	SC = GC1025	Обработка жаропрочных сталей на средних скоростях
		S15–S30	K3 = MC1464 SC = GC2030	Получистовая обработка жаропрочных и титановых сплавов
15	Керметы (см. табл. 4.14)	N10–N25	SC = CT530 MC = NX2525	Чистовая и получистовая обработка алюминиевых сплавов без СОТС
		P05–P30		Чистовая и получистовая обработка низкоуглеродистых и малолегированных сталей

Таблица 10.10

### Типы сверхтвердых материалов (СТМ)

Тип	Вид СТМ	Группа применения	Типовые представители	Основная область применения
<i>Токарная обработка</i>				
16	Кубический нитрид бора: спеченные и поликристаллы для напайки (см. табл. 4.22)	K01–K10	SC = CB7050 KN = KB1645 NT = B22 CT = WBN555	Чистовая обработка чугунов, в том числе в условиях прерывистого резания
		H20–H30		Получистовая обработка закаленных сталей (до 60 HRC) при непрерывном резании
		H01–H20	3K = Композит 10 SC = CB7015 Kn = KB1645 NT = B36 CT = WBN750	Высокоскоростная обработка поверхностно закаленных сталей при непрерывном резании
<i>Фрезерование</i>				
17	Поликристаллические алмазы (см. табл. 4.23) и алмазные покрытия	K01–K10	3K = Композит 1 SC = CB7050 MC = MB710 NT = B24 CT = WBN560	Чистовая обработка чугунов при непрерывном резании
		H01–H10		Обработка закаленных сталей при непрерывном резании на особо жестком оборудовании
		N01–N10	SC = CD10 MC = MD220 Kr = DP150 Kn = KD105	Чистовая токарная обработка цветных металлов и их сплавов, а также пластиков
		N05–N15	SC = CD1810 АТП (Россия)	Чистовое и получистовое фрезерование цветных сталей и их сплавов

Группа резания	Группа применения	Тип режущего материала
P	01	
	10	Тип 12
	20	Тип 12
	30	Тип 12
	40	Тип 10
	50	Тип 10
M	10	
	20	Тип 10
	30	Тип 11
	40	Тип 10
K	01	
	10	Тип 16
	20	Тип 17
	30	Тип 10
	40	Тип 3
N	01	
	10	Тип 17
	20	Тип 9
	30	
S	01	
	10	Тип 17
	20	Тип 6
	30	Тип 10
	40	Тип 11
H	01	
	10	Тип 1
	20	Тип 16
	30	Тип 10

Рис. 10.3. Применение типов режущих материалов для токарной обработки

Группа резания	Группа применения	Тип режущего материала
P	01	
	10	
	20	Тип 15
	30	Тип 13
	40	Тип 13
	50	Тип 13
M	10	
	20	Тип 14
	30	Тип 15
	40	Тип 14
K	01	
	10	Тип 16
	20	Тип 3
	30	Тип 13
	40	Тип 13
N	01	
	10	Тип 17
	20	Тип 9
	30	Тип 15
S	10	
	20	Тип 14
	30	Тип 14
	40	Тип 9
H	01	
	10	Тип 16
	20	Тип 3
	30	Тип 15

Рис. 10.4. Применение типов режущих материалов для фрезерования

### 10.3. Оптимизация режимов резания

Рассмотренные критерии выбора вариантов режущего материала позволяют найти оптимизированные решения для операций точения и фрезерования. Каждое из этих решений может быть распространено на множество операций, для которых условия, его определяющие, остаются неизменными.

Например, по токарной обработке: проходной резец с  $\varphi = 95^\circ$  и  $\varphi_1 = 5^\circ$  предпочтительнее резцов с  $\varphi \leq 90^\circ$  для обработки заготовок в виде отрезков проката, имеющих прямые ступени, так как не требует дополнительного резца для формирования прямого уступа, обеспечивает обработку по цилиндру и торцу с высокой производительностью и надежностью. Это решение является оптимальным для обработки в патроне и в центрах заготовок из конструкционных сталей, имеющих больше одной прямой ступени. Резец с  $\varphi = 95^\circ$  может быть использован и при черновой и при получистовой обработке наружных поверхностей таких заготовок. Для чистовой обработки этих поверхностей дополнительно нужен чистовой резец.

Траектория движения резца с  $\varphi = 95^\circ$ , обеспечивающая минимальное время обработки по наружному диаметру и наибольшую надежность, соответствует перемещению параллельно оси вращения обрабатываемой поверхности. Если в операции этот резец участвует в качестве чернового, а контурный — в качестве чистового, то припуск на чистовой резец ориентировочно составляет 1,2–1,4 мм. При таком припуске ошибка предварительной обработки и колебания твердости обрабатываемого материала в наименьшей степени сказываются на изменении размеров проточенной поверхности.

Сложнее показать возможность *распространения технологического решения по назначению режимов резания* на широкий круг операций. Для станков массового производства режимы резания рекомендуется оптимизировать на каждом проходе каждой операции. Для ТС из станков с ЧПУ определение оптимальных режимов резания требует другого подхода.

Если станок, средства крепления и форма детали не ограничивают выбор режимов резания, то в этом случае режимы определяются только возможностями инструмента. Для определения возможностей инструмента проводят его испытания на том станке, в комплект инструментальной оснастки которого входит интересующий инструмент. Во время испытаний обрабатывают заготовки из наиболее используемого материала; жесткость заготовок не должна влиять на выбор режимов резания. В этих условиях определяют значения глубины и подачи ( $t$ , мм;  $S_0$ , мм/об), обеспечивающие наибольшую производительность

без отказов инструмента из-за поломок. Скорость резания во время испытаний назначают в соответствии с рекомендациями поставщика инструмента.

Для определения оптимальных режимов во время испытания число проходов определяют делением черного припуска на рекомендуемую глубину резания с последующим округлением результата до большего целого числа; фактическую глубину каждого прохода находят делением величины черного припуска на полученное число проходов. Если фактическая глубина резания меньше рекомендуемой, то подача может быть увеличена так, чтобы произведение глубины и подачи не превышало рекомендуемых значений  $t \times S_0$ , а величина подачи была бы меньше предельного значения, установленного экспериментально по прочности режущей кромки или форме стружки. Скорость резания рассчитывают, исходя из заданной величины экономической стойкости.

Изложенные правила назначения режимов оптимальны в тех случаях, когда режимы ограничивает режущий инструмент, а допускаемые значения  $t$  и  $S_0$  определены в конкретных условиях.

Операции, характеризующиеся одинаковыми оптимальными и технологическими решениями, по всем параметрам операционной технологии могут быть объединены в группы, для которых существуют формальные правила построения операционной технологии, отвечающей целевой функции операции. Детали таких групп можно обрабатывать по типизированной (для групп) операционной технологии. Область использования каждой типизированной технологии ограничивается условиями, определяющими оптимальность технологических решений.

Работы по оптимизации операционной технологии в конкретных условиях мелкосерийного и серийного производства включают в себя анализ обрабатываемых поверхностей деталей; выявление элементарных поверхностей, имеющих конструктивно-технологическую общность и образуемых с помощью одинаковых технологических решений.

Например, поверхности тел вращения удобно разбить на элементарные поверхности, которые могут быть образованы проходными упорными или расточными резцами для глухих отверстий (цилиндрические, конические, фасонные поверхности) и на поверхности, для которых требуется иной инструмент (прямые и угловые канавки, торцовые выемки, винтовые). На поверхности первого типа приходится до 90 % снимаемого при обработке материала. Поэтому для их образования необходимы инструменты как для черновой, так и для чистовой обработки. Поверхности второго типа расположены относительно поверхностей первого типа в теле детали, с них удаляется значительно меньше материала, что позволяет выполнять их черновую и чистовую обработку одним инструментом.

В большинстве случаев существует принципиальная возможность назначения таких режимов обработки и траекторий перемещения инструментов, при которых обеспечиваются наивыгодные условия резания.

В операции может быть столько элементарных переходов, сколько существует участков с отличающимися условиями работы инструмента. Каждый режущий инструмент участвует в проходах и переходах с отличающимися режимами резания. В тех случаях, когда на станке обрабатывают относительно небольшие партии деталей, инструмент может участвовать в обработке различных деталей (операций) из материалов как близких по свойствам, так и отличающихся в течение периода стойкости.

С целью сокращения номенклатуры режущего инструмента и времени обработки одним инструментом выполняют различные по характеру переходы, например, точение черновое, чистовое, по торцу, цилиндру, с различными значениями глубины резания, подачи.

