

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БАРАНОВИЧСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

А. В. АЛИФАНОВ, Ю. К. КАЛУГИН

ПРОБЛЕМЫ СТАНКОСТРОЕНИЯ

Курс лекций
для студентов инженерных специальностей

Рекомендовано к печати
научно-методическим советом университета

Барановичи
РИО БарГУ
2010

УДК 621.9.06-192:62(042.4)

ББК 34я73

П78

А в т о р ы:

А. В. Алифанов, Ю. К. Калугин

Р е ц е н з е н т ы:

И. Л. Баршай, доктор технических наук, профессор кафедры
«Технология машиностроения» БНТУ;

В. М. Благодарный, доктор технических наук,
профессор кафедры «Технология машиностроения» БарГУ

Алифанов, А. В.

П78 Проблемы станкостроения [Текст] : курс лекций для студентов инженер. специальностей / А. В. Алифанов, Ю. К. Калугин. — Барановичи : РИО БарГУ, 2010. — 231, [5] с. : ил. — 80 экз. — ISBN 978-985-498-364-6.

Рассматриваются вопросы развития научного и производственного потенциала в станкостроительной промышленности, технологичности конструкций изделий, модернизации металлообрабатывающего оборудования, надежности современных станков, их наладки, ремонта и модернизации, а также тенденции развития процессов обработки резанием и некоторые направления развития машиностроительного производства, предполагающие широкое применение автоматизированных производственных систем и станков с ЧПУ, в том числе высокоэффективные методы и средства диагностики.

Рекомендуется для студентов инженерных специальностей.

Табл. 17. Рис. 164.

УДК 621.9.06-192:62(042.4)

ББК 34я73

ISBN 978-985-498-364-6

© Алифанов А. В., Калугин Ю. К., 2010

© БарГУ, 2010

СОДЕРЖАНИЕ

Список условных обозначений	5
Предисловие	7
1 Тенденции развития научного и производственного потенциала в станкостроительной промышленности	9
1.1 Цели и задачи дисциплины «Проблемы станкостроения»	9
1.2 Основные проблемы станкостроения и принципиальные пути их решения	10
1.3 Базовые технологии станкостроения	11
2 Современные тенденции в развитии процессов обработки материалов резанием	13
2.1 Получение лезвийных режущих инструментов, оснащенных сверхтвердыми материалами, методом электронно-лучевой пайки	15
2.1.1 Области применения сверхтвердых материалов в качестве режущих элементов	15
2.1.2 Разработка новых типов резцовых вставок	16
2.1.3 Лезвийная обработка сплава AL25 режущими элементами из ПКА	17
2.1.4 Применение резцов, оснащенных элементами из СТМ, для обработки керамических материалов	21
2.1.5 Алмазные гребенки для правки шлифовальных кругов	21
2.1.6 Промышленное освоение режущего инструмента, оснащенного СТМ	21
2.2 Получение режущих пластинок из оксидно-субоксидной керамики	22
2.2.1 Физико-химические процессы, происходящие при спекании порошковых материалов	22
2.2.2 Особенности спекания оксидной керамики с образованием в них субоксидных включений	29
2.3 Получение режущих элементов деревообрабатывающего инструмента из горячедеформированного белого чугуна	36
2.3.1 Обоснование возможности применения белого чугуна для изготовления деревообрабатывающего инструмента	36
2.3.2 Опытная технология изготовления режущих элементов деревообрабатывающего инструмента методом горячего пластического деформирования	40
2.4 Получение биметаллического концевго режущего инструмента методом горячего пластического деформирования	46
2.4.1 Основные факторы, влияющие на процесс горячего выдавливания концевго инструмента	47
2.4.2 Особенности теплопередачи в системе заготовка—смазка—инструмент при горячем выдавливании	49
2.4.3 Отладка и опробование штампа для горячего выдавливания концевго инструмента	53
2.4.4 Прочность сварного соединения концевго биметаллического инструмента	54
2.4.5 Прочность паянного соединения концевго биметаллического инструмента	56

2.4.6	Разработка экспериментальной технологии получения заготовки концевого биметаллического режущего инструмента горячим выдавливанием . . .	58
2.4.7	Прочность соединения хвостовой и режущей частей инструмента . . .	64
2.4.8	Корректировка технологического процесса	65
2.4.9	Температурно-силовые режимы горячего пластического формообразования биметаллических метчиков	66
2.5	Износостойкие покрытия в инструментальном производстве	69
2.5.1	Покрытие нитрид титана TiN (титан, азот)	71
2.5.2	Покрытие карбонитрид титана TiCN	73
2.5.3	Покрытие (Ti, Al)N	73
2.5.4	Покрытие (Ti, Cr)N	75
2.5.5	Покрытие (Ti, Mo)SN	76
3	Технологичность конструкции изделий	76
3.1	Качественная оценка ТКИ	78
3.2	Количественная оценка ТКИ	79
3.3	Основные показатели ТКИ	80
3.4	Дополнительные показатели ТКИ	81
4	Современные достижения в области металлообработки	84
4.1	Автоматизированные производства и средства автоматизации	84
4.2	Автоматические многошпиндельные и многопозиционные станки	86
4.3	Комбинированные станки	90
5	Модернизация механообрабатывающего оборудования	91
5.1	Состояние вопроса	91
5.2	Практика модернизации	95
5.3	Направление современной модернизации	99
5.4	Реконфигурируемые производственные системы	102
6	Надежность современных станков	110
6.1	Повышение технического уровня	111
6.2	Упрощение конструкции механизмов станка	113
6.3	Совершенствование силовой схемы	115
6.4	Обеспечение помехоустойчивости	116
6.5	Замена силового замыкания геометрическим	118
6.6	Фиксация детали	121
6.7	Примеры улучшения технологичности монтажа подшипников качения	123
6.8	Вопросы триботехники	124
7	Мониторинг шпиндельных узлов прецизионных токарных станков	125
8	Наладка станков	131
8.1	Контрольно-измерительные инструменты	131
8.2	Нормы точности станков и их проверка	139
8.3	Общие сведения о наладке и настройке станков	144
8.4	Методы настройки станков	147

9 Причины отказов деталей станков	151
9.1 Влияние поверхностного слоя на эксплуатационные свойства деталей	151
9.2 Износ деталей	154
9.3 Повреждения деталей	158
10 Равнопрочность машин	160
10.1 Основные понятия и задачи	160
10.2 Оценка равнопрочности	166
11 Старение и ремонт машин	174
11.1 Старение элементов машин	174
11.2 Предельные состояния машин и их элементов	180
11.3 Ремонтпригодность и ремонт машин	187
12 Диагностика металлорежущих станков с ЧПУ	193
12.1 Задачи и принцип действия системы диагностики	193
12.2 Диагностика основных узлов и элементов станка	197
12.3 Предотвращение аварийных ситуаций	199
13 Диагностика режущих инструментов и процесса обработки	199
13.1 Задачи системы диагностики	199
13.2 Прямые методы диагностики	202
13.3 Косвенные методы диагностики	209
13.4 Измерения в рабочей зоне станка	226
13.5 Измерения вне станка	227
Список использованных источников	229

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

a	—	радиус поры [3—6]
S	—	поверхностное натяжение [3—6]
t_o	—	время полного закрытия поры [3—6]
P_o	—	давление газа в порах в начальный момент времени
K	—	коэффициент относительного сокращения пор [7]
P	—	усилие штамповки [31]
\bar{p}	—	относительное удельное усилие выдавливания [31]
\bar{r}	—	относительный радиус пуансона
η	—	коэффициент вязкости [3—6]
δ	—	постоянная решетки [3—6]
μ	—	коэффициент трения пары «деформируемая заготовка-инструмент»
Δh	—	абсолютное обжатие заготовки [31]
τ_k	—	контактное касательное напряжение
$\alpha_A,$ α_B	—	поверхностные энергии спекаемых компонентов А и В соответственно [6]
α_{AB}	—	поверхностная энергия образовавшейся межфазной границы [6]
a_0	—	радиус поры, стремящейся к нулю [3—6]
$a_1, a_2,$ a_3	—	постоянные, зависящие от геометрических размеров, условий трения и стадии процесса выдавливания [31]
a_{min}	—	минимальный радиус полости [3—6]
V	—	суммарное число разборок одноименных агрегатов (узлов) за данный интервал наработки
$D_k, d_c,$ d_p	—	плотность компактного материала, спеченного образца и отпрессованного образца соответственно [6]
D_c	—	коэффициент самодиффузии [3—6]
F_0	—	площадь поперечного сечения заготовки до прокатки [31]
F_z	—	площадь поперечного сечения заготовки
$F_{п. пр}$	—	площадь поперечного сечения заготовки после прокатки [31]
$F_{пр}$	—	площадь поперечного сечения прошиваемого металла
h_0	—	высота заготовки до прокатки
h_d	—	глубина распространения очага пластической деформации
$h_z, h_{пр}$	—	высота заготовки после прокатки
K	—	постоянная Больцмана [3—6]
$K_{исп}$	—	коэффициент использования материалов
$K_o, k_{п}$	—	коэффициент обработки поверхностей
$k_{п}$	—	относительная высота калибрующего пояска пуансона
$K_{ст}$	—	коэффициент применимости стандартизированных инструментов для обработки поверхностей
$K_{техн}$	—	уровень (коэффициент) технологичности конструкции по использованию материала
$K_{тип.}$ π	—	коэффициент применимости типовых технологических процессов

Ку, э	—	коэффициент унификации конструктивных элементов
Кш	—	коэффициент шероховатости поверхностей детали
Лв, т	—	линейный параметр, изменяющийся в процессе вязкого течения [4—6]
Лз	—	длина заготовки
N	—	число одноименных агрегатов (узлов) в выборке
рзакр.	—	удельное усилие закрытой прошивки
пр	—	удельное усилие осадки заготовки
рос, з	—	радиус прокатных валков
г в	—	радиус пуансона
г1	—	радиус матрицы
гм	—	объем пор в спеченном и отпрессованном образцах соответственно [7]
Vс, Vп	—	среднее число разборок основных агрегатов (узлов) за данный интервал наработок
W	—	температуропроводность смазки
α	—	предел текучести
σs	—	величина вытяжки [31]
h _в	—	коэффициент, характеризующий процесс вязкого течения [4—6]
k _{в, т}	—	уровень (коэффициент) технологичности по себестоимости изготовления детали
Кс. и	—	уровень (коэффициент) технологичности по трудоемкости изготовления детали
Кт. и	—	коэффициент точности обработки детали
Кточн	—	технологическая себестоимость детали
СТ	—	абсолютная температура
T	—	исходная температура заготовки перед выдавливанием в штампе
T0	—	исходная температура слоя смазки, разделяющего заготовку и штамповый инструмент
Tс	—	исходная температура контейнера штампа
Tк	—	

ПРЕДИСЛОВИЕ

Станкостроение является фундаментом таких машиностроительных отраслей, как автомобиль-, трактор-, сельхозмашиностроение, мото- и велопроизводства, а также подшипниковой промышленности, различных ремонтных предприятий и т. д. Сложные автоматизированные станки и линии применяются в пищевой промышленности, фармакологии для развески и упаковки товаров.

Отечественная станкостроительная отрасль переживает в настоящее время трудные времена. Около 80% всего используемого станочного оборудования имеет «возраст» от 15 до 30 лет и старше. В то же время ведущие зарубежные машиностроительные фирмы ставят задачу каждые пять лет менять основной станочный парк. Поэтому и белорусские крупные предприятия стараются приобретать зарубежное оборудование, которое отличается от отечественного большей производительностью и точностью. Посещая ежегодные международные выставки «Металлообработка», можно убедиться, что практически все станочное оборудование, произведенное в технически развитых зарубежных странах, оснащено системами числового программного управления (ЧПУ). Много нового можно увидеть и в инструментальном производстве: как в конструкциях инструментов и в применяемых материалах.

Исходя из вышеприведенного краткого анализа вытекают как стратегические проблемы современного отечественного станкостроения (включая и производство инструментов), так и задачи, которые необходимо решать в ближайшие годы, с целью достижения мирового уровня выпускаемой нашей промышленностью продукции.

В данном учебном издании рассматриваются вопросы развития научного и производственного потенциала в станкостроительной промышленности, технологичности конструкций изделий, модернизации металлообрабатывающего оборудования, надежности современных станков, их наладки, ремонта и модернизации, а также тенденции развития процессов обработки резанием и некоторые направления развития машиностроительного производства, предполагающие широкое применение автоматизированных производственных систем и станков с ЧПУ, в том числе высокоэффективные методы и средства диагностики.

В учебном издании приводятся результаты новых прогрессивных разработок в области создания и обработки материалов с особыми свойствами, проводимых в Физико-техническом институте Национальной академии наук Беларуси, а также в других крупных научных центрах нашей страны.

Авторы выражают глубокую благодарность старшему преподавателю кафедры «Металлообрабатывающие станки и инструменты» Белорусского национального государственного университета Марковой Елене Александровне за большую помощь в подборе материалов.

Раздел «Получение биметаллического концевое режущего инструмента методом горячего пластического деформирования» написан А. В. Алифановым совместно с научным сотрудником Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси А. М. Милюковой.

1 ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ НАУЧНОГО И ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПОТЕНЦИАЛА В СТАНКОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

1.1 Цели и задачи дисциплины «Проблемы станкостроения»

Цели преподавания дисциплины: изучение основных тенденций инновационного развития в станкоинструментальной промышленности; ознакомление с современными достижениями науки и техники в области повышения точности, надежности, производительности станков, увеличения стойкости и функциональных возможностей режущих инструментов за счет применения сверхтвердых материалов и упрочняющих покрытий, с основными направлениями автоматизации производства, модернизации оборудования, современными средствами диагностики станков и инструментов.

При изучении дисциплины решаются следующие *задачи*:

- ознакомиться с наиболее перспективными методами обработки материалов, позволяющими ускорить развитие технологических процессов;
- изучить возможные причины некачественной и неэффективной работы оборудования;
- научить студентов анализировать структуру машиностроительного производства с целью принятия решений о необходимости внедрения новейших достижений в области технологии, техники, инструментов, материалов.