В качестве примера на рис. 10.5 показаны схемы и разрешаемые направления перемещения при снятии припуска резцом с  $\phi = 95^\circ$  и вспомогательным углом в плане  $\phi_1 = 5^\circ$ . На реальных операциях продолжительность работы этого инструмента на отличающихся режимах резания или с различным направлением подачи характеризуется данными, полученными на базе 32 типовых операций (табл. 10.11).

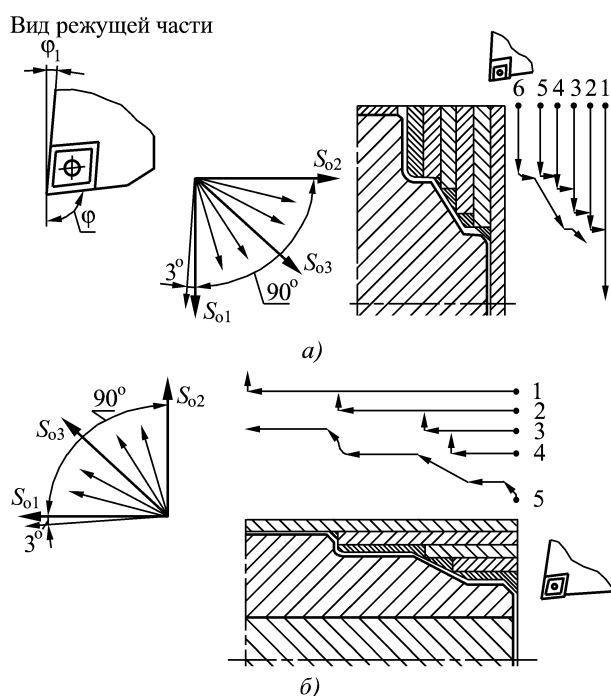


Рис. 10.5. Схемы разрешаемых направлений перемещения резца с  $\phi = 95^\circ$  и  $\phi_1 = 5^\circ$ :

*a* — при подрезке торцов; *б* — при точении по диаметру;  $t = 5-9$  мм;  
 $S_{01} = 0,6$  мм/об,  $S_{02} = 1,5$  мм/об,  $S_{03} = 0,4$  мм/об;  $t \times S_0 = 4,5$  мм<sup>2</sup>

Продолжительность работы резцом с  $\varphi = 95^\circ$ 

Наименование прохода	Глубина резания $t$ , мм	Подача $S_0$ , мм/об	Время резания	
			мин	%
Подрезка торцов	5	0,4	0,72	2,9
	4		3,78	15,0
	3	0,3	1,13	4,5
		0,5	0,39	1,6
		0,4	0,97	3,9
		0,3	2,00	7,9
	2	0,4	0,65	2,6
		0,3	1,02	4,1
1		1,24	4,9	
Точение диаметров	5	0,5–0,6	5,0	19,9
	4	0,5	1,75	7,0
	3	0,4–0,5	2,62	10,4
	2		1,02	4,1
	1	0,5	0,7	2,8
Протачивание фасок	–	0,2	0,27	1,1
Обратное точение	–	0,4–0,6	1,82	7,3
Итого:			25,08	100,0

Отмеченные особенности эксплуатации инструмента оказывают влияние на характер и интенсивность изнашивания, что следует учитывать при назначении режимов резания.

При универсальном использовании резца с  $\varphi = 95^\circ$  возникают следующие *ситуации*:

– участки повышенного износа развиваются независимо один от другого, продолжительность работы инструмента до замены определяется по износу, соответствующему наиболее длительному переходу, при одинаковой скорости изнашивания в двух направлениях;

– участки повышенного износа оказывают влияние друг на друга (обтачивание цилиндра, конуса). В этом случае продолжительность работы инструмента до замены определяется по износу участка, расположенного между участками наибольшего износа по каждому из направлений. Несмотря на то, что износ промежуточного участка кромок развивается менее интенсивно при работе по каждому из направлений, он может стать преобладающим при работе в двух направлениях;

– участки с повышенным износом сливаются и невозможно выделить износ, соответствующий различным направлениям рабочих перемещений, режимы резания должны учитывать суммарное время работы по разрешенным направлениям.

У концевых фрез, фасочных, расточных резцов и некоторых других инструментов возможно появление нескольких очагов износа при использовании для снятия припусков различных участков режущих кромок. Эти участки могут отстоять друг от друга по длине кромки, соприкасаться или накладываться один на другой.

Если участки износа отстоят друг от друга, то режимы и стойкость должны рассчитываться по определяющему проходу, если соприкасаются, то с учетом работы в этих двух проходах, если накладываются, то с учетом суммарного времени работы.

*Скорость изнашивания инструмента* определяет, с одной стороны, условия, в которых происходит отделение стружки (материал заготовки и инструмента, охлаждение и смазка, вибрация, выход стружки и т.п.), а с другой — режим резания ( $v, S, t$ ).

Глубина резания, подача и направление рабочих перемещений оказывают определяющее влияние на форму площадки износа, а скорость резания — на интенсивность ее изменения.

Для расчетов, связанных со временем обработки, периодами стойкости инструмента и т.п. вместо режимов работы на каждом элементарном участке обрабатываемой поверхности целесообразно использовать такие *эквивалентные режимы*, которые обеспечивают ту же суммарную по поверхности (переходу) интенсивность (скорость) изнашивания.

Условия работы инструментов, участвующих в проходах с отличающимися режимами при обработке одной детали (операции), также можно охарактеризовать эквивалентными режимами резания. Под эквивалентными следует понимать такие режимы резания, при которых износ инструмента за время обработки одной детали (операции) тот же, что и при работе с различными режимами на каждом проходе. Определение эквивалентных режимов тесно связано с определением участков наиболее интенсивного износа режущей кромки.

Для инструмента, работающего с переменными режимами резания и различными направлениями подачи, величину износа в любой точке задней поверхности можно определить как сумму износов, полученных на каждом режиме обработки (анализ выполнен на примере проходных и подрезных токарных резцов):

$$h_{\Sigma j} = \sum_{i=1}^m h_{ji} = \sum_{i=1}^m t_{oi} W_{ji}, \quad (10.7)$$

где  $h_{\Sigma j}$  — суммарный износ в  $j$ -й точке режущей кромки, мм;  $m$  — число различных режимов обработки;  $h_{ji}$  — износ при работе на  $i$ -м режиме в  $j$ -й точке, мм;  $t_{oi}$  — время резания на  $i$ -м режиме, мин;  $W_{ji}$  — скорость изнашивания в  $j$ -й точке при резании на  $i$ -м режиме.

Как отмечалось выше, скорость изнашивания  $W_{ji}$  определяется многими факторами. С увеличением скорости резания растет скорость изнашивания режущих кромок, причем степень влияния скорости резания на скорость изнашивания аналогична зависимости «стойкость — скорость».

Увеличение подачи приводит к увеличению как общей, так и удельной нагрузки на режущую кромку. При этом скорость изнашивания также возрастает. Изменение глубины резания не вызывает увеличения скорости изнашивания при условии, что не нарушается стабильность процесса обработки (отсутствуют вибрации).

Важно также знать зависимость скорости изнашивания от положения рассматриваемой точки режущей кромки. Анализ формы площадок износа резцов, используемых на токарных станках, показал, что есть ярко выраженные «пики» — участки повышенного износа и участки равномерного износа (рис. 10.6).

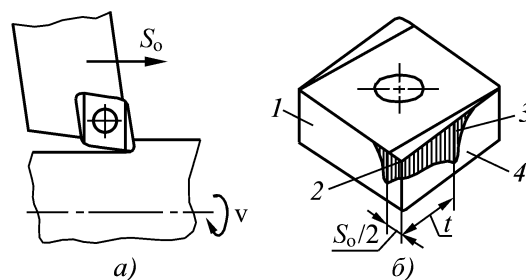


Рис. 10.6. Положение резца относительно заготовки (а) и форма площадки его износа (б):

1 — вспомогательная задняя поверхность; 2 — вершина;  
3 — площадка износа; 4 — главная задняя поверхность

Участки повышенного износа расположены, как правило, в месте контакта наклепанного поверхностного слоя заготовки с главной задней поверхностью и в месте контакта обработанной поверхности с вспомогательной задней поверхностью.

Участок повышенного износа на главной задней поверхности расположен на расстоянии, равном глубине резания от вершины, а на вспомогательной задней поверхности — на расстоянии, равном половине величины подачи. Глубина резания изменяется при обработке партии деталей вследствие колебания припуска заготовок. Поэтому участок повышенного износа на главной задней поверхности



может иметь форму кривой Гаусса или равнобедренного треугольника, поскольку рассеяние значений припуска характеризуется указанными распределениями.