Дисциплина «Проблемы станкостроения» органично связана с такими специальностями, как «Технология машиностроения», «Автоматизация производственных процессов», «Надежность и диагностика технологических систем», «Диагностика станков и инструментов».

К началу изучения данного курса студенты должны освоить основы автоматизации в машиностроении, знать принципы работы различных станочных механизмов, приспособлений, электрических устройств, уметь анализировать экономические показатели производства и основы ресурсосберегающих технологий.

Изучение дисциплины «Проблемы станкостроения» необходимо студентам для приобретения знаний и умений в решении актуальных вопросов и проблем в области машиностроения.

1.2 Основные проблемы станкостроения и принципиальные пути их решения

Уровень развития машиностроения определяет степень развития производственных сил страны и уровень ресурсных затрат при производстве внутреннего валового продукта (ВВП).

Одна из главных проблем машиностроительного комплекса: старение активной части основных фондов — технологического оборудования. Около 80% оборудования находится в эксплуатации 15—30 и более лет, а современное оборудование составляет менее 5% (срок эксплуатации не более пяти лет). Коэффициент обновления технологического оборудования относительно низкий и в финансовом выражении составляет не более 1% в год от ВВП.

Станкостроительная промышленность — это фондообразующая отрасль, обеспечивающая технологическим оборудованием все стратегические отрасли машиностроительного комплекса. С начала 90-х годов прошлого века предприятия станкостроительной промышленности работают в условиях снижения платежеспособности. Особенно значительно сократились заказы на высокопроизводительное, наукоемкое, точное, автоматизированное оборудование и прогрессивные виды инструмента. Такое состояние производства и потребления металлообрабатывающего оборудования является критическим и не может способствовать развитию промышленного производства в целом.

Следовательно, для обеспечения развития промышленного производства и машиностроения в целом необходимо коренное обновление парка металлообрабатывающего оборудования (МОО) на базе реанимирования и развития станкостроительной отрасли. При этом она должна развиваться более быстрыми темпами, чем машиностроение.

Старение и исчерпание ресурса технологического оборудования является для Беларуси (и не только) одной из наиболее трудно разрешимых проблем, имеющих стратегическое значение. Изучение опыта отечественного производства и других стран позволяет выделить девять уровней построения промышленных иерархических систем: 1) организационный; 2) управляющий; 3) информационный; 4) научный; 5) кадровый; 6) технологический; 7) и 8) обеспечение техногенной и экологической безопасности; 9) решение социальных вопросов.

Решение задач 1-го, 2-го и 9-го уровней зависит от опыта и воли руководства предприятий, а также от технических и экономических возможностей государства. Остальные уровни (с 3-го по 8-й) определяются технической политикой государства и подготовленностью научного и технического персонала. В настоящее время обновление технологического оборудования на предприятиях машиностроительного профиля Беларуси требует огромных средств и зависит в большой степени от развития станкостроения, которое за последние годы понесло значительные потери. Поэтому стратегической целью сейчас является возрождение станкостроения, которое должно обеспечить (при необходимой поддержке государства) постепенное обновление парка технологических машин, повышение их технического уровня, а также надежности и безопасности производства. Причем должны быть учтены особенности современных рыночных отношений и обеспечена частая смена моделей выпускаемых машин, характерная для промышленно развитых стран.

Инновационный процесс в машиностроении предусматривает внедрение новых или усовершенствованных технологических решений, а также разработки с последующим внедрением в ряде областей, к которым относятся:

- 1) базовые технологии станкостроения;
- 2) информационные технологии;
- 3) станки с параллельной кинематикой;
- 4) мехатронные компоненты (механика + электроника);
- 5) новые материалы;
- 6) средства энергосбережения;
- 7) мероприятия по защите окружающей среды и по технике безопасности.

Рассмотрим более подробно вопрос о базовых технологиях.

1.3 Базовые технологии станкостроения

Высокоскоростная обработка резанием предусматривает:

- использование современных высокопрочных и износостойких инструментов;
- применение «сухого» резания (без использования смазочно-охлаждающих жидкостей — «СОЖ»);

– использование высокоскоростных моторшпинделей в сочетании с современными устройствами и агрегатами (бесступенчатое регулирование скорости вращения моторшпинделя позволяет плавно менять скорость в процессе резания деталей сложного профиля);

– синхронизацию скорости вращения шпинделя токарного станка с возвратно-поступательным движением резца с целью получения сложнопрофильных элементов на изделии: шестигранника, квадрата, кулачка, овала и т. д.

Лучевые методы обработки материалов включают:

– особенности и преимущества лазерной обработки: лазерное поверхностное легирование; поверхностную закалку; пайку и сварку деталей;

– особенности и преимущества электронно-лучевой обработки: получение высокочистых тугоплавких материалов методом электронно-лучевого переплава; электронно-лучевая закалка, наплавка и термическую обработку: получение неразъемных соединений «керамика-металл» электронно-лучевой пайкой.

К электрофизическим методам обработки материалов относятся:

– электроэрозионная обработка металлов: получение сложнопрофильных изделий; электроискровое легирование; электроэрозионное шлифование;

– упрочнение деталей машин наплавкой в электромагнитном поле;

– шлифование высокотвердых покрытий с использованием электромагнитного поля;

– электромагнитное полирование металлических изделий сложной или протяженной формы;

– магнито-импульсное объемное упрочнение металлических изделий;

– магний-тоимпульсное формообразование листовых металлических изделий.

Электрохимическая обработка предусматривает:

– размерную электрохимическую обработку;

– электрохимическое шлифование;

– снятие заусенцев.

Ультразвуковая обработка включает:

– сверление отверстий, гравировку;

– ультразвуковую сварку.

Уровень современного машино- и станкостроения во многом определяется широтой применения вышеуказанных технологий обработки материалов.

2 СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ РЕЗАНИЕМ

В настоящее время все больше деталей машин изготавливают из труднообрабатываемых сталей и сплавов, керамики, композитов и других новых конструкционных материалов. Многие детали имеют очень сложную форму, минимальные припуски на обработку, высокие требования к качеству обрабатываемых поверхностей. Для обеспечения рациональных условий обработки деталей необходим комплексный подход, объединяющий знания о процессах обработки материалов резанием, свойствах материалов, оборудовании и т. д. Баланс между всеми факторами, влияющими на процесс, определяет выбор технологии обработки, а значит ее стоимость, качество, экологию и т. д. (рис. 2.1).

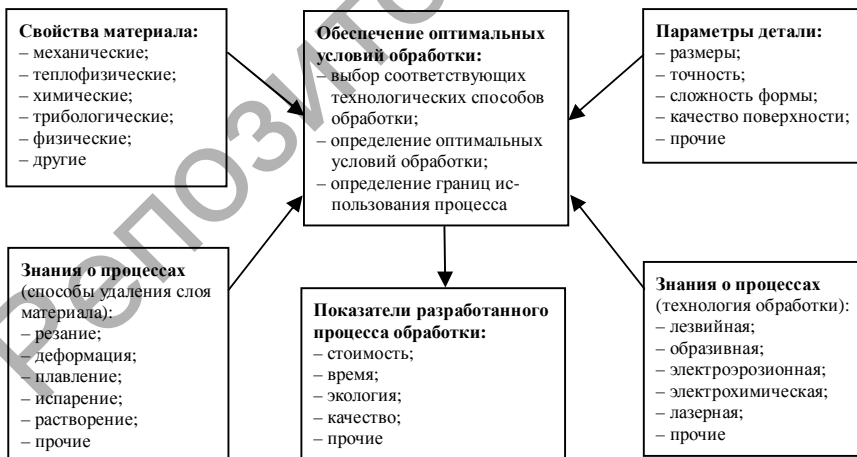


Рисунок 2.1 — Факторы, определяющие выбор технологии обработки детали

Необходимость совершенствования различных технологических процессов обработки резанием обусловлено следующими факторами:

1) возрастание требований к точности обработки и качеству обработанной поверхности. Использование новых технологий обработки поверхности инструмента обеспечивает идеальную острую режущих кромок, в первую очередь алмазных инструментов, что позволяет заменить полирование и притирку на резание. Такая обработка получила название сверхточной (прецизионной) и относится к нанотехнологиям;

2) повышение скорости резания до максимально допустимого уровня с точки зрения безопасности работы станка;

3) ограничение использования СОЖ. Затраты на использование и последующую утилизацию СОЖ в современном производстве в несколько раз превышают затраты на режущий инструмент. СОЖ отрицательно влияет на человека и окружающую среду;

4) использование лезвийной обработки высокотвердых или закаленных материалов вместо шлифования.

Последний способ обработки существенно улучшает экологический аспект производства. Например, при лезвийной обработке 5 000 шт. шестерен образуется 50 кг стружки, которую в чистом и сухом виде легко подвергнуть переработке. Однако при шлифовании такой партии деталей необходимо иметь около 8 т СОЖ, а в дальнейшем обеспечить утилизацию 20 л шлама, что требует весьма значительных затрат.

Вышеперечисленные технологии находят все более широкое применение благодаря использованию сменных пластин из сверхтвердых материалов и режущей керамики. Современные пластины из сверхтвердых материалов и керамики имеют размеры, полностью соответствующие размерам пластин из твердых сплавов, и поэтому не требуют специальных оправок и способов крепления.

Анализ возможностей использования того или иного технологического способа для обработки конкретной детали основывается в первую очередь на оценке обрабатываемости ее материала с учетом требований по обеспечению точности, качества обработки, стоимости и т. д. Известно, что для каждого способа обработки существуют границы, за которыми его использование нецелесообразно.

Расширить эти границы можно изменяя:

– свойства обрабатываемого материала в зоне реализации процесса обработки (поверхностно-пластическое деформирование);

- характер физико-химических процессов в зоне обработки (современные электрофизические и электрохимические способы обработки);
- изменяя прочностные и износостойкие характеристики режущих элементов.

2.1 Получение лезвийных режущих инструментов, оснащенных сверхтвердыми материалами, методом электронно-лучевой пайки

2.1.1 Области применения сверхтвердых материалов в качестве режущих элементов

Современное производство испытывают возрастающие потребности в материалах, обладающих высокой твердостью и прочностью. Однако, обработка таких материалов, например, резанием, связана с большими трудностями и требует применения еще более твердых и прочных материалов с высокой износостойкостью. В последнее время все большим спросом пользуются такие сверхтвердые материалы (СТМ), как поликристаллический алмаз (ПКА) и кубический нитрид бора (КНБ). Однако, широкого применения в производстве они не получили из-за невозможности получения качественного паяного соединения со стальной или твердосплавной основой традиционными методами пайки.

В Физико-техническом институте Национальной академии наук Беларуси (ФТИ НАН Беларуси) проводились теоретические и экспериментальные работы по решению вопросов получения надежных соединений элементов СТМ с основой из стали или твердого сплава методом электронно-лучевой пайки [1].

Анализ работоспособности элементов из ПКА и КНБ при обработке резанием различных материалов позволил сделать следующие выводы.

Инструмент с элементами из ПКА не пригоден для обработки сплавов Fe, Ni, Co и некоторых других материалов. Целесообразнее его применять на чистовых и отделочных операциях при резании сплавов цветных металлов, особенно Al и Cu (в том числе содержащих твердые и абразивные частицы), а также различных композиционных материалов. При этом нежелательно использование инструмента при резании прерывистых поверхностей, когда возникают ударные нагрузки.

Применение инструмента с элементами из КНБ наиболее целесообразно для обработки закаленных до высокой твердости сталей, чугунов, твердых сплавов, а также материалов, подвергнутых различным методам упрочнения, например, наплавленных поверхностей. Таким инструментом можно обрабатывать детали с твердостью до 60...70 НРС.

По сравнению с обработкой твердосплавными пластинами применение инструмента, оснащенного КНБ и ПКА, характеризуется снижением сил резания и возникающих при этом температур, возрастанием износостойкости, не требуется применения СОЖ. Обеспечивается повышение производительности обработки деталей благодаря повышенной скорости резания и значительному сокращению времени на переналадку оборудования. Обеспечение высокого качества поверхности изделий позволяет устранить экологически неблагоприятную технологию шлифовки.

2.1.2 Разработка новых типов резцовых вставок

Традиционно применяемые конструкции резцов, в которых элемент СТМ установлен в державке с механической фиксацией либо путем заливки расплавленным материалом, не обеспечивают высокой прочности их соединения. Благодаря проведенным исследованиям разработаны конструкции и изготавливаются резцовые вставки (проходные, расточные, канавочные и др., рис. 2.2, а), в которых выполнен открытый вырез с размерами, соответствующими размерам режущего элемента СТМ, а последний соединен с державкой пайкой адгезионно активным припоем [2]. Резцовые вставки с припаянными элементами выдерживают гораздо более высокие механические нагрузки, чем резцы с механическим креплением.

При необходимости проведения черновых операций точения и фрезерования заготовок деталей, имеющих неоднородный характер поверхности (отливок из чугуна, спеченных керамик и др.), режущий элемент подвержен чрезвычайно высоким механическим нагрузкам. Для этих целей разработана гамма конструкций резцовых вставок с повышенными жесткостью и надежностью удержания элемента СТМ в державке в закрытом пазу (рис. 2.2, б). Державка изготовлена из стали либо из твердого сплава. В теле заготовки державки выполнен паз по форме элемента из СТМ. В резцовой вставке элемент СТМ

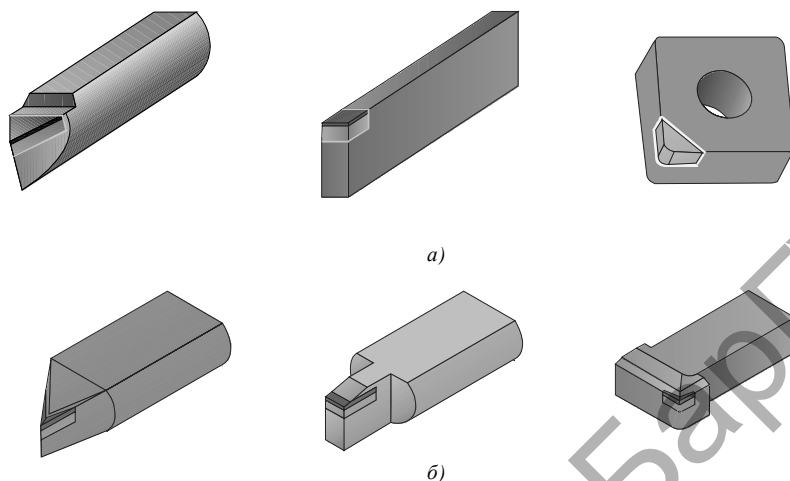


Рисунок 2.2 — Некоторые типы изготавливаемых режущих инструментов с закреплением СТМ в открытом (а) и в закрытом пазу (б)

соединен с державкой, как минимум, по двум-трем плоскостям. С применением такого инструмента можно проводить с одной установки резцовый вставки весь цикл механической обработки заготовки, начиная от черновой до получения детали с требуемым качеством поверхности (до шероховатости 1,25...0,44 мкм).

Предварительное испытание вставок, оснащенных ПКА и КНБ, проведено в ФТИ НАН Беларуси и на предприятии «Лават» (г. Могилев) на универсальных токарных станках. Опытное опробование вставок было проведено на различных предприятиях Беларуси и России, где в настоящее время эти резцовые вставки применяются в промышленных масштабах.

2.1.3 Лезвийная обработка сплава АЛ25 режущими элементами из ПКА

Известно, что сплавы Al-Si обладают высокой абразивной способностью и при их резании происходит интенсивный износ инструмента. На моторостроительных предприятиях СНГ, в том числе на УП «Минский моторный завод», основным типом используемого

инструмента является твердосплавной. Однако международные требования к экологическим показателям двигателей (соответствие Евро III, IV, V) вызывают необходимость повышения некоторых технических параметров поршней (прочности, твердости, износостойкости). Для обработки таких поршней используется более прогрессивный режущий инструмент, например, ПКА. По заказу УП «ММЗ» в ФТИ НАН Беларуси были изготовлены партии инструментов (расточных и канавочных резцов) с режущими элементами из ПКА «Компакс».

На участке поршня при окончательной обработке пальцевого отверстия в поршне 260-1004021-B (материал — АЛ25, ГОСТ 1583-93, твердость 90 НВ min) проведены испытания резцов с режущей частью из ПКА «Компакс». Обработка проводилась по режимам заменяемых резцов с напайными пластинами из ВК6; при подаче $S = 260$ мм / мин, числе оборотов шпинделя $n = 2\ 600$ об / мин и скорости резания $V = 310$ м / мин.

По результатам испытания размерная стойкость разработанных резцов до переточки в среднем составила 16 000 деталей, разброс показаний диаметра не превышал 0,004 мм, средняя шероховатость обработанной поверхности пальцевого отверстия $R_a = 0,44$ мкм (по чертежу $R_a = 0,63$ мкм). При окончательной обработке пальцевого отверстия размерная стойкость резцов с ПКА «Компакс» более чем в 10 раз выше, чем стойкость резцов с твердосплавными пластинами из ВК6.

2.1.4 Применение резцов, оснащенных элементами из СТМ, для обработки керамических материалов

При изготовлении насосов, предназначенных для перекачивания химически активных и абразивосодержащих сред, используются торцовые уплотнения и подшипники скольжения с элементами из керамики. По сравнению с традиционными материалами пар трения керамика обладает комплексом более высоких характеристик. Но из-за своей высокой твердости она трудно обрабатывается резанием, и изготовление керамических изделий связано с большой трудоемкостью. Шлифование с использованием алмазного абразивного инструмента является основным способом финишной обработки подобных деталей. Доля шлифования в стоимости детали достигает 60%.

Экспериментальные данные показали, что вместо шлифования для окончательного формообразования изделий из керамики может применяться высокопроизводительная лезвийная обработка резцами, оснащенными элементами из ПКА. Проведены проверка возможности применения резцов, оснащенных ПКА, для обработки керамики, а также выбор оптимальных параметров эксплуатации инструмента. Образцы из оксида алюминия Al_2O_3 , силицированных графитов и карбида кремния SiC обрабатывали без применения СОЖ. Образцы керамики в исходном спеченном состоянии имели неоднородную, прерывистую поверхность с высокой шероховатостью и высотой выступов до нескольких миллиметров. В таблице 2.1 приведены основные характеристики керамических материалов.

При изготовлении насосов промышленного назначения используют торцовые уплотнения с элементами из силицированного графита и карбида кремния. В ЗАО «Гидродинамика» (г. Минск) освоено производство герметичных гидродинамических насосов ГДМ с приводом вала насоса через магнитную муфту. Такая конструкция обеспечивает высокую надежность герметичности проточной полости по сравнению с насосами традиционных конструкций. Подшипники скольжения в насосах представляют собой вкладыш и размещенную в нем втулку, обе детали выполнены из SiC (рис. 2.3). Для различных по производительности насосов изготавливаются вкладыши с размерами $L_1 = 45—70$ мм, $D_1 = 450—115$ мм, $d_1 = 36—75$ мм и втулки с $L_2 = 50—74$ мм, $D_2 = 35,9—74,9$ мм и $d_2 = 24—45$ мм.

Т а б л и ц а 2.1 — Свойства керамических материалов

Материал	Оксид алюминия Al_2O_3	Силицированный графит		Карбид кремния SiC
		СГ-Г	СГ-П	
Плотность, г / см ³	3,8	2,5	2,8	3,1
Предел прочности при сжатии, МПа	2 100	300—320	430—450	400—430
Модуль упругости, ГПа	360—400	95	127	413
Твердость, ГПа	16—25	65—78	65—80	25—27
Теплопроводность при 20°С, Вт / (м · К)	29	85	130	87—170
ТКЛР, 10–6 К–1	8,1	4,6	4,2	4,0—4,6

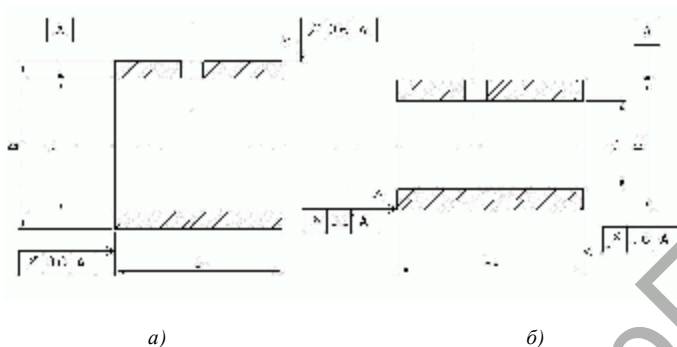


Рисунок 2.3 — Вкладыш (а) и втулка (б) подшипника скольжения насоса ГДМ

Для обработки этих деталей в качестве режущих элементов были использованы ПКА АТП “Comрах” и “Syndite”. Державка инструмента изготавливалась из сталей 40, 45. Использование вставок с элементами ПКА, расположенными в закрытом пазу (см. рис. 2.1, б), для точения вкладыша и втулки подшипника и деталей торцовых уплотнений позволило снизить время обработки деталей в 2—4 раза за счет устранения операции шлифования.

Стойкость инструмента, оснащенного ПКА, на 1-2 порядка выше, а возможная скорость резания в 1,5—2,5 раза больше по сравнению с твердосплавным инструментом.

Для Минского завода автоматических линий в ФТИ НАН Беларуси были изготовлены партии резцов с элементами из КНБ для обработки деталей из закаленных сталей и чугунов. По сравнению с инструментами из твердых сплавов на основе WC и TiC скорость резания этих деталей инструментом, оснащенный КНБ, может быть в 1,5—4,0 раз выше. Например, при обработке закаленной стали твердостью HRC 60—70 могут использоваться скорости до 1...3 м / с, чугуна — до 5...16 м / с. Стойкость инструмента повышается в 10—50 раз по сравнению со стойкостью твердосплавных режущих пластин с покрытиями.

Изделия после лезвийной обработки точением или фрезерованием инструментами, оснащенными КНБ и ПКА, имеют шероховатость поверхности 0,44...1,25 мкм и менее, сравнимую с шероховатостью после шлифовки.

2.1.5 Алмазные гребенки для правки шлифовальных кругов

Для профильной правки шлифовальных кругов методом врезного шлифования в машиностроительном производстве используются алмазные гребенки, состоящие из державки с размещенными в ней алмазами (природными или синтетическими). Такой инструмент устанавливается на торце-, кругло- и бесцентрошлифовальных станках. К гребенкам предъявляются жесткие требования по точности взаимной геометрической ориентации алмазов, их перепад по высоте не должен превышать 0,1 мм. Разработаны конструкции гребенок с повышенной надежностью удержания элементов из алмазосодержащего материала (АМ) в державке, а также высокой точностью их взаимного расположения (рис. 2.4).

Алмазная гребенка включает державку, состоящую из частей 1 и 2. На поверхности одной из частей державки выполнены открытые пазы 3, идентичные по форме элементам 4 из АМ. Части державки 1 и 2 и элементы 4 из АМ в пазах соединены между собой адгезионно активным припоем 5. Требуемые геометрические параметры профиля открытых пазов достигаются механической или электрофизической обработкой, сложность изготовления таких пазов значительно ниже по сравнению с изготовлением закрытых пазов.

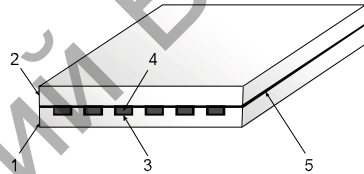


Рисунок 2.4 — Алмазная гребенка

2.1.6 Промышленное освоение режущего инструмента, оснащенного СТМ

Для промышленных предприятий Беларуси изготавливаются партии резцов различного назначения, в том числе для Минского моторного завода — канавочные резцы с элементами из ПКА для получения канавок в поршнях из алюминиевых сплавов и резцы из КНБ для нарезания канавок в нирезистовом сплаве, а также расточные резцы для расточки отверстий с высоким качеством поверхности под пальцы в поршнях. Для ОКБ «Академическое» и ЗАО «Гидродинамика»

изготавливаются резцы с элементами из АТП для обработки точением деталей пар трения насосов. По сравнению с базовой технологией изготовления вкладыша и втулки подшипника скольжения из SiC (путем шлифования алмазным абразивным инструментом) использование изготовленных резцов позволило повысить производительность процесса изготовления деталей и сократить производственные расходы на 50%.

Результаты работы внедрены в ЗАО «Гидродинамика» при изготовлении подшипников герметичных гидродинамических насосов ГДМ.

Для Минского завода автоматических линий изготовлены резцы с элементами из КНБ для обработки деталей из закаленных сталей и чугунов.

2.2 Получение режущих пластинок из оксидно-субоксидной керамики

2.2.1 Физико-химические процессы, происходящие при спекании порошковых материалов

Спекание — сложный процесс, характеризующийся изменением объема смесей порошков и связанный с перераспределением вещества и уменьшением термодинамического потенциала системы. В процессе спекания постоянно уменьшается общая поверхность зерен и увеличивается поверхность их соприкосновения. Это явление сопровождается возрастанием плотности и прочностных характеристик образца.

Основы феноменологического описания процесса спекания были заложены Я. И. Френкелем, который выдвинул идею о вязком течении твердых тел, осуществляющемся с помощью диффузионного механизма [3]. Перемещение атомов в решетке состоит в последовательном замещении ими вакансий. В процессе спекания (по Я. И. Френкелю) имеют место два основных движения:

- 1) вязкое заплывание сферической поры в дискретном теле;
- 2) слияние образующихся капель.

Полагая, что капли имеют сферическую форму и в начальный момент соприкасаются в одной точке, Я. И. Френкель выявил, что

скорость заплывания поры da/a в твердом теле, вызываемая силами поверхностного натяжения σ , определяется следующим выражением [3]:

$$\frac{da}{a} = -\frac{3\sigma}{4\eta}, \quad (2.1)$$

где a — радиус поры;

η — коэффициент вязкости.

Тогда время полного закрытия поры t_0 можно определить из соотношения

$$t_0 = \frac{4}{3}\eta \frac{\alpha_0}{\sigma}. \quad (2.2)$$

Установлено, что большое влияние на кинетику слияния образующихся капель может оказывать выделение поглощенных газов, которые, накапливаясь в порах, препятствуют их заплыванию. Минимальный радиус полости может быть представлен в следующем виде:

$$a_{\min} = \sqrt{\frac{p_0 a^3}{2\sigma}}, \quad (2.3)$$

где p_0 — давление газа в порах в начальный момент времени.

Между вязким течением в твердом теле и процессами самодиффузии Я. И. Френкелем была установлена зависимость:

$$\frac{1}{\eta} = \frac{D_c \delta}{kT}, \quad (2.4)$$

где D_c — коэффициент самодиффузии;

δ — постоянная решетки;

k — постоянная Больцмана;

T — абсолютная температура.

Развивая диффузионную теорию спекания и базируясь на представлении об уменьшении объема пор при спекании за счет диффузии вакансий, обусловленной градиентом концентраций вакансий возле

поры радиусом a и у поверхности (где $a = \infty$), Б. Я. Пинес [4—6] рассматривал усадку как процесс, осуществляющийся за счет потока вакансий от поры к поверхности. Для этого случая:

$$\frac{1}{\eta} = \frac{D_c \delta^3}{kTL_{в.т}}, \quad (2.5)$$

где $L_{в.т}$ — некоторый линейный параметр рассматриваемой задачи, который может изменяться в процессе вязкого течения.

Теория Б. Я. Пинеса по сравнению с теорией Я. И. Френкеля учитывает ряд реальных явлений, которые вносят осложнения в процесс спекания: явления крипа в спекании, отдыха и рекристаллизации, неравномерное зарастание пор, наличие пленок поверхностных окислов [5]. В соответствии с полученными результатами, концентрация вакансий вблизи мелких пор больше, чем в окрестностях крупных. В процессе спекания мелкие поры, окружающие крупную, будут зарастать, а крупные — увеличиваться, что может привести к замедлению спекания. Наличие окислов может оказать различное воздействие: невосстанавливающиеся окислы тормозят спекание, восстанавливающиеся ускоряют его, так как при восстановлении окислов получается неравновесная решетка, активирующая диффузионные процессы.