Участок повышенного износа на вспомогательной задней поверхности имеет аналогичную форму вследствие рассеяния механических свойств заготовки. Скорость  $W_{всп}$  изнашивания на вспомогательной задней поверхности несколько меньше скорости  $W_{гл}$  вследствие разницы диаметров и удельных давлений со стороны обрабатываемой поверхности (рис. 10.7).

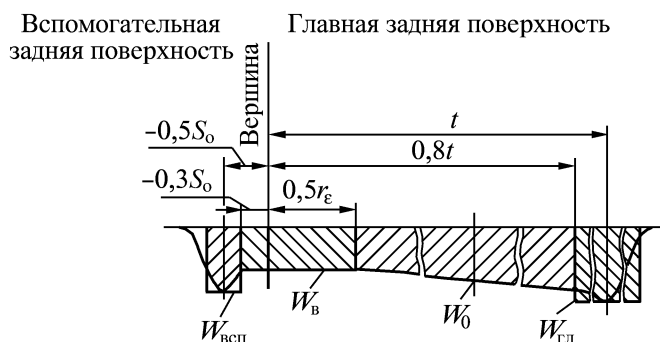


Рис. 10.7. Интенсивность изнашивания различных участков режущей кромки резца с  $\phi = 95^\circ$  при обтачивании:

- $W_{гл}$  — наибольшая скорость изнашивания участка главной задней поверхности;
- $W_{всп}$  — наибольшая скорость изнашивания участка вспомогательной задней поверхности;
- $W_в$  — скорость изнашивания поверхности сопряжения главной и вспомогательной задних поверхностей (вершина);  $W_0$  — скорость изнашивания главной задней поверхности

В общем виде зависимость скорости изнашивания  $W$  различных участков задней поверхности инструмента от параметров резания имеет вид:

$$W = C_w v^\alpha S_0^\beta t^\gamma K_L, \quad (10.8)$$

где  $C_w$  — постоянный коэффициент;  $\alpha, \beta, \gamma$  — показатели степени, соответствующие показателям при  $v, S_0, t$  в зависимости  $T = f(v, S_0, t)$ , взятые со знаком минус;  $K_L$  — коэффициент, зависящий от расположения рассматриваемого участка задней поверхности относительно вершины режущей части инструмента (табл. 10.12).

Если резец работает последовательно в нескольких направлениях, например, подрезает торец и обтачивает цилиндрическую поверхность, то площадка износа на его задней поверхности формируется в результате резания по каждому из направлений. При этом участки повышенного износа от работы по каждому из направлений не совпадают (рис. 10.8), и наибольшая величина суммарной площадки износа меньше аналогичной величины при резании в одном направлении за одно и то же время.

**Влияние расположения участка задней поверхности  
на коэффициент  $K_L$**

Координаты участка задней поверхности $L$ , мм	Коэффициент $K_L$
$L = -0,5S_0 \pm 0,25S_0$	1,2
$-0,3S_0 \leq L \leq 0,5r_\varepsilon$	0,8
$L = 0,5t$	1,0
$0,5r_\varepsilon \leq L < 0,8t$	0,8–1,2
$L = t \pm 0,2t$	1,8

**Обозначение:**  $r_\varepsilon$  — радиус при вершине режущей части, мм.

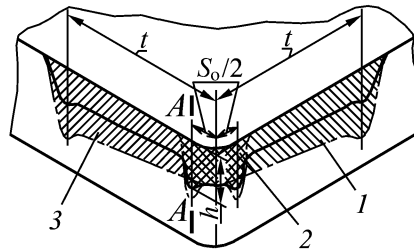


Рис. 10.8. Площадки износа:

1 — при подрезке торца; 2 — обтачивании; 3 — суммарная площадка износа;  
 А-А — участок режущей кромки, на котором интенсивность изнашивания наибольшая  
 (в результате суммирования площадок износа)

При резании с переменным направлением подачи скорость изнашивания  $W$  задней поверхности резца на любом ее участке можно определить по формуле:

$$W = (h_1 + h_2)/t_p, \quad (10.9)$$

где  $h_1$  и  $h_2$  — величины износа задней поверхности резца от подрезки и обтачивания, соответственно:  $h_1 = t_{p1}W_{\text{подр}}$ ;  $h_2 = t_{p2}W_{\text{обт}}$ ;  $t_{p1}$ ,  $t_{p2}$  — время резания при обтачивании, соответственно:  $t_{p1} = q_1 t_p$ ,  $t_{p2} = t_p(1 - q_1)$ , если  $t_{p1} \geq t_{p2}$ ;  $q_1$  — доля времени резания при обтачивании;  $W_{\text{подр}}$ ,  $W_{\text{обт}}$  — скорости изнашивания при постоянных условиях резания.

С учетом вышесказанного:

$$W = \frac{t_{p1}W_{\text{подр}} + t_{p2}W_{\text{обт}}}{t_p} = q_1W_{\text{подр}} + (1 - q_1)W_{\text{обт}}. \quad (10.10)$$

Для условий, соответствующих показанным на рис. 10.8 в плоскости  $A-A$ ,  $W_{\text{обт}} = W_{\text{всп}}$  (см. рис. 10.7),  $W_{\text{подр}} = W_{\text{в}}$ ;  $W_{\text{всп}} = 1,2W_0$ ;  $W_{\text{в}} = 0,8W_0$ . Если  $q_1 = 0,5$ , т.е. время подрезки и обтачивания одинаково, то  $W = W_0$ . Это означает, что максимальная скорость изнашивания при переменных условиях резания в 1,4 раза меньше максимальной скорости изнашивания  $W_{\text{гл}}$  при резании в одном направлении (см. рис. 10.7).

Задавая различные значения  $q_1$ , можно определить скорость изнашивания на любом участке задней поверхности инструмента. В табл. 10.13 представлены расчетные (индекс «р») и экспериментальные (индекс «э») значения коэффициента  $K_{\text{вл}}$  уменьшения скорости изнашивания при резании с переменным направлением подачи ( $K_{\text{вл}} = W/W_{\text{всп}}$ ), определенные в плоскости  $A-A$  (см. рис. 10.8). Значения  $K_{\text{влэ}}$  получены измерением реальных площадок износа замененных резцов, проработавших в переменных условиях (при подрезке и обтачивании) различное время ( $q_1$  изменялось от 0,1 до 1,0).

Таблица 10.13

### Значения коэффициентов уменьшения скорости изнашивания

Коэффициент	$q_1$									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$K_{\text{влр}}$	0,73	0,76	0,79	0,82	0,85	0,82	0,79	0,76	0,73	1,0
$K_{\text{влэ}}$	0,94	0,91	0,86	0,83	0,78	0,80	0,75	0,78	0,89	1,0

Сравнение коэффициентов  $K_{\text{влр}}$  и  $K_{\text{влэ}}$  показывает, что их значения достаточно близки.

Для определения скорости изнашивания задней поверхности резца при резании с изменяющимися значениями подачи ( $S_{01}$  и  $S_{02}$ ) и глубины резания ( $t_1$  и  $t_2$ ) можно воспользоваться описанной выше схемой образования площадки износа, т.е. на главной задней поверхности скорость изнашивания максимальна на расстоянии каждой из глубин резания ( $t_1$  и  $t_2$ ) от вершины, а на вспомогательной — на расстоянии  $S_{01}/2$  и  $S_{02}/2$  от вершины.

На рис. 10.9 показан износ черного проходного резца, работающего с двумя значениями глубины резания и подачи. Можно увидеть два «пика» износа на главной задней поверхности, соответствующие двум глубинам резания, и два «пика» износа на вспомогательной задней поверхности, соответствующей двум значениям подачи.

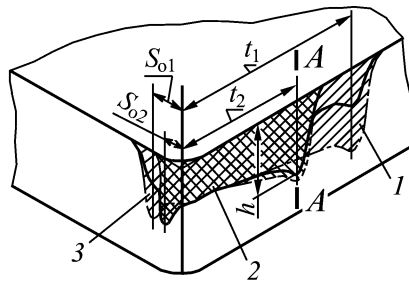


Рис. 10.9. Площадки износа:

- 1 — при обтачивании с глубиной резания  $t_1$  и подачей  $S_{01}$ ;  
 2 — с глубиной резания  $t_2$  и подачей  $S_{02}$ ; 3 — суммарная площадка износа;  
 A–A — участок режущей кромки, на котором интенсивность изнашивания наибольшая  
 (в результате суммирования площадок износа)

Если обозначить часть времени резания, которое резец работает с подачей  $S_{01}$  и глубиной резания  $t_1$ , через  $q_2$ , то скорость изнашивания  $W_1$  режущей части в описываемых условиях можно определить выражением:

$$W_1 = q_2 W_{(t_1, S_{01})} + (1 - q_2) W_{(t_2, S_{02})}. \quad (10.11)$$

Коэффициент  $K_{W_2}$  уменьшения скорости изнашивания равен:

$$K_{W_2} = q_2 \frac{W_{(t_1, S_{01})}}{W_2} + (1 - q_2) \frac{W_{(t_2, S_{02})}}{W_2}, \quad (10.12)$$

где  $W_2$  — максимальная скорость изнашивания при резании с постоянной глубиной и подачей.