Спекание Б. Я. Пинес рассматривал как вид диффузионного крипа или особый вид деформации, осуществляющейся под действием сил поверхностного натяжения путем диффузионного перемещения атомов и феноменологически сходной с вязким течением. Основное отличие диффузионного крипа от обычной пластической деформации состоит в том, что он не приводит к изменениям структуры и физико-механических свойств твердого тела. Явление отдыха влияет на кинетику диффузионного крипа через изменение коэффициента самодиффузии, величина которого для данного материала, в известной мере, определяется искажениями кристаллической решетки.

Большое значение имеет выдвинутое Б. Я. Пинесом положение о том, что процесс рекристаллизации протекает значительно быстрее, чем процесс спекания, т. е. спекание осуществляется в рекристаллизованном теле, и не рекристаллизация влияет на отдых и величину коэффициента самодиффузии, а, наоборот, последние определяют

ход рекристаллизации. Введение легкоплавких добавок существенно активизирует процесс спекания.

Интересные выводы сделаны Б. Я. Пинесом [6] о процессе спекания в системах с нерастворимыми компонентами: термодинамическое условие припекания двух нерастворимых частиц определяется следующим неравенством:

$$\alpha_{AB} < \alpha_A + \alpha_B, \quad (2.6)$$

где α_A и α_B — поверхностные энергии спекаемых компонентов A и B ;
 α_{AB} — поверхностная энергия образовавшейся межфазной границы.

Из неравенства (2.6) следует, что поверхностная энергия образовавшейся межфазной границы должна быть меньше, чем сумма поверхностных энергий спекаемых компонентов. В противном случае частицы спекаться не будут. Механизм и кинетика припекания оказываются существенно различными в двух случаях, которые определяются условиями:

$$\alpha_{AB} < |\alpha_A - \alpha_B|, \quad (2.7)$$

$$\alpha_{AB} > |\alpha_A - \alpha_B|, \quad (2.8)$$

не противоречащими условию (2.6).

В случае (2.7) энергетически целесообразно покрытие поверхности вещества с большей поверхностной энергией веществом с меньшей энергией. Кинетически это будет осуществляться таким образом, что частица вещества с большей энергией будет в процессе спекания «обволакиваться» веществом частицы с меньшей энергией.

Когда нижняя граница величины α_{AB} задается условием (2.8), что является более распространенным случаем для практики порошковой металлургии, процесс припекания будет существенно отличаться от описанного выше, представляя собой, процесс взаимного «вдавливания» соединяемых частиц, причем его развитие сопровождается уменьшением свободной поверхностной энергии.

Таким образом, движущей силой процесса спекания является стремление спекаемой системы уменьшить свою суммарную поверхностную энергию.

Рассматривая процесс уплотнения спекаемого тела как сокращение поверхности и объема пор, скорость которого зависит от степени энергетической неоднородности тела, В. А. Ивенсен [7], предложил формулу определения коэффициента относительного сокращения пор K , характеризующего активность порошка к спеканию:

$$K = \frac{V_c}{V_n} = \frac{d_n(d_k - d_c)}{d_c(d_k - d_n)}, \quad (2.9)$$

где V_c , V_n — объем пор в спеченном и отпрессованном образцах соответственно;

d_k , d_c , d_n — плотность компактного материала, спеченного образца и отпрессованного образца соответственно.

Развитие основных положений теории спекания порошковых тел продолжил Я. Е. Гегузин [8—12]. В соответствии с его представлениями в спрессованных брикетах порошка пластичного металла на границе между частицами появляются чистые металлические поверхности, через которые происходит схватывание (приваривание). При нагреве таких порошковых тел сильно деформированные границы частиц и частицы с микроискажениями кристаллической решетки обуславливают интенсификацию диффузионных процессов. В связи с этим усадка является результатом преимущественно нестационарного диффузионного крипа.

В работах [10; 11] рассмотрена взаимосвязь коалесценции и спекания. Отличие между ними состоит в том, что коалесценция осуществляется с уменьшением поверхности, но без изменения объема. Была экспериментально прослежена диффузионная коалесценция пор в поликристаллических телах с сеткой границ. Установлено, что в случае поликристаллов основной вклад в неоднородность вносят межзеренные границы, действующие с порами. Авторы показали, что на ранней стадии обжига пористого тела с сеткой границ происходит взаимодействие границ с порами, оно заключается в том, что этап отрыва границ от пор сменяется этапом перехода части пор на границы, которые со временем стабилизируются. Установлено также, что в областях, богатых порами, процесс коалесценции может не сопровождаться спеканием-уменьшением суммарного объема пор, осуществляющимся с помощью диффузионного механизма.

Коэффициенты самодиффузии Cu и Fe при спекании порошков определены Я. Е. Гегузиным и др. [12]. Их значения оказались на один-два порядка выше равновесных, что было объяснено наличием искажений в решетке частиц порошка. Однако, как показали дальнейшие исследования, энергия остаточных искажений кристаллической решетки, способных влиять на кинетику спекания, после нагрева оказывается очень малой по сравнению с начальной энергией упругих искажений в исходных порошках. Из полученных результатов авторы [12] сделали вывод о том, что для увеличения коэффициента самодиффузии требуется очень малое число искажений (например, 1%). Активное поведение тонких металлических порошков на ранних стадиях спекания связано с наличием в них большого количества неравновесных точечных и линейных дефектов, а также дефектов упаковки.

Неравновесные вакансии не могут оказывать длительного влияния на скорость уплотнения, однако, если имеется постоянно действующий источник избыточных вакансий, процессы уплотнения при спекании активизируются. Как было показано в работе В. В. Скорохода [13], такими источниками в активных порошках могут быть дислокации, обрамляющие дефекты упаковки. Высокая исходная плотность дислокаций в активных металлических порошках, которая по рентгеновским данным составляет 10^{10} — 10^{11} см⁻² [14], также является мощным фактором, интенсифицирующим ранние стадии процесса спекания.

Изучению влияния физических свойств порошков на их усадку в процессе спекания посвящены работы Г. И. Аксенова [15; 16]. Было показано, что процесс спекания протекает в три стадии, в каждой из которых проявляются свои особенности. Движущими силами процесса спекания являются: поверхностная энергия, энергия искажений кристаллической решетки, энергия остаточных напряжений и энергия, связанная с колебаниями атомов. Авторы исследований [16] установили, что на величину и скорость усадки большое влияние оказывает способ получения порошков, определяющий их активность к спеканию. Усадка возрастает с уменьшением размера частиц и насыпного веса порошка, так как это приводит к повышению активности прессовок. Чем активнее порошок, тем большее влияние оказывает давление прессования на активность прессовок к спеканию.

Экспериментальные данные многих исследователей указывают на то, что важнейшим фактором, определяющим спекание, является диффузия, вызванная поверхностными силами.

Чтобы интенсифицировать поверхностный перенос вещества при спекании, необходимо повысить эффективное значение коэффициента поверхностной самодиффузии или давление паров металла. Это можно осуществить или циклической гетерогенной реакцией (окисление-восстановление), либо введением активных газовых реагентов, образующих с металлом летучие вещества (например, галогенидов) [17]. По данным этой работы эффективный поток поверхностной диффузии за счет восстанавливающихся окисных пленок металла может быть увеличен на два-три порядка. С учетом этого явления был предложен способ активирования спекания порошков металла (Al, Mg, Ti, Zr) либо металлических волокон для получения пористых спеченных деталей, включающий создание на поверхности металла окисных пленок и последующее их восстановление или удаление. Порошки металла или волокна смешивали с галогенидами солями Zn, Ag, Hg и нагревали в течение одного-двух ч до 500°C (до температуры плавления этих солей). При этом происходит электрохимическая реакция между расплавами солей и окисными пленками. Избыточные продукты реакции удаляли, а полученную массу подвергали спеканию.

Другой путь повышения активности порошков к спеканию — введение в них соединений, легко разлагающихся при низких температурах. При спекании брикетов из различных смесей порошков серебра было установлено [18], что с ростом давления прессования плотность образцов, спеченных из смеси, была выше, чем из порошка чистого серебра. Оптимальное соотношение количества серебра и карбоната серебра составило 70% и 30%.

Химический метод активации спекания получает в настоящее время все большее развитие. Авторы [19], исследуя влияние адсорбированных паров муравьиной и уксусной кислот на спекание медных порошков, установили, что при содержании паров уксусной кислоты до 0,47% в адсорбированном состоянии на поверхности частиц медного порошка, процесс спекания существенно активизируется.

Исследователи И. М. Федорченко и И. И. Иванова установили [20], что присадки хлоридов Ni, Co, Mn, Fe, Cu активируют процесс уплотнения железных брикетов за счет восстановления хлоридов при спекании.

Проанализировав вышеперечисленные работы [3—20] и принимая во внимание специфику рассматриваемых в дальнейшем вопросов, необходимо особо отметить следующие выводы: для осуществления спекания металлических порошковых материалов необходимо иметь чистые металлические поверхности [7; 8]; движущей силой процесса спекания является стремление спекаемой системы уменьшить свою суммарную поверхностную энергию [6]; процессу спекания способствуют различные активирующие добавки [17—20].

2.2.2 Особенности спекания оксидной керамики с образованием в них субоксидных включений

Общие представления о получении керметов и оксидно-субоксидной керамики. Повышения прочностных характеристик оксидной керамики и расширения области ее применения можно достигнуть за счет увеличения ее вязкости.

Изучение различных видов керамических материалов показало, что для достижения поставленной цели целесообразно использовать не чистые керамики, а металлокерамические материалы, которые представляют собой гетерогенные композиции одной или нескольких керамических фаз с металлами [21]. Керамической фазой здесь могут быть оксиды, карбиды, бориды и нитриды, а металлической — алюминий, железо или тугоплавкие металлы.

Оксид алюминия (Al_2O_3), как один из самых перспективных керамических материалов, стал основой серии керметов. К наиболее перспективным относятся композиции «оксид алюминия — тугоплавкий металл (Mo, W, Nb, Ta)», а также «оксид алюминия — Ni, Co, Fe».

Применительно к оксидной керамике обычно отрицается возможность получения основы из высшего и низших оксидов (субоксидов), например, алюминия, так как его субоксиды или неполные оксиды (AlO и Al_2O) стабильны только при высоких температурах [22—25], приближающихся к температуре плавления $T_{пл}$ высшего оксида (Al_2O_3). При охлаждении, начиная с $0,7...0,8 T_{пл}$, субоксиды превращаются по реакции диспропорционирования в высший оксид с образованием металлической фазы.

Изделия или полуфабрикаты из порошковых материалов чаще всего получают двумя способами: 1) холодным прессованием с последующим

спеканием или 2) горячим прессованием, когда и прессование, и спекание совмещаются в одном процессе. В данной работе применялось горячее прессование.

Далее рассматриваются два метода получения горячим прессованием оксидно-субоксидной керамики при температуре, равной $0,7...0,8 T_{пл}$. Оба метода основаны на применении активирующих добавок в порошки оксидных керамик в процессе их спекания, что соответствует рекомендациям в различных литературных источниках [17—20].

Получение оксидно-субоксидной керамики путем введения в основной оксид одноименного металла. Первый метод получения оксидно-субоксидной керамики заключается во введении в основной оксид одноименного металла в количестве 1...10% (мас.), хорошо смачивающего при плавлении свой оксид и растворяющегося в нем (в твердой фазе) до 5% и более.

В качестве таких композиций можно предложить, например, системы: $Al_2O_3 + Al$; $TiO_2 + Ti$; $ZrO_2 + Zr$; $HfO_2 + Hf$ и др.

В процессе горячего прессования на воздухе (для Al_2O_3) и в восстановительной или нейтральной атмосферах (для TiO_2 ; ZrO_2 ; HfO_2) и при дефиците кислорода на границе фазового раздела «оксид-металл» образуются следующие субоксиды в соответствии с применяемой композицией: AlO и Al_2O ; TiO и Ti_2O_3 ; Zr_3O ; Hf_3O .

Данные субоксиды в процессе быстрого охлаждения от температуры прессования частично распадаются на высший оксид и металлическую пластичную фазу. Часть субоксидов стабилизируется при комнатной температуре в связи с быстрым охлаждением, располагаясь по границам зерен высшего оксида или образуя с ним гетерогенную смесь в зависимости от степени измельчения высшего оксида и количества вводимого металла. Металлическая (пластичная) фаза выделяется в микро- и макропорах и является препятствием (барьером) на пути распространения микротрещин, что хорошо согласуется с теоретическими предпосылками [22—24].

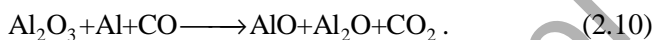
За счет выделения и стабилизации субоксидов повышается прочность керамики, так как низшие оксиды (субоксиды) обладают большей вязкостью, чем высшие [25]. Этот эффект является основополагающим для увеличения вязкости и снижения хрупкости керамики.

В связи с тем, что прессование в данном случае происходит при высокой температуре, все вышеописанные явления протекают при

участии жидкой металлической фазы, резко ускоряющей реакционную диффузию.

Таким образом, после охлаждения от температуры прессования до комнатной, в структуре керамики присутствуют следующие фазы: высший оксид, субоксиды и металлическая фаза.

Например, при горячем прессовании ($t = 1680 \pm 20^\circ\text{C}$) шихты, состоящей из смеси порошков Al_2O_3 и (1...10% мас.) Al , в графитовой пресс-форме, на воздухе, протекает следующая реакция:

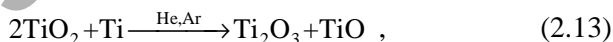


В процессе охлаждения от температуры прессования получается:

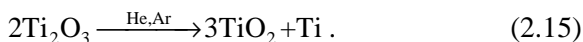
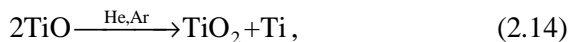


Учитывая, что в нашем случае охлаждение происходит достаточно быстро (за счет принудительного охлаждения контейнера, в котором находится графитовая пресс-форма) и часть субоксидов не вступает в реакцию (2.11) и (2.12) и стабилизируется при комнатной температуре, в полученной после горячего прессования композиции присутствуют следующие фазы: Al_2O_3 , Al_2O , AlO , Al .