Экспериментально определены следующие значения коэффициента  $K_{W_2}$  для условий  $t_2 = 2/3 t_1$  и  $S_{02} = S_{01}/2$  (скорость изнашивания определялась в сечении A–A (см. рис. 10.9):

$q_1$	0,4	0,5	0,8
$K_{W_2}$	0,81	0,74	0,76

Проведенный анализ показывает, что продолжительность работы инструмента до допускаемого износа  $h_{\text{доп}}$  возрастает при изменяющихся глубинах, подачах и направлениях перемещения.

Для неперетачиваемого инструмента, который используется на токарных станках с ЧПУ (резцы, оснащенные СРП из твердых сплавов и т.п.), можно приблизить величину допускаемого износа к предельному значению.

Полная потеря режущей способности СРП имеет место в тех случаях, когда происходит ее поломка или выкрашивание рабочей кромки. *Отказы инструмента* в результате поломок или выкрашивания могут быть двух типов: внезапные и от износа.

Основными причинами *внезапных отказов* при черновой и получистовой обработке являются: некачественная сборка резцов, повреждения стружкой, дефекты заготовок — облой, повышенный припуск, биение, заусеницы от резания, повышенная твердость, сбой станка, плохое закрепление заготовки, вибрации.

*Отказы от износа* возникают по мере износа инструмента в связи с увеличением составляющих сил резания и ослабления режущей кромки за счет непрерывного углубления и расширения «лунки» износа на передней поверхности пластины. Внезапные отказы инструмента характеризуются экспоненциальным распределением, отказы от износа — нормальным законом распределения, законом Вейбула — Гнеденко или логарифмическим нормальным распределением.

В условиях мелкосерийного производства практически невозможно устранить внезапные отказы, и закон распределения стойкости для инструмента, работающего на станках с ЧПУ, будет представлять собой композицию экспоненциального и одного из перечисленных выше распределений. Эксперименты показали, что работу токарных резцов характеризует композиция экспоненциального и логарифмического нормального распределений (рис. 10.10, *а*). Кривая характеризует такое состояние режущих кромок, при котором невозможно продолжение работы (поломка, выкрашивание, ухудшение чистоты поверхности).

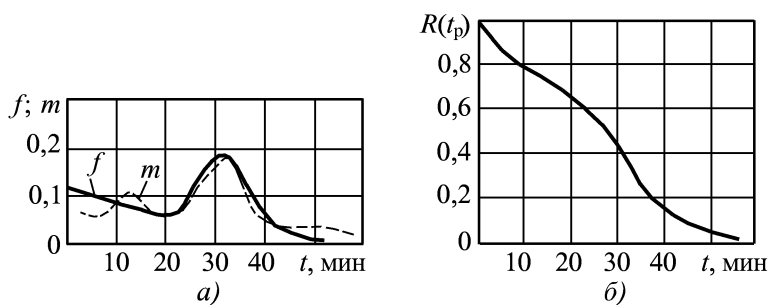


Рис. 10.10. Плотность  $f$  и частота  $m$  распределения наработок (*а*) и вероятность безотказной работы  $R(t_p)$  (*б*) резца с  $\varphi = 95^\circ$ : твердый сплав Т15К10, обработка стали 45 с  $v = 100$  м/мин;  $S_0 = 0,4$  об/мин и  $t = 4$  мм

Из рис. 10.10, *а* видно, что участок кривой  $t_p < 20$  мин близок к экспоненте с интенсивностью 0,03; последующий участок совпадает с логарифмической нормальной кривой с  $\ln = 1,54$ . Среднее квадратическое отклонение  $\sigma = 0,28$ .

Кривая надежности инструмента для этого же случая  $R(t_p)$  показана на рис. 10.10, б. Она представляет собой произведение функций надежности экспоненциального ( $R_1(t_p)$ ) и логарифмического нормального ( $R_2(t_p)$ ) распределений:

$$R(t_p) = R_1(t_p)R_2(t_p). \quad (10.13)$$

Для оценки допускаемого износа в качестве целевой функции приняты затраты на операцию, связанные с эксплуатацией инструмента. Для облегчения расчетов оптимизацию затрат целесообразно выполнять по времени работы инструмента, а величину  $h_{\text{доп}}$  определять из выражения  $h_{\text{доп}} = t_{\text{доп}}W$ , где  $t_{\text{доп}}$  — время работы инструмента до допускаемого износа,  $W$  — средняя скорость изнашивания инструмента в рекомендуемых для него условиях.

Относительный эксплуатационно-инструментальный показатель  $\mathcal{E}_k$ , выраженный в стоимости станко-минуты работы станка, может быть записан (при постоянных значениях  $t, S_o, v$ ) в виде:

$$\mathcal{E}_k = \frac{t_p}{T(R)} \left[ (1 - q_p)(\Pi E_p + S_{\text{ин1}}) + q_p(\Pi E_p + S_{\text{ин2}}) \right], \quad (10.14)$$

где  $T(R)$  — стойкость, мин, соответствующая вероятности  $R$  безотказной работы (в рассматриваемых условиях  $R = 0,5$ );  $\Pi$  — продолжительность простоя станка из-за замены инструмента в связи с отказом (поломка, выкрашивание), мин;  $S_{\text{ин1}}$  — стоимость инструмента, заменяемого по износу, руб;  $S_{\text{ин2}}$  — стоимость инструмента, заменяемого после отказа, руб;  $q_p$  — относительное число инструментов, заменяемых в связи с отказом (разрушением), в общем числе замен.

Минимизируя выражение (10.14) для  $\mathcal{E}_k$  при постоянных режимах резания, находим оптимальное значение  $T(R = 0,5)$ , соответствующее допускаемой величине износа. Для решения этого уравнения необходимы следующие данные применительно к станкам с ЧПУ: параметры законов распределения отказов инструмента; технико-экономические величины ( $S_{\text{ин1}}, S_{\text{ин2}}, \Pi, E_p$ ); скорость изнашивания инструментов.

Для инструмента, формирующего поверхности с шероховатостью в узких пределах, допускаемый износ инструмента определяют по зависимостям от пути резания (рис. 10.11).

Так как на токарных станках с ЧПУ в течение периода стойкости инструмента работа производится с переменной подачей, то на вспомогательной кромке образуется несколько проточин в соответствии со значением каждой подачи.

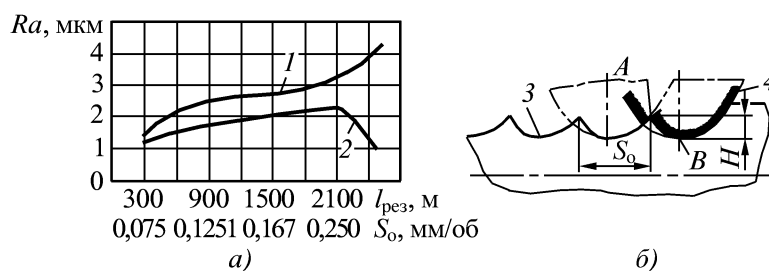


Рис. 10.11. Параметр шероховатости  $Ra$  обработанной поверхности в зависимости от пути  $l_{рез}$  резания (а) и профиль изношенного инструмента (б):  
 1, 2 — изменение шероховатости при постоянной и переменной подаче соответственно;  
 3 — профиль поверхности детали, обработанной изношенным инструментом;  
 4 — профиль изношенного инструмента

Из-за проточин возникают *микронеровности* на обрабатываемой поверхности.

По мере износа инструмента проточки углубляются и расширяются. Профиль изношенного инструмента и соответствующий ему профиль обработанной поверхности показан на рис. 10.11, б. Глубина  $H$  каждой проточки равна расстоянию между основанием проточки  $A$  и вершиной резца  $B$ . Для абсолютно пластичного обрабатываемого материала значение  $H$  совпадает с высотой неровностей на обработанной поверхности.

Однако глубина  $H$  проточин будет при одинаковой продолжительности работы резца значительно меньше, чем при работе с постоянной подачей (кривая 2 на рис. 10.11, а показывает изменение шероховатости поверхности при работе с переменной подачей). Поэтому на токарных станках с ЧПУ при правильном назначении режимов резания редки случаи, когда ухудшение шероховатости поверхности является критерием смены инструмента.