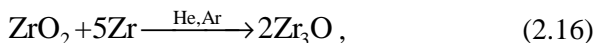
Оксидно-субоксидную керамику можно получить и в других системах, но в нейтральных средах (Ar , He). Например, для системы ($\text{TiO}_2\text{—Ti}$) в условиях горячего прессования имеем:



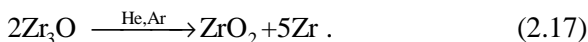
а при охлаждении от температуры прессования до комнатной осуществляются реакции:



То же самое и для системы ($\text{ZrO}_2\text{—Zr}$) — при нагреве:

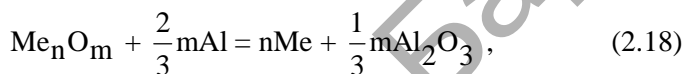


при охлаждении:



Получение оксидно-субоксидной керамики методом введения в основной оксид металла-восстановителя. Вторым направлением получения оксидно-субоксидной керамики является метод введения в порошок высшего оксида порошка металла-восстановителя, который обладает большим сродством к кислороду, чем металл основного оксида, например, алюминия.

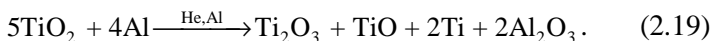
Основным условием самопроизвольного протекания реакции, представленной в общем виде:



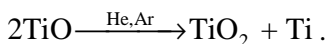
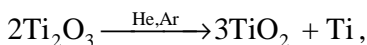
где Me — какой-либо металл, составляющий основу оксида, является более высокая прочность оксида алюминия по сравнению с оксидами восстанавливаемых элементов [24]. По убыванию степени прочности в ряду элементов Zr, Ti, Si, В, Cr, Nb, Mn, V, W, Mo, все оксиды этих элементов восстанавливаются алюминием. Элементы, образующие более прочные соединения в указанном ряду, могут служить восстановителями для менее прочных. В соответствии с принципом последовательности превращений высшие оксиды сначала восстанавливаются до низших, которые затем восстанавливаются до элемента [25].

Введение металла-восстановителя в количестве 1...10% (мас.), значительно меньшем теоретического (20—30%) [24], необходимого для полного восстановления, приводит к неполному восстановлению оксида с образованием субоксидов и небольшого количества металлической (восстанавливаемый металл) фазы.

Так, при горячем прессовании в нейтральной среде шихты из диоксида титана и алюминия в количестве (1...10% мас.), меньшем, чем необходимо для полного восстановления, протекает реакция:



При медленном охлаждении от температуры горячего прессования протекают следующие, уже известные ранее (2.14) и (2.15), реакции:



В процессе быстрого охлаждения часть субоксидов сохраняется. Таким образом, полученная композиция в готовом виде включает следующие компоненты: TiO_2 , Al_2O_3 , Ti_2O_3 , TiO и Ti .

Получение режущих пластин из оксидно-субоксидной керамики на основе оксида алюминия. Из вышесказанного можно сделать вывод о том, что при всех своих достоинствах (твердости, прочности, тепловой стойкости) керамика на основе алюминия, как впрочем и любая другая, имеет один главный недостаток — хрупкость [22; 24], что ограничивает применение этой керамики, например, при изготовлении металлорежущих резцов. Обычно, для устранения или уменьшения хрупкости в оксид алюминия добавляют TiC , иногда до 60% (мас.) [23], или другие оксиды, что приводит к удорожанию получаемой композиции.

Разработка новых способов получения композиций на основе оксидной керамики при одновременном получении и стабилизации в процессе спекания субоксидов (низших оксидов), рассмотренных выше, позволяет увеличить вязкость и снизить хрупкость керамического материала, обеспечивая тем самым и значительное расширение области его использования, например, для изготовления высокопрочных режущих пластин.

С целью дальнейшего исследования механических и эксплуатационных свойств оксидно-субоксидной керамики на основе Al_2O_3 , используемой в качестве режущих пластин, были изготовлены соответствующие пластины квадратной формы размерами $13,5 \times 13,5$ мм и толщиной 5,6 мм. Пластины были получены горячим прессованием. Порошковая смесь «оксид алюминия (95% мас.) и алюминий (5% мас.)», включающая фракции порошков 10...20 мкм, помещалась в графитовую пресс-форму, реализующую схему двухстороннего сжатия.

Процесс горячего прессования проводился при удельном давлении, равном 300...400 МПа, и $t = 1680 \pm 20^\circ\text{C}$ в течение 0,5 ч.

Затем с помощью специального устройства осуществлялось ускоренное охлаждение заготовок до комнатной температуры.

Спеченная оксидно-субоксидная керамика имеет черный цвет. Рентгенофазовый анализ, выполненный на рентгеновском диффрактометре ДРОН-3М, выявил в полученных образцах четыре фазы — Al_2O_3 , Al_2O , AlO и Al (табл. 2.2.).

Высокопрочные режущие пластины из керамики на основе оксида алюминия с различными включениями производит ряд известных зарубежных фирм, например, американо-германская «Кеннаметал-Хертель», шведская «Сандвик», израильская «Искар» и др. В странах-членах СНГ наиболее качественные режущие пластины изготавливает Московский завод твердых сплавов на основе разработок ВНИИТС. Эти пластины, при хорошем качестве, дешевле зарубежных в три и более раз.

Целью настоящей работы являлось получение режущих пластин из оксидно-субоксидной керамики на основе Al , лучших или не уступающих по своим эксплуатационным свойствам московским, но еще более дешевых.

Механические свойства полученных оксидно-субоксидных образцов на основе Al_2O_3 , отшлифованных алмазными кругами до размеров $13,7 \times 13,7 \times 4,76$ мм, исследовались в сравнении с пластинами ВО-100 и ВОК-200, изготовленными во ВНИИТС (г. Москва). Пластины ВО-100 являются керамикой оксидного типа на основе Al_2O_3 с добавками других оксидов, пластины ВОК-200 — керамикой оксидно-карбидного типа на основе Al_2O_3 и TiC с добавками других оксидов [26].

Т а б л и ц а 2.2 — Результаты рентгенофазового анализа образцов оксидно-субоксидной керамики

Выявленная фаза	Количество линий, используемых для идентификации	Объемная, концентрация, %	Окно расщипровки, град.
Al_2O_3	1,9	54,5	0,3
AlO	21	13,7	0,3
Al_2O	18	9,3	0,3
Al	6	9,3	0,4
Не идентифицируемые фазы	5	13,2	—

Т а б л и ц а 2.3 — Сравнительные свойства керамики на основе Al_2O_3

Механические свойства	Единицы измерения	Образцы керамики		
		ВО-100	ВОК-200	ОС
Плотность	г / см ³	4,16	4,2—4,3	4,1—4,2
Твердость	HRA	91—92	92—93	91—92
Предел прочности при изгибе	МПа	600	650	650
Предел прочности при сжатии	МПа	4 800	5 200	5 010
Коэффициент трения по стали	—	0,29	0,27	0,21

В таблице 2.3 приведены механические свойства режущих пластин, изготовленных во ВНИИТС, и оксидно-субоксидных керамических пластин (ОС), изготовленных по новой технологии (рис. 2.5).

Из таблицы 2.3 видно, что по основным механическим свойствам образцы пластин из оксидно-субоксидной керамики на основе Al_2O_3 (ОС) не уступают или превосходят образцы ВО-100 (Al_2O_3) и приближаются к показателям образцов ВОК-200, изготовленным на основе Al_2O_3 и TiC, а по коэффициенту трения превосходят и ВО-100, и ВОК-200 за счет внутренней твердой смазки, в качестве которой служат включения свободного алюминия. Полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности использования режущих пластин из оксидно-субоксидных керамик на основе Al_2O_3 в производственных условиях.

Лабораторные испытания режущих пластин типа ОС, ВО-100 и ВОК-200 на токарных операциях резания различных сталей показали преимущества пластин ОС. Усилие резания этими пластинами меньше, чем усилия резания пластинами ВО-100 и ВОК-200, на 12...15% за счет эффекта самосмазывания включениями свободного алюминия [27].

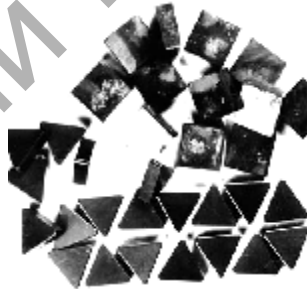


Рисунок 2.5 — Режущие пластины из оксидно-субоксидной керамики

Режущие пластины из оксидно-субоксидной керамики на основе Al испытывались в производственных условиях на различных предприятиях Беларуси и России в операциях токарной обработки легированных сталей, в том числе и закаленных, а также чугунов.

По заключению заводских специалистов, режущие пластины из оксидно-субоксидной керамики могут применяться при обработке некоторых закаленных сталей, серых чугунов, полумасляной обработке легированных и углеродистых сталей при условии жесткости обрабатываемых заготовок. Предлагается продолжить испытания пластинок с целью расширения возможностей их применения. Обнадёживающие результаты получены при резании древесины и древесных пластиков [27].

2.3 Получение режущих элементов деревнообрабатывающего инструмента из горячедеформированного белого чугуна

2.3.1 Обоснование возможности применения белого чугуна для изготовления деревнообрабатывающего инструмента

Деревообрабатывающие предприятия республики Беларусь для обработки древесных и древесно-стружечных материалов используют большое количество разнообразного деревообрабатывающего инструмента. Потребность предприятий республики только в ножах с линейной кромкой составляет более 100 тыс. в год. Потребление рамных и дисковых пил составляет 45...50 тыс. в год. Рост объемов обработки резанием древесины и древесных материалов, наблюдаемый в республике, обусловлен не только увеличением масштаба выпуска продукции, но и повышением требований к точности и качеству обработанных поверхностей, а также расширяющейся номенклатурой обрабатываемых материалов. Наряду с традиционными материалами (древесиной различных отечественных пород, фанерой, древесно-стружечными и древесно-волокнистыми плитами и др.) все большее применение находят древесные и бумажные пластики, цементно-стружечные плиты и др. Увеличение объемов резания соответственно приводит к повышению расхода режущего инструмента,

из чего вытекает задача повышения стойкости или снижения стоимости режущего инструмента. Все методы повышения стойкости и снижения стоимости режущего инструмента можно разделить на конструктивные, технологические и эксплуатационные. Конструктивные и технологические методы направлены, в первую очередь, на повышение режущих свойств инструментальных материалов. Они включают мероприятия по изысканию и использованию новых инструментальных материалов, методов и режимов их термической обработки. Эксплуатационные методы состоят в том, чтобы поддержать начальный уровень качества режущего инструмента в течение всего срока его службы. К ним относятся методы подготовки инструмента, в первую очередь, заточки и доводки.

В химических и электрохимических реакциях, протекающих в зоне контакта инструмента с обрабатываемым материалом, участвуют продукты механической и термической деструкции древесины, происходящей при ее резании. Воздействие продуктов деструкции на инструментальные стали способствует появлению и протеканию коррозионных процессов. В результате накопления коррозионных повреждений в поверхностных слоях возникают микротрещины, являющиеся источником хрупкого выкрашивания. Кроме него инструмент подвержен абразивному износу, особенно при обработке определенных древесных материалов (древесно-стружечных, древесноволокнистых, цементно-стружечных и т. п.). Стойкость деревообрабатывающего инструмента и его себестоимость, а также стоимость повторных переточек и доводок в процессе эксплуатации зависят от применяемых для изготовления инструмента материалов. В настоящее время используют следующие материалы:

- пилы: рамные — 9ХФ; ленточные — 9ХФ, У10А; круглые — 9ХФ, 65ХФ; круглые строгальные — 9ХФ, Х6ВФ, 9Х5ВФ;
- ножи: для фрезерования — 8Х6НФТ, 9Х5ВФ, Х6ВФ, Р9, Р4;
- лушительные и строгальные — 9Х5ВФ, Х6ВФ, 85ХФ, 8ХНФТ, Х12, Х12ФТ;
- рубильные — 6ХС, 55Х7ВСМФ, 55Х6В3СМФ, Р9;
- стружечные — 9Х5ВФ, Х6ВФ, Р4, Х12Ф1, 9ХС, Р6М5;
- гильотинные ножницы — 9ХС, 9Х5ВФ, 85ВФ;
- пильные цепи — 9ХФ, 7ХНМ;
- фрезы концевые — Р9Ф2К5, Р18, Х12, ХВГ, В2, 85ХФ; Р6М5;

- фрезы насадные — Х6ВФ, Х96ВФ, Х12Ф, Х12, ХВГ, 9ХС, У9А, Р9, Р18, Р6М5;
- сверла и зенкеры — 9Х5ВФ, Х6ВФ, Р9, Х12, ХВГ, В2, 85ХФ;
- токарные резцы — Х12Ф, Р9, Р9Ф2К5, 9ХС, В2, У9А, Р6М5;
- инструмент для окорочных станков — 65Г, 60С2А, 50ХГФА;
- стамески и долота — У7А, У8А;
- пилы ручные — 9ХФ, У8А, У10А, 65ХФ.

Наряду с инструментальными сталями для изготовления дереворежущих инструментов широко применяют твердые сплавы, которые превосходят по износостойкости (и по стоимости) все известные стали. Для инструмента, предназначенного для обработки различных древесных материалов, применяются следующие марки твердых сплавов:

- хвойные породы древесины — ВК15, ВК15-ОМ, ВК20;
- твердолиственные породы древесины — ВК8, ВК10М, ВК10-ОМ;
- фанера, гнукотклеенные, плоскоклеенные заготовки, пластифицированная древесины — ВК6, ВК8, ВК10-ОМ, ВК10М;
- древесно-стружечные, древесно-волокнистые, ламинированные плиты, пресованная древесина — ВК3, ВК3М, ВК6, ВК6М, ВК6-ОМ.

Таким образом, очевидно, что для инструмента, воспринимающего значительные динамические нагрузки следует применять сплавы с повышенным содержанием кобальта, т. е. обладающие более высокими показателями ударной вязкости, а для инструмента, работающего в условиях безударных нагрузок, сплавы с пониженным содержанием кобальта. Однако следует отметить, что стоимость твердосплавных пластин намного выше стоимости стального инструмента (один нож длиной 30 мм из ВК6 стоит по каталогу фирм Liecz, Leuco 35...40 Евро).