Для инструмента, формирующего поверхность, положение и (или) размеры которой не должны выходить за оговоренные техническими требованиями достаточно узкие пределы, допускается износ, обеспечивающий требуемую размерную стойкость. Величина этого износа определяется из зависимостей изменения точности по мере износа инструмента (см. гл. 2).

Для выполнения условий оптимальности работы режущего инструмента при обработке мелких и средних серий деталей необходимо соблюдать следующую **методику назначения режимов резания**:

а) установление допустимых и базовых значений глубины резания и подачи для каждого инструмента в конкретных условиях;

б) установление скорости резания, обеспечивающей минимальные затраты на операцию при работе одним инструментом на базовых значениях глубины

резания и подачи, т.е. установление экономической скорости резания при одноинструментной обработке. Экономическая скорость резания взаимосвязана с экономической стойкостью. Для распространенных условий эксплуатации инструмента на станках с ЧПУ значения экономической стойкости даны в [71]. Базовые значения глубины резания, подачи и экономической скорости служат основой для определения режимов работы данного инструмента на любой операции;

в) режимы резания для конкретной операции рассчитывают по базовым режимам, вводя поправочные коэффициенты, учитывающие различие механических характеристик базового и обрабатываемого материала, переменные режимы резания, работу инструмента в составе многоинструментных наладок.

Принимаемые технологические решения по режимам резания должны опираться на результаты технологических испытаний этого инструмента в конкретных производственных условиях.

*Технологические испытания на предприятиях*, имеющих опыт эксплуатации станков с ЧПУ, выполняют на оборудовании, на котором предполагается использование соответствующего инструмента. *Цель испытаний* — установить базовые параметры режимов резания, обеспечивающие минимальную стойкость обработки при высокой надежности.

Для проведения испытаний выбирают одну или несколько конкретных операций, где инструмент работает с высокой производительностью и достаточной стойкостью. Первоначально операции выбирает технолог на основании экспертных оценок. Важно, чтобы операция как можно более точно отражала условия работы инструмента. Например, для подрезного резца доля его работы по подрезке торца должна составлять не менее 70 %.

Если средняя стойкость инструмента (при соблюдении требований математической статистики при испытаниях и при обработке их результатов) соответствует нормативным данным, а распределение  $R(t_p)$  близко к нормальному или логарифмическому (10.13), то эти режимы могут быть использованы как базовые (индекс «б») при подготовке УП.

В случае, когда фактические режимы резания (индекс «ф») существенно отличаются от рекомендуемых [55] (индекс «рек»), необходимо установить причины этого расхождения.

Среди причин:

а) значения фактической глубины резания  $t_f$  и фактической подачи  $S_f$  ограничены возможностями станка (по мощности, крутящему моменту, усилию подачи) или средств крепления заготовки. В этом случае  $t_{рек} = t_f$  и  $S_{рек} = S_f$ ;

б) значение  $t_f$  равно припуску на обработку, и для определения  $t_{рек}$ ,  $S_{рек}$  необходимо выбрать другую операцию;



в) увеличение подачи ограничено требованиями к шероховатости обработанной поверхности и следует выбрать другую операцию;

г) интенсификация режимов резания невозможна вследствие низкой стойкости инструмента  $T_\phi$ , поэтому уменьшают скорость резания и рассматривают возможность увеличения глубины резания и подачи.

При значительной разнице в значениях  $t_{\text{рек}}$  и  $S_{\text{рек}}$  разных операций принимают наибольшее значение  $t_{\text{рек.макс}}$ , а величину подачи  $S_{\text{рек}}$  определяют как средневзвешенную:

$$S_{\text{рек}} = \frac{t_{\text{рек1}}S_{\text{рек1}} + t_{\text{рек2}}S_{\text{рек2}} + \dots + t_{\text{рек.п}}S_{\text{рек.п}}}{nt_{\text{рек.макс}}}, \quad (10.15)$$

где  $t_{\text{рек1}}$  и  $S_{\text{рек1}}$  — режимы первой операции;  $t_{\text{рек2}}$  и  $S_{\text{рек2}}$  — режимы второй операции и т.д.;  $n$  — число рассмотренных операций.

Скорости в этих оптимальных операциях не должны по величине значительно отличаться между собой и должны обеспечить нормативную стойкость инструмента  $T_H$  (например, 15 мин). Если фактическая стойкость инструмента  $T_\phi$  меньше или больше  $T_H$ , то скорость резания  $v_\phi$  корректируют по формуле:

$$v_{\text{рек}} = v_\phi \left( T_\phi / T_H \right)^{0,33}. \quad (10.16)$$

Рекомендуемую глубину резания для рассматриваемого инструмента при чистовой обработке (обтачивании, растачивании) можно принять, сравнивая фактические значения глубины резания с результатами технологических испытаний.

Для операций, на которых критерием замены инструмента является ухудшение шероховатости поверхности или выход за пределы поля допуска, режимы корректируют по результатам диагностирования и контроля.

Поправочные коэффициенты, связанные с параметрами обрабатываемости материала заготовки, используют для всех инструментов наладки. Поправочные коэффициенты, связанные с переменными режимами резания, вводят для инструментов, работающих с различным направлением рабочих перемещений и (или) с различными значениями глубины резания и подачи. Поправочные коэффициенты, учитывающие многоинструментность, необходимы для двух-трех наиболее нагруженных инструментов наладки.

В табл. 10.14 и 10.15 приведены поправочные коэффициенты к базовым значениям подачи  $S_0$  и скорости резания  $v_0$  (на величину подачи —  $K_S$  и на скорость резания  $K_v$ ) для обработки основных конструкционных материалов, используемых в машиностроении.

## Поправочные коэффициенты при обработке стали

Марка	Твердость, НВ	Значения коэффициентов при обработке на ТС из станков с ЧПУ								Значения коэффициентов при обработке на ТС из токарных станков с ЧПУ										
		многоцелевых				фрезерных				Сверление, центрование, рассверливание				Точение твердосплавными инструментами		Растачивание твердосплавными инструментами		Точение, растачивание		
		I		II		I		II		I		II		черновое	чистовое	черновое	чистовое	I	II	
		$K_S$	$K_V$	$K_S$	$K_V$	$K_S$	$K_V$	$K_S$	$K_V$	$K_S$	$K_V$	$K_S$	$K_V$	$K_S$	$K_V$	$K_S$		$K_V$		
45	170–229	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	
40																	1,0	1,4		
10	≤137	1,5	1,45	1,5	1,45	1,4	1,3	1,2	1,3	1,2	1,3	1,2	1,3	1,3	1,2	1,0	1,2	1,5	1,6	
15	≤143																			
20	≤143	1,2	1,1	1,2	1,1	1,1	1,1	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
30																				
35	≤187																			
45*	220–250	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,7	0,9	0,8	0,8	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	1,5	0,8	1,3	0,8	
50	179–229	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	1,0	0,9	1,0	0,9	1,0	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,7	
50*	229–255	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,7	0,9	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1,5	0,8	1,3	0,8	
20X	170–217	1,0						1,0		1,0		1,0	1,1	1,0	1,1	1,3	1,2	1,0	1,2	1,3
30X	≤217				1,0		0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1,3	1,2	1,0	1,2	0,8	
35X															1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	
40X	179–229		0,8			1,0		1,0						1,0	1,0	1,0	1,0			
40X*	230–260	0,9	0,7	0,9	0,8	0,8	0,7	0,9	0,8	0,8	0,7	0,8	0,7	0,8	1,5	0,8	1,3	0,6	0,75	
45X*																			0,8	
18ХГТ	157–207	1,1	1,0	1,1	1,0	1,1	0,9	1,1	0,9	1,0	0,8	1,0	0,8	1,3	1,2	1,0	1,2	0,9	1,0	
30ХГТ	170–197	1,0	0,7	1,0	0,9			0,6	1,0	0,8	0,9	0,7	0,9	0,7	1,0		1,0	1,0	1,0	0,6
30ХГТ	170–241	0,9			0,9	0,8	1,0			0,7	0,8								0,5	1,1

Марка	Твердость, НВ	Значения коэффициентов при обработке на ТС из станков с ЧПУ								Значения коэффициентов при обработке на ТС из токарных станков с ЧПУ										
		многоцелевых				фрезерных				Сверление, центрование, рассверливание				Точение твердосплавными инструментами		Растачивание твердосплавными инструментами		Точение, растачивание		
		I		II		I		II		I		II		черновое	чистовое	черновое	чистовое	I	II	
		$K_S$	$K_V$	$K_S$	$K_V$	$K_S$	$K_V$	$K_S$	$K_V$	$K_S$	$K_V$	$K_S$	$K_V$							$K_S$
35ХГТ	207–241	0,9	0,7	0,9	0,8	0,8	0,6	0,9	0,7										0,7	
65Г	196–229	1,0		1,0		1,0		0,7			1,0	0,9		0,9			1,3	0,9	1,3	0,6
12ХН3А	163–207	1,1	0,8	1,1	0,9	1,1	0,8	0,8	1,0	1,0	0,8	0,8	0,8	1,3	1,2	1,2	1,2	0,8	0,8	0,9
12Х2Н4			0,7		0,8														0,9	0,8
20ХН3А	<241	0,9	0,7	0,9	0,8	0,8	0,8	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,3	1,2	1,2	1,0	1,0	0,8	0,9
20ХНМ	155–217	1,1		1,1															0,9	1,0
Ст3		126–163	1,3	1,1	1,3	1,1	1,4	1,3	1,2	1,3	1,2	1,1	1,2	1,1	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5
08	1,45			1,3		1,45														
А12	160	1,1	1,3	1,1	1,3	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,2	1,2
Ст5	170																			
25ХГТ	≤217	1,0	0,7	1,0	0,9	1,0	0,6	1,0	1,0	1,0	0,9	0,6	0,9	0,6	1,0	1,0	1,0	1,0	0,6	0,8
40ХГТР	≤229																			
9Х18	230–255	0,9	0,6	0,9	0,7	0,8	0,7	0,9	1,0	0,8	0,6	0,8	0,6	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	0,4	0,9
ШХ15	179–207	1,1																		
ШХ15СГ	179–217		1,0	0,8	1,0	1,0	1,0	0,7	1,0	0,8	0,9	0,7	0,8	0,7	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,7
50Х	187–229	1,0																		
40ХФА	207–241	0,9	0,7	0,9	0,8	1,1	0,8	1,0	1,0	0,8	0,7	0,8	0,7	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8	0,9
У8А	187																			
У10А	163–183	0,9	0,8	0,9	0,9	0,8	0,6	0,9	0,7	1,3	1,1	1,3	1,1	1,3	1,2	1,2	1,0	1,2	1,3	1,5
50ХН	229–269																			
20Л	120–126	1,1	0,7	1,1	0,8	1,0	0,7	1,0	0,8	0,9	0,8	0,9	0,8	1,3	1,2	1,0	1,2	1,0	0,9	1,0
40ХН	160–207	1,1	0,7	1,1	0,8	1,0		0,9		0,8	0,9	0,8	0,9	0,8	1,3	1,2	1,0	1,2	1,0	0,9
40ХГ	207–269	0,9	0,6	0,9	0,7	0,8	0,7	0,9	0,8	0,6	0,8	0,6	0,9	1,3	1,3	0,9	1,3	0,9	1,3	0,8

Марка	Твердость, НВ	Значения коэффициентов при обработке на ТС из станков с ЧПУ								Значения коэффициентов при обработке на ТС из токарных станков с ЧПУ																
		многоцелевых				фрезерных				Сверление, центрование, рассверливание				Точение твердосплавными инструментами		Растачивание твердосплавными инструментами		Точение, растачивание								
		I		II		I		II		I		II		черновое	чистовое	черновое	чистовое	I	II							
		$K_S$	$K_V$	$K_S$	$K_V$	$K_S$	$K_V$	$K_S$	$K_V$	$K_S$	$K_V$	$K_S$	$K_V$							$K_S$		$K_V$				
30ХГТВ	220	1,0		1,0	0,8					0,9		0,9		1,0	1,0	1,0	1,0		0,9							
20ХГС	150–207	1,1	0,8	1,1	0,9	1,0		1,0		1,0	0,8	1,0	0,8													
38ХЮА	160–230	1,0		1,0						0,9		0,9													0,8	
40ХНМ	197–269	0,9	0,6	0,9	0,7	0,8	0,6	0,9	0,7	0,8	0,6	0,8	0,6							1,3	0,9	1,3			0,9	
45ХНМА																										
38Х2МЮА	187–229	1,0	0,5	1,0	0,6	1,0		1,0		0,9	0,8	0,9	0,8						0,6	0,8						
50ХФ	<270	0,9	0,4	0,9	0,5	0,8	0,5	0,9	0,6	0,8		0,8		1,0	1,3	0,9	1,3		0,4	0,8						
40ХС*	215	1,0		1,0		1,0		1,0		0,9	0,6	0,9	0,6													
40ХФ*	220–280	0,7	0,5	0,7	0,6	0,8	0,6	0,9	0,7	0,6											0,6	0,6				
40ХМ*	285–321																									
15Х	130	4,5	1,0	1,5	1,1	1,4	1,0	1,2	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,3	1,2	1,0	1,2	1,0	1,0							
38ХА	197–204	1,1	0,8	1,1	0,8	1,2	0,9	1,0	1,0	0,9	0,8	0,9	0,8	1,0	1,0		1,0	0,8	0,9							
50Г	170–229	1,0	0,7	1,0		1,0	0,7		1,0		0,8		0,7		0,7	0,7			1,3	0,9	1,3	0,6	0,8			
40ХНМА	197–269	0,9	0,6	0,9	0,7	0,8	0,6	0,9	0,7	0,8	0,6	0,8	0,6	0,8	1,5	0,8	1,3	0,6	0,7							
35ГС*	269–321	0,7	0,5	0,7	0,6	0,6	0,4		0,5	0,6		0,6		0,6	0,6	0,8		1,5		0,8	0,6	0,7				
12Х2Н3А	156–217	1,1	0,8	1,1	0,9	1,0	0,8		1,0	0,9		1,0			1,0			1,0		1,0	1,0	1,0	0,8	0,9		
45Г2	≤229	0,9	0,7	0,9	0,8	0,8	0,7	0,9	0,8	0,8		0,8		0,9	0,9	0,9	0,6	0,7								

\* Сталь после улучшения.

**Примечания:**

1. Базовые режимы выбираются из нормативов для стали 45.
2. Римскими цифрами обозначен материал режущей части инструмента: I — быстрорежущая сталь; II — твердый сплав.
3. Коэффициенты вводятся на базовые режимы, определенные для конкретного инструмента, закрепленного за конкретным станком.
4. В процессе накопления экспериментальных данных коэффициенты уточняются.

### Поправочные коэффициенты при обработке чугуна

Марка	Твердость, НВ	Значения коэффициентов при обработке на ТС из станков с ЧПУ								Значения коэффициентов при обработке на ТС из токарных станков с ЧПУ									
		многоцелевых				фрезерных				Сверление, центрирование, рассверливание				Точение, растачивание твердосплавными инструментами					
		I		II		I		II		I		II		от вида обрабатываемого материала	по корке	без корки			
		$K_S$	$K_V$	$K_S$	$K_V$	$K_S$	$K_V$	$K_S$	$K_V$	$K_S$	$K_V$	$K_S$	$K_V$	$K_S$	$K_V$	$K_V$			
АСЧ-1	108–229	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0				
АСЧ-3	160–190						1,1		1,1	1,2	1,2	1,2				1,2			
СЧ 15-32	163–229						1,0		1,0	1,0	1,0	1,0				1,0			
СЧ 18-36	170–229						1,0		1,0	1,0	1,0	1,0				1,0			
СЧ 21-40	170–241	0,9	0,9	0,85	0,9	0,8	0,9	0,9	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	0,9	0,9				
СЧ 24-44							0,9		0,9							0,8	0,8	0,7	0,7
СЧ 28-48							0,8		0,8							0,8	0,7	0,7	0,7
СЧ 32-52							187–255		0,8							0,8	0,8	0,7	0,7
СЧ 12-28	143–229	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,7	1,0	0,7	1,0	1,0	1,2	1,2			
СЧ 32-42	170–241		0,9		0,9	0,8	0,9	0,9	0,9	1,0	0,9	1,0	0,9	1,0	0,9	0,9	0,9		
КЧ 30-6	163	1,2	1,0	1,15	1,0	2,0	1,0	2,0	1,0	0,8	1,1	0,8	1,1	0,9	0,9	1,0			
КЧ 33-3										1,2		1,1					1,2	1,1	
КЧ 35-10										1,2		1,1					1,2	1,1	
КЧ 37-12										1,1		1,1					1,1	0,8	
ВЧ 45-50										170–207		1,0					0,7	1,0	0,7
ВЧ 40-10	156–197	1,0	0,7	1,0	0,7	1,5	0,8	1,5	0,8	1,1	0,9	1,1	0,9	1,0	1,0				
ВЧ 45-10	187–255	0,8	0,65	0,8	0,6	1,3	0,6	1,3	0,6	0,8	0,6	0,8	0,6	1,2	0,8	0,65			
ВЧ 50-1,5					0,7												0,6	1,2	
ВЧ 60-2					197–269												0,55	0,6	1,2

**Примечания:**

1. Базовые режимы выбираются для чугуна СЧ 15-32.
2. Остальные примечания — см. пп. 2–4 табл. 10.14.