Перспективными материалами для изготовления деревообрабатывающих инструментов являются инструментальные сплавы на основе белых чугунов. В литом состоянии в их структуре формируется два вида эвтектических колоний: аустенит + карбид ванадия и аустенит + карбидванадия + карбиды типа Cr_7C_3 . Ванадиево-карбидные каркасы эвтектических колоний повышают их жесткость и сопротивление деформации, что обеспечивает высокую износостойкость материала. Карбиды ванадия хорошо удерживаются матрицей и не склонны к выкрашиванию.

Прочность и вязкость матрицы и ее теплостойкость обусловлены достаточно высоким легированием металлической основы ванадием, хромом, кремнием, обеспечивающими сохранность мартенсита при

повышенных температурах и вызывающими его дисперсионное твердение без использования такого дорогостоящего элемента, как вольфрам. Белые хромованадиевые чугуны закаливают от температуры 900...1100°C в масле для получения высоколегированного аустенита. Отпуск производят при температуре 500...520°C. При отпуске происходит мартенситное превращение, что обеспечивает эффект вторичного упрочнения. В результате достигается высокая твердость (63...68 HRC), теплостойкость и износостойкость.

Твердость чугуна практически не зависит от условий охлаждения, в связи с чем возможна его закалка на воздухе. Это качество особенно ценно при использовании чугунных пластин для паяемого инструмента, так как температура нагрева при пайке достигает 900...1000°C, что соответствует температуре закалки чугунов.

Близость коэффициентов линейного расширения белого чугуна и стали, из которой изготовлен корпус инструмента, резко снижает коробление при пайке, которое чрезвычайно вредно при пайке твердосплавных пластин, так как часто приводит к их растрескиванию.

Теплостойкость белых чугунов находится на уровне теплостойкости быстрорежущей стали P6M5. Сочетание износостойкости и теплостойкости белых чугунов должно обеспечивать высокую работоспособность инструмента. Например, экспериментальное использование белых хромованадиевых чугунов для дисковых фрез при обработке заготовок из стали 35 обеспечило повышение стойкости фрез (по сравнению с фрезами из стали P6M5) в 2—2,5 раза при значительном улучшении чистоты обработки поверхности деталей.

Кроме указанных выше положительных качеств белых чугунов, как материала для деревообрабатывающего инструмента, необходимо отметить, что промышленность нашей республики имеет большие литейные мощности, поэтому получение литых заготовок инструмента не представляет трудностей.

Однако при большом количестве положительных качеств чугунов в виде материала для деревообрабатывающего инструмента, этот материал практически не используется при производстве инструмента из-за ряда недостатков:

- низкая ударная вязкость литой дендритной структуры не обеспечивает должной стойкости, особенно при ударных нагрузках;
- большая, чем при обработке стали P6M5, трудоемкость механической обработки, заточки и доводки режущих кромок;

– большие литейные припуски на механическую обработку и литейные дефекты ;

– при литейной технологии изготовления пластин получается низкий коэффициент использования металла.

Устранить эти недостатки возможно обработкой давлением литых заготовок методом горячей пластической деформации.

Обработка давлением позволяет:

а) раздробить грубую литейную структуру металла и карбидную сетку, повысить почти в 1,5—2 раза ударную вязкость и предел прочности белого чугуна;

б) максимально приблизить форму заготовки к исполнительным размерам инструмента, т. е. резко снизить затраты на механическую обработку и заточку инструмента;

в) залечить литейные дефекты в виде пор и литейных трещин;

г) использовать эффект высокотемпературной термомеханической обработки для термообработки заготовок;

д) снизить затраты на производство литейных заготовок за счет более простой их формы;

е) исключить алмазно-абразивную заточку при замене твердосплавных режущих элементов на элементы из белого чугуна.

Таким образом, применение белых хромистых или хромованадиевых чугунов в качестве материала для режущих элементов деревообрабатывающего инструмента экономически целесообразно и позволяет отказаться от импорта дорогостоящего инструмента, путем налаживания собственного производства в Республике Беларусь дешевого деревообрабатывающего инструмента.

2.3.2 Опытная технология изготовления режущих элементов деревообрабатывающего инструмента методом горячего пластического деформирования

В предыдущем разделе (2.3.1) дано подробное описание получения литых заготовок из хромованадиевого белого чугуна. Проведенные исследования образцов из этого чугуна показали, что данный чугун является термодинамически устойчивым, т. е. он не склонен к выделению графита при повышенных температурах.

Как указывалось выше, для получения структуры белого чугуна, которая будет обеспечивать высокие показатели твердости и износостойкости, а также других механических свойств, необходимо подвергнуть полученные литые заготовки горячей пластической деформации.

Пластическую деформацию белого чугуна можно осуществлять следующими способами:

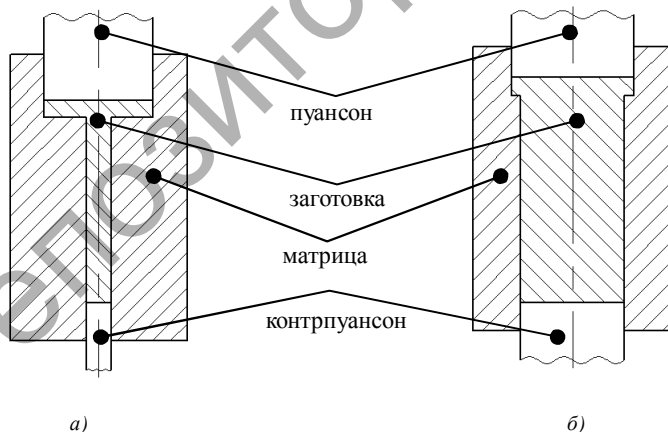
- 1) горячей объемной штамповкой;
- 2) горячей прокаткой.

В связи с этим были разработаны два варианта технологического процесса.

В соответствии с первым вариантом заготовку режущего элемента получали с помощью горячей объемной штамповки в прямоугольной матрице с противодавлением. Схема инструмента показана на рисунке 2.6.

Выбор оборудования для осуществления штамповки происходил на основе расчета усилия штамповки P по формуле

$$P = \pi r_1^2 \bar{p} \sigma_s, \quad (2.20)$$



а — боковой разрез; б — фронтальный разрез

Рисунок 2.6 — Схема инструмента для объемной штамповки

где r_1 — радиус пуансона, м;

σ_s — предел текучести;

P — относительное удельное усилие выдавливания, т. е. безразмерный критерий, который вычисляется по формуле

$$\bar{p} = a_1 + a_2 \frac{h_d}{R_i} + a_3 \frac{R_i}{h_d}, \quad (2.21)$$

где a_1, a_2, a_3 — постоянные, зависящие от геометрических размеров, условий трения и стадии процесса;

h_d — глубина распространения очага пластической деформации, м, определяемая по формуле

$$h_d = r_m \sqrt{\frac{a_3}{a_2}},$$

где r_m — радиус матрицы, м.

Постоянные a_1, a_2, a_3 определяются в соответствии с формулами:

$$\begin{cases} a_1 = 1 + \frac{c}{\sqrt{3}} + \frac{2\mu k_n}{1-r}, \\ a_2 = \frac{1 + \mu r \sqrt{3}}{r \sqrt{3} (1-r^2)}, \\ a_3 = \frac{1}{3\sqrt{3}} \left[r(\mu \sqrt{3} + K_0) + (1 + K_0) \frac{2-3r+r^{-3}}{1-r^2} \right], \end{cases} \quad (2.22)$$

где

$$c = \frac{1}{1-r^2} \left[2 - r^{-2} \sqrt{3 + \frac{1}{r^2}} + \ln \frac{1}{3} \left(\frac{1}{r^2} + \sqrt{3 + \frac{1}{r^2}} \right) \right],$$

$$K_0 = 1;$$

μ — коэффициент трения пары «деформируемая заготовка-инструмент»;

k_n — относительная высота калибрующего пояса пуансона, определяемая по формуле

$$k_n = l_k / r_n,$$

где l_k — высота пояска пуансона;

r_1 — приведенный радиус пуансона по калибрующему пояску, м.

В качестве исходной заготовки использовался пруток диаметром 27,4 мм и длиной 23 мм.

Величина усилия P , вычисленная по формуле (2.20), 0,993 МН.

Штамповку заготовки осуществляем при температуре 1 000...1 050°C. Для того чтобы уменьшить скорость охлаждения заготовки и разгар инструмента, перед операцией штамповки необходимо нагреть штамп до температуры 430...450°C. Для уменьшения трения использовалась смазка на основе индустриального масла марки И40. Чтобы обеспечить при деформировании неравномерное напряженное состояние сжатия штамповка осуществлялась с противодавлением с помощью пневмомаркета усилием в 270 МПа (27 кгс / мм²), как показано на рисунке 2.6. Так как заготовка нагревается в индукционной установке, то отпадает необходимость в применении специальных устройств для очистки заготовок от окалины, что, конечно же, снижает стоимость процесса получения заготовок режущих элементов. Однако процесс горячего выдавливания низкопроизводительный. Кроме того, в процессе выдавливания остается прессостаток, т. е. снижается коэффициент использования металла. Во время процесса выдавливания возникают большие нагрузки на инструмент, что значительно снижает стойкость инструмента.

Указанных недостатков лишены процессы прокатки. Поэтому был разработан технологический процесс горячей продольной прокатки.

Так как хромованадиевый белый чугун относится к труднодеформируемым материалам (по сопротивлению деформации его можно сравнить с быстрорежущими сталями), необходимо проводить процесс его деформирования в несколько переходов в калибровочных валках, чтобы создать наиболее благоприятные условия деформирования.

Деформирование проводили по схеме: квадрат → овал → прямоугольник (рис. 2.7).

Величина вытяжки η определялась по формуле

$$\eta = \frac{F_0}{F_{п.пр}}, \quad (2.23)$$

где F_0 — площадь поперечного сечения до прокатки, м²;

$F_{п.пр}$ — площадь поперечного сечения после прокатки, м².

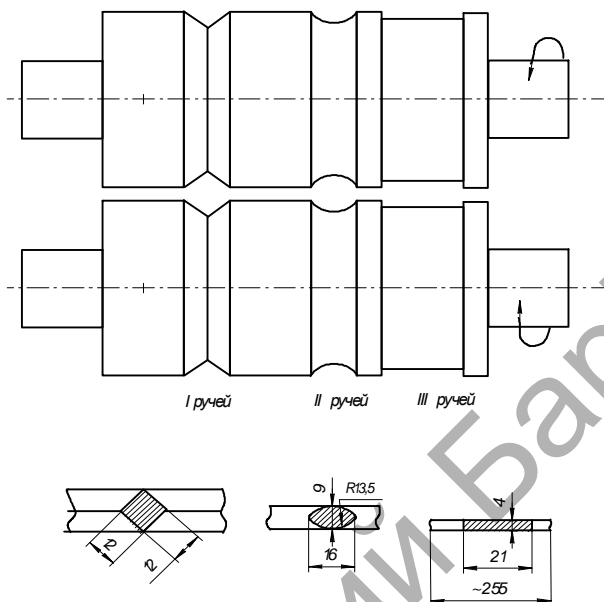


Рисунок 2.7 — Калибрующие валки

Уширение Δb вычислялось по формуле

$$\Delta b = \left(1 + \frac{\Delta h}{H} \right) \left(\mu \sqrt{r_g - \Delta h - \frac{\Delta h}{2}} \right) \frac{\Delta h}{H}, \quad (2.24)$$

где Δh — абсолютное обжатие, выраженное формулой

$$\Delta h = h_0 - h_{3, \text{ пр}},$$

где $h_{3, \text{ пр}}$ — высота заготовки после прокатки, м;

h_0 — высота заготовки до прокатки, м;

μ — коэффициент трения;

$r_{\text{в}}$ — радиус валков.

Результаты расчета по каждому переходу сведены в таблицу 2.4.

Т а б л и ц а 2.4 — Значения параметров, входящих в формулы 2.23 и 2.24

Показатель	Калибр		
	1-й	2-й	3-й
$F_0, \text{ м}^2$	0,000177	0,000144	0,000452
$F, \text{ м}^2$	0,000144	0,000452	0,000084
η	1,229	0,318	5,4
$H, \text{ м}$	0,015	0,012	0,009
$h, \text{ м}$	0,012	0,009	0,004
$R, \text{ м}$	0,4	0,4	0,4
Dh	0,003	0,003	0,005
Db	0,0014	0,0018	0,006
μ	0,3	0,3	0,3

Прокатку проводили при температуре 1 000...1 050°C. Нагрев заготовки перед каждым пропуском производился в печи СНОЛ 30 / 1100, предварительно нагретой до температуры 1 080°C. Для прокатки использовался стан прокатный 6М195.

По результатам прокатки были получены заготовки под последующее изготовление пластин для дереворежущего инструмента.

Из проведенных исследований можно сделать вывод о том, что процесс горячей прокатки наиболее приемлем для массового производства заготовок лезвий дереворежущего инструмента в силу следующих причин:

- простота изготовления инструмента;
- высокая, по сравнению с выдавливанием, производительность;
- высокий коэффициент использования металла.

После получения заготовок, отлитых по ранее описанной технологии (раздел 2.3.1), проводились замеры твердости. Они показали, что у отожженного литого белого легированного чугуна в зависимости от химического состава твердость варьируется в пределах 40...55 HRC и от 58...64 HRC — у закаленного.

После пластической деформации белого легированного чугуна, в частности после прокатки, твердость чугуна возросла до 60...65 HRC. Такое повышение твердости объясняется тем, что

пластическая деформация уплотнила структуру чугуна, т. е. можно сделать вывод, что пластическая деформация в значительной степени способствует улучшению физико-механических свойств белого легированного чугуна без дополнительной термической обработки. Если же деформированный белый легированный чугун подвергнуть дополнительной термической обработке, то можно достигнуть значений твердости порядка 65...74 HRC.

После получения плоских заготовок режущих элементов вышеуказанными методами горячего пластического деформирования, эти заготовки необходимо обрезать механическим путем (отрезным абразивным кругом) до заданного размера по длине (в нашем случае — выдержать длину заготовки 40 мм). Затем партию заготовок режущих элементов из 25 штук зажимают в тисках инструментальных и шлифуют на плоскошлифовальном станке от размеров $4 \times 16 \times 40$ (мм) до размеров $3,2 \times 15 \times 40$ (мм).