Параметры режима резания для каждого инструмента наладки могут быть определены следующим образом: глубина резания  $t$  равна базовой глубине  $t_6$ ; подача  $s = s_6 K_s$ ; скорость резания  $v = v_6 K_v$ , где  $K_s, K_v$  — поправочные коэффициенты на обрабатываемый материал из табл. 10.14 и 10.15.

Результаты технологических испытаний заносят в *базы данных инструмента (БДИ)*, которые являются одним из основных носителей информации. Инструмент и его возможности определяют многие технологические решения по построению оптимальной операции. Для этого в БДИ вносят следующие **технологические сведения**:

- а) режимы резания по группам материалов, обрабатываемых на станке;
- б) стойкость;
- в) граничные значения подачи  $S_{\min}, S_{\max}$  по этим группам материалов;
- г) предельно допускаемую глубину резания;
- д) величину припуска на чистовые проходы, выполняемые инструментом;
- е) направления врезания инструмента и его отвода;
- ж) величины недохода и перебега.

Эти данные устанавливают на основании обобщения производственного опыта и анализа приемов обработки (см. гл. 3) и используют в системах автоматической технологической подготовки производства и в САПР инструмента.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Адаптивное управление технологическими процессами / Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов, С.П. Протопопов [и др.]. — Москва : Машиностроение, 1980. — 536 с.
2. *Азгальдов, Г.Г.* О квалиметрии / Г.Г. Азгальдов, Э.П. Райхман. — Москва : Изд-во стандартов, 1973. — 172 с.
3. *Баишков, В.М.* Испытания режущего инструмента на стойкость / В.М. Баишков, П.Г. Кацев. — Москва : Машиностроение, 1985. — 136 с.
4. *Баталин, А.А.* Основные принципы построения системы технического диагностирования станков с ЧПУ / А.А. Баталин, А.И. Камышев, Б.И. Черпаков // Станки и инструмент. — 1980. — № 5. — С. 5–8.
5. *Брон, А.М.* Обработка корпусных деталей на многоцелевых станках с ЧПУ / А.М. Брон. — Москва : Машиностроение, 1986. — 47 с.
6. Инструмент для современных технологий : справочник / С.К. Беляев, Г.В. Боровский, М.А. Волосова [и др.] ; под общей редакцией А.Р. Маслова. — Москва : Изд-во ИТО, 2005. — 248 с.
7. *Боровский, Г.В.* Справочник инструментальщика / Г.В. Боровский, С.Н. Григорьев, А.Р. Маслов ; под общей редакцией А.Р. Маслова. — 2-е изд., испр. — Москва : Машиностроение, 2007. — 464 с.
8. Диагностика и надежность автоматизированных систем : учебник / Б.М. Бржовский, А.А. Игнатъев, В.В. Мартынов [и др.]. — Старый Оскол : ООО «ТНТ», 2006. — 380 с.
9. Направленное формирование свойств изделий машиностроения / А.С. Васильев, А.М. Дальский, Ю.Н. Золотаревский, А.И. Кондаков ; под редакцией А.И. Кондакова. — Москва : Машиностроение, 2005. — 352 с.
10. *Верещака, А.С.* Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А.С. Верещака. — Москва : Машиностроение, 1993. — 336 с.
11. *Геллер, Ю.А.* Инструментальные стали / Ю.А. Геллер. — 5-е изд. — Москва : Металлургия, 1983. — 527 с.
12. *Генкин, М.Д.* Виброакустическая диагностика машин и механизмов / М.Д. Генкин, А.Г. Соколова. — Москва : Машиностроение. 1987. — 288 с.
13. *Грановский, Г.И.* Резание металлов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. — Москва : Высшая школа, 1985. — 304 с.
14. *Григорьев, С.Н.* Инструментальная оснастка станков с ЧПУ: справочник / С.Н. Григорьев, М.В. Кохомский, А.Р. Маслов ; под общей редакцией А.Р. Маслова. Москва : Машиностроение, 2006. — 544 с.

15. *Григорьев, С.Н.* Нанесение покрытий и поверхностная модификация инструмента : учебное пособие / С.Н. Григорьев, М.А. Волосова. — Москва : ИЦ МГТУ «Станкин» : Янус-К, 2007. — 342 с.
16. *Григорьев, С.Н.* Технологии вакуумно-плазменной обработки инструмента и деталей машин : учебник / С.Н. Григорьев, Н.А. Воронин. — Москва : ИЦ МГТУ «Станкин» : Янус-К, 2005. — 508 с.
17. *Городецкий, М.С.* Контроль и диагностика в гибких производственных модулях и системах / М.С. Городецкий // Итоги науки и техники. — Т. 8. — Москва : ВИНТИ, 1989. — С. 1–84.
18. Гибкое автоматическое производство / В.О. Азбель, В.А. Егоров, А.Ю. Звоницкий [и др.]. — Ленинград : Машиностроение, 1985. — 454 с.
19. *Гуляев, А.П.* Инструментальные стали : справочник / А.П. Гуляев, К.А. Малинкина, С.М. Саверина. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Машиностроение, 1975. — 272 с.
20. *Дворянкин, А.М.* Методы синтеза технических решений / А.М. Дворянкин, А.И. Половинкин, А.Н. Соболев. — Москва : Наука, 1977. — 103 с.
21. *Диллон, Б.* Инженерные методы обеспечения надежности систем / Б. Диллон, Ч. Сингх. — Москва : Мир, 1984. — 318 с.
22. *Ивченко, В.Д.* Диагностика технических систем : учебное пособие / В.Д. Ивченко, Н.К. Ивченко. — Москва : Изд-во Московской государственной академии приборостроения и информатики, 1998. — 240 с.
23. *Иванов, В.В.* Режущие свойства зарубежных твердых сплавов при чистовом точении / В.В. Иванов, Е.В. Павлова, Е.В. Сорокин // Известия ТулГУ. — Тула, 2004. — С. 165–169.
24. Инструментальные системы автоматизированного производства : учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / Р.И. Гжиров, В.А. Гречишников, В.Г. Логашев [и др.]. — Санкт-Петербург : Политехника, 1993. — 399 с.
25. Инструментальное обеспечение автоматизированного производства: учебник для машиностроительных специальностей вузов / В.А. Гречишников, А.Р. Маслов, Ю.М. Соломенцев [и др.] ; под редакцией Ю.М. Соломенцева. — Москва : Высшая школа, 2001. — 271 с.
26. Инструмент для станков с ЧПУ, многоцелевых станков и ГПС / И.Л. Фадюшин, Я.А. Музыкант, А.И. Мещеряков, А.Р. Маслов. — Москва : Машиностроение, 1990. — 272 с.



27. Режущие инструменты, оснащенные сверхтвердыми и керамическими материалами, и их применение : справочник / В.П. Жедь, Г.В. Боровский, А.Я. Музыкант, Г.М. Ишполитов. — Москва : Машиностроение, 1987. — 320 с.
28. *Кожевников, Д.В.* Резание материалов : учебник для студентов высших учебных заведений / Д.В. Кожевников, С.В. Кирсанов ; под общей редакцией С.В. Кирсанова. — Москва : Машиностроение, 2007. — 304 с.
29. Режущий инструмент / Д.В. Кожевников, В.А. Гречишников, С.В. Кирсанов [и др.] : под редакцией С.В. Кирсанова. — Москва : Машиностроение, 2005. — 527 с.
30. *Юркевич, В.В.* Контроль и диагностика технологического оборудования / В.В. Юркевич, А.Г. Схиртладзе, И.А. Коротков. — Подольск : Сатурн-С, 2006. — 448 с.
31. *Кремнев, Л.С.* Изменение структуры и свойств режущей части инструментов и быстрорежущих сталей в процессе непрерывного резания / Л.С. Кремнев, В.А. Синопальников // Вестник машиностроения. — 1974. — № 5. — С. 63–67.
32. *Кузнецов, Ю.И.* Оснастка для станков с ЧПУ / Ю.И. Кузнецов, А.Р. Маслов, А.Н. Байков. — Москва : Машиностроение, 1990. — 560 с.
33. *Ларичев, О.И.* Наука и искусство принятия решений / О.И. Ларичев. — Москва : Наука, 1979. — 220 с.
34. *Маслов, А.Р.* Основные тенденции развития конструкций крепления инструмента на многоцелевых станках / А.Р. Маслов. — Москва : ВНИИТЭМР, 1990. — 40 с.
35. *Маслов, А.Р.* Приспособления для металлообрабатывающего инструмента : справочник / А.Р. Маслов. — Москва : Машиностроение, 1996. — 240 с.
36. *Маслов, А.Р.* Инструментальные системы машиностроительных производств : учебник / А.Р. Маслов. — Москва : Машиностроение, 2006. — 336 с.
37. *Мездрогин, В.Б.* Резцы-динамометры для токарных и карусельных станков / В.Б. Мездрогин // Станки и инструмент. — 1985. — № 3. — С. 29–30.
38. *Моисеев, В.Ф.* Инструментальные материалы / В.Ф. Моисеев, С.Н. Григорьев. — Москва : ИЦ МГТУ «Станкин» : Янус-К, 2004. — 248 с.
39. *Моисеев, Н.Н.* Математические задачи системного анализа / Н.Н. Моисеев. — Москва : Наука, 1981. — 488 с.
40. Обработка металлов резанием: справочник технолога / А.А. Панов, В.В. Аникин, Н.Г. Бойм [и др.] ; под общей редакцией А.А. Панова. — Москва : Машиностроение, 2004. — 784 с.