После вышеуказанных операций заготовки режущих элементов из белого чугуна могут быть использованы для изготовления фрезерных деревообрабатывающих ножей [28].

2.4 Получение биметаллического концевой режущего инструмента методом горячего пластического деформирования

Концевой режущий инструмент (сверла, метчики, зенкера и др.) является одним из наиболее используемых видов инструмента в различных отраслях производства. Это определяет необходимость применения для его изготовления наиболее прогрессивных технологий, обеспечивающих высокую производительность, минимальные отходы дорогостоящих легированных сталей, максимальную степень автоматизации и т. д. В настоящее время наиболее широко применяются механические методы изготовления монолитного концевой инструмента, в основе которых лежит резание металлов.

Для изготовления крупногабаритного инструмента иногда применяют биметаллическую конструкцию, в которой рабочая (режущая) часть изготовлена из быстрорежущей стали (Р6М5), а хвостовик — из углеродистой (например, 40Х). Обе части соединяются сваркой, трением, контактной сваркой [29] или пайкой [30].

Применение процесса резания приводит к большому расходу дорогостоящей стали Р6М5, а вышеперечисленные методы соединения двух разнородных сталей имеют такие недостатки, как охрупчивание промежуточного слоя при сварке и экологическое загрязнение при пайке.

Процесс горячего пластического деформирования позволяет избежать вышеуказанных недостатков, экономить дорогостоящую быстрорежущую сталь за счет устранения операций резания, улучшить структуру стали, а соответственно и повысить физико-механические свойства конечного изделия, в случае биметаллической конструкции — получить высокопрочное соединение. При этом процессы горячего выдавливания легко поддаются механизации и автоматизации, отличаются высокой производительностью, не имеют вредных экологических последствий. Однако эти процессы имеют свои специфические особенности, которые следует учитывать при разработке конкретных процессов изготовления концевой режущего инструмента.

2.4.1 Основные факторы, влияющие на процесс горячего выдавливания концевой инструмента

Процесс деформации горячего металла путем объемной штамповки выдавливанием обычно осуществляют с использованием штампа, полость которого изготовлена таким образом, чтобы обеспечить плавное течение металла при ее заполнении, причем весь процесс течения материала должен происходить без образования надрывов и трещин. Для этого необходимо учитывать влияние большого числа факторов, важнейшие из которых могут быть представлены следующими группами: конструктивные; температурно-временные; фрикционные.

Конструктивные факторы включают в себя геометрические элементы штампа (матрицу, контейнер, пуансон), общие требования, к проектированию которых должны учитывать возможность плавного течения деформируемого материала, заполнение рельефа формообразующего инструмента, рациональный выбор материалов для элементов штампа, точность изготовления сопрягаемых деталей и узлов, сменность изнашиваемых элементов и возможность унификации при их замене на другие типоразмеры.

К температурно-временным факторам процесса выдавливания профильных заготовок концевой режущего инструмента следует

отнести тепловое взаимодействие нагретой заготовки и штампового инструмента при их контакте в процессе пластического деформирования.

Известно, что быстрорежущие стали, применяемые в качестве основного материала для изготовления концевых режущего инструмента, относятся к термочувствительным сталям, склонным к проявлению высоких показателей пластических свойств в узком температурном интервале горячей обработки. Известно, что максимальной пластичностью сталь Р6М5 обладает при $t = 1\ 050—1\ 100^{\circ}\text{C}$. В связи с тем, что в результате контакта нагретой заготовки со штампом происходит теплопередача от заготовки через прослойку смазки к стенкам контейнера и матрице, то теплосодержание ее уменьшается, температура заготовки устанавливается ниже оптимального температурного интервала пластичности деформируемого материалов. При этом общая величина теплотеря зависит как от граничных условий температуры поверхности контакта и условий теплопередачи, так и от времени процесса теплопередачи. Как показывает практика, при скоростном горячем выдавливании основная доля теплотеря заготовки обусловлена, в первую очередь, контактом ее с рабочей средой, особенно в начальной стадии деформирования, когда она находится в цилиндрическом приемнике (контейнере). Даже при кратковременном контакте (1...3 с), в зависимости от первоначальной температуры заготовки и состава смазки, теплотери могут достигать десятков, а иногда и сотен градусов.

Поэтому при эксплуатации штампа необходимо учитывать влияние таких факторов, как исходная температура заготовки, время контакта заготовки со смазкой и штампом, теплофизические свойства заготовки, штампа и смазки, объем деформируемого материала и температуру подогрева штампа. Особую значимость эти факторы приобретают при выдавливании профильных заготовок инструмента с внедрением в них в процессе формообразования хвостовиков из углеродистой стали, так как в этом случае время контакта нагретой заготовки со штампом примерно вдвое больше, чем в случае прямого выдавливания.

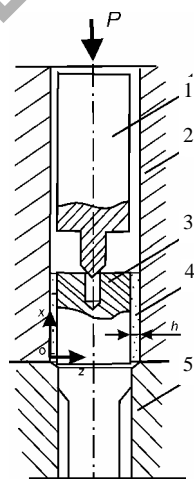
Факторы фрикционного характера определяют энергозатраты непосредственно при пластическом формообразовании, с одной стороны, и неравномерность деформированного состояния при пластическом течении — с другой. Снижению контактного трения способствует применение смазок, в той или иной мере разделяющих контактируемые поверхности при пластическом течении деформи-

руемого материала относительно формообразующего инструмента. При этом должна быть обеспечена достаточная термостабильность смазок при температурах горячей обработки. Таким образом, при горячем выдавливании смазки выполняют роль экранирующих прослоек, как в механическом, так и в теплофизическом отношениях.

2.4.2 Особенности теплопередачи в системе заготовка—смазка—инструмент при горячем выдавливании

Механические и эксплуатационные свойства изделий, полученных горячей пластической деформацией, а также стойкость элементов штампа при деформировании, во многом определяются температурным режимом обработки, который зависит от начальной температуры нагрева заготовки, времени переноса заготовки в штамп, геометрических параметров заготовки и инструмента, сил трения при деформации, теплофизических свойств материалов заготовки, штампа и смазки и т. д. Процессы теплообмена при горячем выдавливании существенно влияют как на тепловое состояние деформируемой заготовки, так и на изменение температурного поля предварительно подогретого штампового инструмента. Как показывает практика, основные потери тепла происходят в начальной стадии, когда время контакта заготовки со штамповым инструментом в десятки раз превышает время деформации при выдавливании (0,1...0,3 с). В связи с изменяющимся во времени температурным полем в рассматриваемой системе, процесс теплообмена является нестационарным и имеет громоздкое решение, поэтому при решении практических задач часто прибегают к экспериментально-аналитическому методу.

Рассмотрим процесс теплопередачи при горячем выдавливании, схема которого приведена на рисунке 2.8.



- 1 — хвостовик;
- 2 — контейнер;
- 3 — заготовка;
- 4 — смазка;
- 5 — матрица

Рисунок 2.8 — Схема к расчету теплопередачи при горячем выдавливании

При решении задачи приняты следующие допущения:

- температурное поле в слое смазки одномерное.
- контакт смазки с поверхностью заготовки — идеальный, а коэффициент теплообмена — постоянный.
- основной формой переноса тепла в слое смазки является теплопроводность в направлении, перпендикулярном поверхности контакта.
- диссипацией энергии смазки при деформации можно пренебречь, так как она несравнимо мала в сравнении с тепловой энергией, передаваемой смазке от нагретой заготовки.

Пусть исходная температура слоя смазки будет T_c , контейнера — T_k , а заготовки — T_0 . Тогда условие задачи можно записать следующим образом:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}; T(z, 0) = T_c,$$

$$T(0, t) = T_k, T(h, t) = \varphi(t), \quad (2.25)$$

где α — температуропроводность смазки;

$\varphi(t)$ — температурная функция, характеризующая изменение температуры в теле заготовки во времени и подлежащая определению.

Если допустить, что для какого-то момента времени $t^* \in [t_{j-1}, t_j]$, $\varphi(t) = \varphi_j = \text{const}$, то решение (2.25), полученное с помощью преобразования Лапласа, можно представить в виде:

$$T_{j,z} = T_c + (T_k + T_c) \operatorname{erfc} \frac{z}{2\sqrt{at_j}} +$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \left[\operatorname{erfc} \frac{(2n-1)h-z}{2\sqrt{at_j}} - \operatorname{erfc} \frac{(2n-1)h+z}{2\sqrt{at_j}} \right] (\varphi_j - T_c) - \right.$$

$$\left. - \left[\operatorname{erfc} \frac{2nh-z}{2\sqrt{at_j}} - \operatorname{erfc} \frac{2nh+z}{2\sqrt{at_j}} \right] (T_k - T_c) \right\}, \quad (2.26)$$

где $\operatorname{erfc}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^{\infty} \exp(-z^2) dz$ — функция ошибок Гаусса.

Для определения $\varphi(t)$ используем уравнение теплового баланса:

$$Mc_p dT_3 = -\alpha(T^* - T_M)Fdt, \quad (2.27)$$

где T_3 — температура заготовки;

F — площадь боковой поверхности заготовки;

T^* — текущая температура заготовки;

T_M — средняя температура смазки;

c — удельная теплоемкость материала заготовки;

a — коэффициент теплоотдачи материала заготовки.

Будем считать, что значение T_M во времени связано с изменением температуры заготовки линейным образом:

$$T_M = T_c - t \frac{dT_3}{dt}. \quad (2.28)$$

Подставив (2.28) в (2.27), получим следующее выражение:

$$(CR + t)d\theta_c = -\theta_c dt, \quad (2.29)$$

где C — объемная теплопроводность, определяемая формулой $C = c\rho V$;

R — термическое сопротивление, выраженное формулой $R = \frac{1}{\alpha F}$;

θ_c — избыточная температура, определяемая формулой $\theta_c = T^* - T_c$.

Разделяя в (2.29) переменные и интегрируя их, получаем выражение:

$$\ln\theta = -\ln(t + CR) + d, \quad (2.30)$$

где d — постоянная интегрирования, определяемая из начальных условий.

Окончательно получаем

$$\theta = \frac{\theta_c}{\theta_0} = \frac{T^* - T_c}{T_0 - T_c} = \frac{1}{F_0 + 1}, \quad (2.31)$$

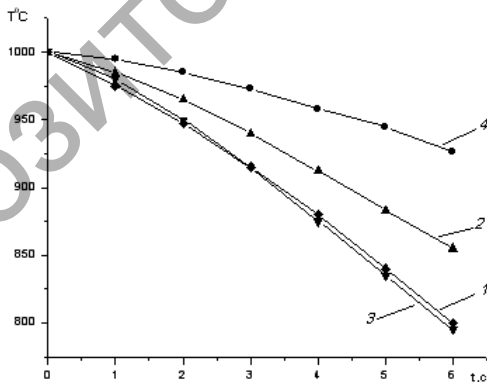
где F_0 — критерий гомохронности Фурье, определяемый формулой

$$F_0 = \frac{t}{cR}.$$

Таким образом, температура поверхности заготовки в любой момент времени охлаждения $\Phi_{j,t}$ определяется из выражения (2.31):

$$\Phi_{j,t} = T^* = \frac{T_0 + F_0 T_c}{F_0 + 1}. \quad (2.32)$$

Для оценки достоверности полученных формул были проведены экспериментальные работы по исследованию температурного поля в нагретой заготовке, охлаждаемой в результате контакта со смазкой и штампом. Процесс теплообмена был моделирован в приспособлении, позволяющем с помощью термопар регистрировать распределение температурного поля по радиусу заготовки, помещенной в цилиндрический, со смазанной внутренней поверхностью приемник. Следует отметить, что наиболее существенный вклад в интенсивность изменения температуры поверхности заготовки при охлаждении вносит смазочная среда, состав которой обуславливает величину коэффициента теплообмена. Изменение температуры поверхности и внутренних слоев цилиндрической заготовки диаметром 30 мм, нагретой до $T_c = 1000^\circ\text{C}$ и охлажденной в смазочной графито-масляной среде, находящейся в зазоре между заготовкой и контейнером, показано на рисунке 2.9.



1 — без подогрева штампа (расчет); 2 — с подогревом до 300°C (расчет); 3 — эксперимент; 4 — внутренние слои заготовки (эксперимент)

Рисунок 2.9 — Изменение температуры поверхности заготовки при охлаждении

Сравнение экспериментальных и расчетных данных показывает достаточную близость результатов. Расхождение данных с увеличением времени охлаждения обусловлено тем, что при расчете был учтен подогрев штампа до 300°C, в то время как при эксперименте подогрев контейнера не производили.

2.4.3 Отладка и опробование штампа для горячего выдавливания концевой инструмента

Процесс получения биметаллического инструмента, состоящего из рабочей части, изготавливаемой, как правило, из быстрорежущей стали Р6М5, и хвостовой части, изготавливаемой из углеродистой стали, может быть осуществлен либо при отдельном изготовлении режущей и хвостовой частей с последующим соединением их пайкой или сваркой трением, либо совместным горячим выдавливанием обеих частей. В последнем случае рабочая часть инструмента соединяется с хвостовой в процессе формообразования профиля внедрением одного материала в другой.

В соответствии с этим наладка штампа осуществляется либо для выдавливания профильной части инструмента с образованием на пресс-остатке выдавленного профиля глухого отверстия (диаметр которого для метчика М24 составил 12 мм, длина — 12 мм), либо для выдавливания профильной части инструмента с одновременным внедрением в нее его хвостовой части. В первом случае использовали пуансон с цилиндрической или шестигранной иглой диаметром 12 мм, во втором — пуансоном служил цилиндрический хвостовик диаметром 18 мм, имеющий на конце коническое заострение и устанавливаемый на нагретую заготовку через направляющую втулку.

Опробование работы штампа производилось в обоих случаях после предварительного подогрева контейнера и матрицы штампа индуктором промышленной частоты до температуры 300°C. Как показали расчеты по приведенным формулам, при работе без предварительного подогрева штампа температура поверхности заготовки предварительно нагретой до 1 000°C, становилось на 50...70°C ниже, чем в случае подогрева штампа. Такое понижение температуры приводит к резкому снижению пластических свойств быстрорежущей стали и существенному увеличению усилия деформирования.