41. Общемашиностроительные нормативы режимов резания : справочник в 2 т. Т. 1 / А.Д. Локтев, И.Ф. Гущин, В.А. Батуев [и др.]. — Москва : Машиностроение, 1991. — 640 с.
42. Общемашиностроительные нормативы режимов резания : справочник в 2 т. Т. 2 / А.Д. Локтев, И.Ф. Гущин, В.А. Батуев [и др.]. — Москва : Машиностроение, 1991. — 304 с.
43. Надежность режущего инструмента : материалы III Всесоюзного научно-технического семинара. — Донецк : ДПИ, 1984. — 159 с.
44. *Нахапетян, Е.Г.* Диагностирование оборудования гибкого автоматизированного производства / Е.Г. Нахапетян. — Москва : Наука, 1985. — 225 с.
45. *Остафьев, В.А.* Роль оптимизации процессов резания в автоматизированном производстве / В.А. Остафьев // Оптимизация процессов резания жаро- и особопрочных материалов. — Уфа, 1984. — С. 11–12.
46. Оперативная диагностика состояния оборудования, инструмента и рабочего процесса в станках с помощью встроенных средств : сборник трудов / под редакцией Л.С. Городецкого. — Москва : ЭНИМС, 1989. — 144 с.
47. *Палей, С.М.* Контроль состояния режущего инструмента на станках с ЧПУ / С.М. Палей, С.В. Васильев. — Москва : НИИМАШ, 1983. — 52 с.
48. *Палей, С.М.* Контроль состояния режущего инструмента по силе резания / С.М. Палей, Д.Н. Решетов, А.В. Антонов // Станки и инструмент. — 1992. — № 2. — С. 31–33.
49. Обработка металлов резанием: справочник технолога / А.А. Панов, В.В. Аникин, Н.Г. Бойм [и др.] ; под общей редакцией А.А. Панова. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Машиностроение, 2004. — 784 с.
50. *Подураев, В.И.* Активный контроль износа инструмента методом акустической эмиссии / В.И. Подураев, А.А. Барзов, А.В. Кибальченко // Вестник машиностроения. — 1985. — № 4. — С. 14–19.
51. *Подураев, В.Н.* Технологическая диагностика резания методом акустической эмиссии / В.Н. Подураев, А.А. Барзов, В.А. Горелов. — Москва : Машиностроение, 1988. — 56 с.
52. *Волосов, С.С.* Приборы для автоматического контроля в машиностроении : учебное пособие для вузов / С.С. Волосов, Е.И. Педь. — Москва : Изд-во стандартов, 1975. — 336 с.
53. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем : справочник в 3 т. Т. 2. Расчет и конструирование узлов и элементов станков / А.С. Проников, Е.И. Борисов, В.В. Бушуев [и др.] ; под редакцией А.С. Проникова. — Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана : Машиностроение, 1995. — 320 с.

54. *Пуш, А.В.* Испытательно-диагностический комплекс для оценки качества и надежности станков / А.В. Пуш, А.В. Ежов, С.Н. Иванников // Станки и инструмент. — 1987. — № 9. — С. 26–29.
55. Режимы резания металлов : справочник / Ю.В. Барановский, Л.А. Брахман, А.И. Гдалевич [и др.]. — Москва : НИИТавтопром, 1995. — 456 с.
56. Металлообрабатывающий твердосплавный инструмент : справочник / В.С. Самойлов, Э.Ф. Эйхманс, В.А. Фальковский [и др.]. — Москва : Машиностроение, 1988. — 368 с.
57. Металлорежущие инструменты / Г.Н. Сахаров, О.Б. Арбузов, Ю.Л. Боровой [и др.]. — Москва : Машиностроение, 1989. — 328 с.
58. *Савчук, В.П.* Байесовская оценка надежности при линейной функции интенсивности отказов / В.П. Савчук // Надежность и контроль качества. — 1983. — № 11. — С. 19–25.
59. Сборный твердосплавный инструмент / Г.Л. Хаеа, В.М. Гах, А.Д. Локтев [и др.] ; под общей редакцией Г.Л. Хаеа. — Москва : Машиностроение, 1989. — 256 с.
60. *Синопальников, В.А.* Надежность и диагностика технологических систем : учебник / В.А. Синопальников, С.Н. Григорьев. — Москва : Высшая школа, 2005. — 331 с.
61. Справочник конструктора-инструментальщика / Под общей редакцией В.А. Гречишникова и С.В. Кирсанова. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Машиностроение, 2006. — 542 с.
62. Технологическое обеспечение качества продукции в машиностроении (активный контроль) / Под редакцией Г.Д. Бурдуна, С.С. Волосова. — Москва : Машиностроение, 1975. — 279 с.
63. *Хаеа, Л.Г.* Обеспечение качества инструмента в гибком автоматизированном производстве / Л.Г. Хаеа, Т.В. казакова. — Москва : ВНИИТЭМР, 1986. — 40 с.
64. *Хаеа, Л.Г.* Упрочнение твердосплавного режущего инструмента поверхностным деформированием / Л.Г. Хаеа, В.М. Гах, В.И. Левин. — Москва : НИИМАШ, 1981. — 54 с.
65. *Хазаров, А.М.* Методы оптимизации в технической диагностике машин / А.М. Хазаров, С.Ф. Цвид. — Москва : Машиностроение, 1983. — 132 с.
66. *Хейзель, У.* Методы контроля инструмента и обрабатываемой детали в гибком автоматизированном производстве / У. Хейзель // Станки и инструмент. — 1985. — № 2. — С. 27–29.

67. Хилл, П. Наука и искусство проектирования. Методы проектирования. Научное обоснование решений / П. Хилл ; перевод с английского. — Москва : Мир, 1973. — 203 с.

68. Хлудов, С.Я. Производственный опыт предприятий Тульской области при использовании СМП зарубежных фирм / С.Я. Хлудов, В.В. Беляев, И.Е. Денисов // Известия ТулГУ. — Вып. 1. — Ч. 2. — Тула, 2004. — С. 139–146.

69. Черпаков, Б.И. Диагностика отказов металлорежущих станков и автоматических линий / Б.И. Черпаков. — Москва : Машиностроение, 1979. — 48 с.

70. Этин, А.О. Исследование надежности инструмента, оснащенного пластинами из современных режущих материалов, при работе на автоматизированном оборудовании / А.О. Этин, А.Л. Вильсон // Надежность режущего инструмента. — Вып. 3. — Донецк : ДПИ, 1984. — С. 73–76.

71. Эстерзон, М.А. Технология обработки на станках с ЧПУ. Теория и расчет / М.А. Эстерзон ; под редакцией Б.И. Черпакова. — Москва : ЭНИМС, 1996. — 82 с.

72. Эстерзон, М.А. Операционная технология обработки корпусных деталей на многоинструментальных станках с ПУ : методические рекомендации / М.А. Эстерзон, С.М. Шрайбман. — Москва : ВНИИТЭМР, 1985. — 71 с.

73. Юзефович, Д.К. Расчет потребности в многолезвийном режущем инструменте по методу Монте-Карло / Д.К. Юзефович, Ю.С. Гусев, С.И. Мурашкин // Надежность режущего инструмента. — Вып. 2. — Киев ; Донецк : Вища школа, 1975. — С. 54–56.

74. Goforth, R.E. In-process tool life evaluation by cutting force ratio analysis. Part 1 / R.E. Goforth, N.A. Kulkarni // Statist. Manuf. Winter Ann. Meet. Amer. Soc. Mech. Eng. — N.Y., 1983. — P. 67–74.

75. Week, M. Werkzeugmaschinen. Fertigungssysteme. Bd.4. Messtechnische Untersuchung und Beurteilung / M. Week. — Dusseldorf : VDJ-Verl, 1992. — 580 S.