Последнее особенно важно при совместной деформации хвостовой и режущей частей, когда время контакта нагретой заготовки со штампом при ручной загрузке заготовок возрастает до 3—5 с.

2.4.4 Прочность сварного соединения концевое биметаллического инструмента

Изготовление биметаллического концевое инструмента с применением пластического формообразования режущей части обуславливает необходимость соединения ее с хвостовой частью одним из известных способов. В настоящее время для соединения быстрорежущей стали с углеродистой в инструментальном производстве, как правило, используются такие методы сварки, как электроконтактная (для любых диаметров заготовок) или сварка трением (для заготовок диаметром до 25 мм). Оба метода имеют ряд достоинств и недостатков, определяющих их применимость в конкретных случаях изготовления сварного инструмента. Сравнение механических свойств сварного инструмента показывает, что сварка трением заготовок диаметром 20 мм имеет лучшие результаты как при испытании на разрыв, так и при кручении (соответственно 51,8 и 28,6 кг / мм² в случае сварки электроконтактным способом и 57,7 и 31,2 кг / мм² в случае сварки трением). Однако следует отметить, что как в первом, так и в другом случае разрушение образцов проходило по материалу режущей части. Для выявления причин такого характера разрушения были проведены металлографические исследования зоны соединения двух материалов. Установлено, что причиной, способствующей зарождению трещин и их распространению при приложении нагружающего усилия, является наличие дополнительного градиента микротвердости в зоне стыка быстрорежущей и конструкционной сталей, который в свою очередь вызван диффузионными процессами в околошовной зоне. При этом основным элементом-мигрантом является углерод.

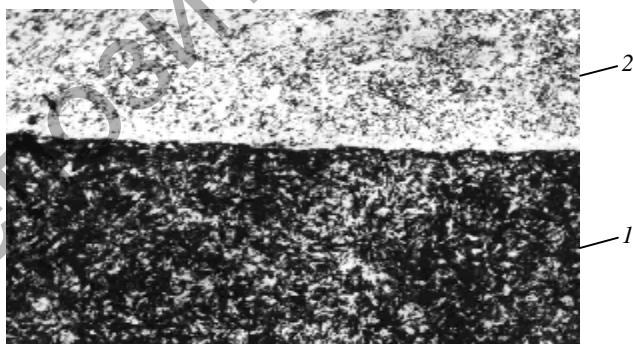
В результате встречной диффузии (диффузии против концентрации углерода, вследствие более сильных карбидообразующих в составе быстрорежущей стали) со стороны углеродистой стали образуется обезуглероженная зона, а со стороны быстрорежущей —

дополнительная карбидная зона вдоль стыка (рис. 2.10). Величина обезуглероженного слоя в заготовке, сваренной трением, составляет 0,10...0,12 мм, а в заготовке, сваренной электроконтактной сваркой — 0,20...0,28 мм. Это различие объясняется, по-видимому, более высокой температурой свариваемых материалов в зоне контакта при электроконтактной сварке.

Во всех случаях известные методы сварки, в том числе и вакуумно-диффузионная, в той или иной мере способствуют появлению дополнительного концентратора напряжений в зоне соединения разнородных материалов.

Кроме того, колебания величин электрических и механических параметров процесса сварки в производственных условиях также приводят к снижению стабильности прочностных показателей соединения режущей и хвостовой частей инструмента.

Следует отметить, что рекомендуемые в ряде источников режимы сварки трением стали Р6М5 (удельное давление проковки $p_n = 100...110$ МПа; удельное давление осадки $p_{oc} = 170...220$ МПа; время нагрева составляет 12...18 с, скорость относительного вращения — 1,0...1,5 м/с) не совпадают с режимами сварки трения, принятыми на инструментальных заводах. Такая неоднозначность рекомендуемых и используемых на практике режимов сварки быстрорежущих сталей с углеродистыми, обусловлена, вероятно, отсутствием



1 — конструкционная сталь; 2 — быстрорежущая сталь

Рисунок 2.10 — Микроструктура зоны сварки между заготовками из быстрорежущей и конструкционной сталями ($\times 340$)

единых принятых критериев оценки качества и работоспособности сварных соединений. Существующая практика оценки прочности сварного шва по характеру излома образца дает лишь качественное представление о надежности соединения и не позволяют выявить критерии зависимости работоспособности соединения от параметров сварки. Другие методы контроля на практике пока не нашли применения. Такой метод неразрушающего контроля, как ультразвуковой, дает лишь некоторое представление о влиянии размеров и местоположения присутствующих в соединении дефектов на его прочность. Исследованиями установлено, что особенно резко снижают эксплуатационную прочность сварных соединений всех видов инструментов поверхностные и подповерхностные дефекты.

Таким образом, практика применения метода сварки трением, наилучшим образом удовлетворяющего требованиям инструментального производства, показывает, что большое число факторов, сопутствующих этому методу и определяющих качество сварного соединения, не позволяет достичь высокого уровня надежности инструмента в производственных условиях.

2.4.5 Прочность паянного соединения концевое биметаллического инструмента

В связи с изложенным выше, целесообразна попытка исключения недостатков, присущих сварке трением, например, применением пайки вместо сварки. Такая замена метода соединения режущей и хвостовой части концевое инструмента основана на следующих положениях.

Известно, что соединение при пайке осуществляется при помощи промежуточного материала (припоя), способствующего образованию металлических связей с обоими соединяемыми материалами. Не рассматривая здесь термодинамические и металлургические процессы образования соединения, можно, однако, считать, что наличие промежуточного слоя между соединяемыми поверхностями с точки зрения механики разрушения его при критических нагрузках способствует проявлению барьерного эффекта при распространении трещин, с одной стороны, и снижению концентрации напряжений в зоне соединения механически разнородных материалов, с другой стороны.

Поэтому нами была исследована возможность получения такого соединения с применением вакуумной пайки. В качестве припоя были использованы такие материалы, как чугун или ферромарганец, температуры плавления которых были выше температуры заковки быстрорежущей стали Р6М5.

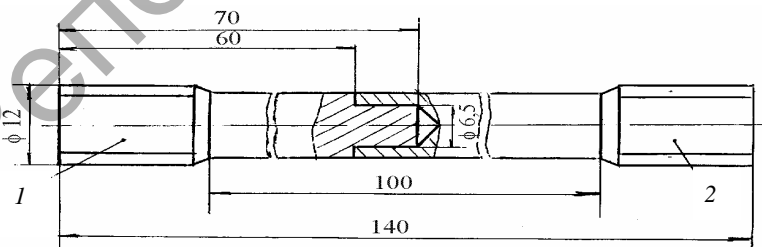
Для испытаний были изготовлены образцы (рис. 2.11), которые служили моделью биметаллического инструмента в отношении образования паяного соединения.

Образцы собирали таким образом, чтобы после засыпки порошка-припоя в полость части 2 сопрягаемого образца, часть 1 образца плотно входила в эту полость до соприкосновения торцовых поверхностей.

Пайка осуществлялась при температуре 1 220—1 240°С. Результаты испытаний на кручение приведены в таблице 2.5. При пайке были исследованы четыре состава припоя: 100% — Fe-Mn, Чугун СЧ-18 / 32 — 100%, Fe-Mn 80% +Cu 20%, Чугун 20%+ Fe-Mn 80%.

Как следует из таблицы 2.5, наиболее высокие показатели прочности при кручении (максимальные напряжения на сдвиг) были достигнуты при использовании в качестве припоя чугуна. Сравнение с данными, полученными при испытании образцов, сваренных трением, свидетельствует о практическом совпадении величин напряжений.

Для выявления необходимой достаточности прочности биметаллических метчиков в эксплуатационных условиях был проведен расчет крутящего момента и напряжений сдвига при нарезании резьбы. Максимальные напряжения в сердцевине метчика М24 при кручении составили 122 МПа.



1 и 2 — сопрягаемые части образца

Рисунок 2.11 — Образец для испытания прочности паяного соединения

Таблица 2.5 — Результаты испытаний на кручение паяных образцов

Состав припоя	Крутящий момент, кг · м, ах	Угол закручивания, градусы	Место разрушения	Диаметр сечения, мм	Напряжение сдвига $\tau_{\text{пик}} = \frac{12M_{\text{пик}}}{\pi d^3}$, МПа	Примечание
1. Fe-Mn 100%	2,2	60	сеч I	6,5	307	—
2. Чугун 100%	4,0	103	сеч II	7,5	364	Подтеки чугуна
3. Fe-Mn 80% + Cu 20%	1,7	60	сеч I	6,5	237	—
4. Чугун 20% + Fe-Mn 80%	2,4	52	сеч I	6,5	335	—

Таким образом, при нарезании резьбы метчиком М24 на поверхности контакта материала режущей части с хвостовой (в зоне их соединения) напряжения достигают величины $t_k = 122$ МПа, что ниже полученных величин напряжений при разрушении модельных образцов скручиванием (237...364 МПа, см. табл. 2.5), что говорит о работоспособности паянного соединения в эксплуатационных условиях.

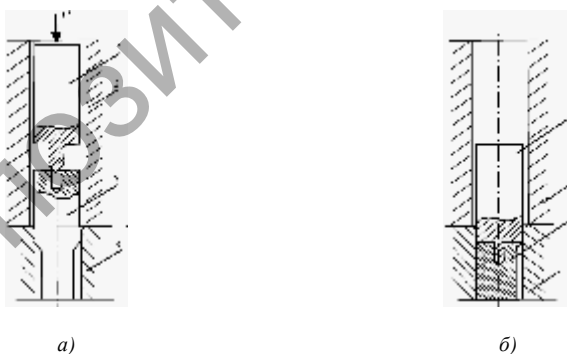
2.4.6 Разработка экспериментальной технологии получения заготовки концевой биметаллического режущего инструмента горячим выдавливанием

В ФТИ НАН Беларуси разработана экспериментальная технология получения биметаллического концевой инструмента, в основу которой положена операция образования соединения режущей и хвостовой частей путем совместной деформации при выдавливании профильной режущей части через матрицу соответствующей конфигурации. Такой подход позволяет избежать многих негативных факторов, присущих методу получения неразъемного соединения сваркой трением, а также пайкой (применение экологически «грязных» компонентов, сложность, трудоемкость и т. д.).

Конструктивные элементы исходных заготовок должны одновременно учитывать как возможность прочного соединения в результате совместной деформации разнородных металлов, так и особенности процессов осадки, прошивки и выдавливания, последовательно или параллельно происходящих при образовании соединения.

На рисунке 2.12 представлена схема выдавливания биметаллического инструмента. Нагретая до $t = 1\ 000—1\ 050^{\circ}\text{C}$ заготовка режущей части 3 из быстрорежущей стали помещается в контейнере 2 на матрицу 4. На заготовку 3 устанавливается хвостовик 1 из конструкционной стали, имеющий наконечник для прошивки длиной l и диаметром d . Под воздействием усилия пуансона (на рисунке он не показан) хвостовик заостренным наконечником внедряется в режущую часть, после чего происходит выдавливание последней через профильную матрицу 4 (рис. 2.12, б).

В процессе получения соединения при горячем выдавливании по этой схеме возможно прохождение последовательно или параллельно нескольких операций обработки давлением: осадка нагретой заготовки до диаметра контейнера, осадка прошивающего наконечника длиной l , прошивка отверстия в нагретой заготовке, выдавливание заготовки через профильную матрицу, совместная деформация наконечника и заготовки при вхождении их в очаг пластической



a — в начале процесса; *б* — в конце процесса;
1 — хвостовик; 2 — контейнер; 3 — заготовка; 4 — матрица

Рисунок 2.12 — Схема процесса выдавливания биметаллического инструмента

деформации. Последовательность той или иной операций определяется из условия наименьшего усилия. Используя известные из теории обработки металлов давлением зависимости удельных усилий от геометрических соотношений формообразующего инструмента, заготовки и хвостовика, получим:

1) *удельное усилие открытой прошивки* $p_{o.пр}$, которое определяется по формуле

$$p_{o.пр} = \sigma_s \left(1 + 1,1 \ln \frac{D}{d} + \frac{d}{6l_1} \right),$$

где σ_s — предел текучести;

D_3 — диаметр заготовки;

d — диаметр прошивня (наконечника);

l_1 — глубина прошивки.

С учетом того, что в пластическом состоянии находится не весь объем металла под прошивнем, а только небольшая его часть, примыкающая к торцу прошивня, принято считать, что эта толщина составляет $1 / 6d$. Тогда

$$p_{o.пр} = \sigma_s \left(2 + 1,1 \ln \frac{D_3}{d} \right)$$

Эта формула справедлива при $D_3 / l_1 \leq 6$;

2) *удельное усилие закрытой прошивки* $p_{закр. пр}$, которое определяется по формуле

$$p_{закр. пр} = p' + p'',$$

где p' — усилие, необходимое для течения металла в зазор между пуансоном и контейнером;

p'' — усилие, необходимое для осадки заготовки.

Этот процесс возможен после осадки заготовки до размеров диаметра контейнера.

Определим величину p' следующим образом:

$$p' = \sigma_s \frac{F}{F_{пр.}} \ln \frac{F}{F - F_{пр.}},$$

где F — площадь заготовки;

$F_{\text{пр}}$ — площадь поперечного сечения прошиваемого металла, определяемая по формуле

$$f = \frac{\pi}{4}(d^2 - d_1^2).$$

Величина p'' равна

$$p'' = \sigma_s \left[1 + \left(1 + \ln \frac{F}{f_k} \right) + \frac{1}{6} \frac{d}{h} \right] = \sigma_s \left(2 + \ln \frac{F}{f_k} + \frac{1}{6} \frac{d}{h} \right),$$

где f_k , выражается формулой

$$f_k = F - F_{\text{пр}}.$$

Полное удельное усилие закрытой прошивки $p_{\text{з.пр}}$ при $h = \frac{1}{6d}$ будет равно

$$p_{\text{з.пр}} = \sigma_s \left[3 + \left(1 + \frac{F}{f} \right) \ln \frac{\frac{F}{S}}{\frac{F}{S} - 1} \right];$$

3) осадку прошивня $p_{\text{ос.пр}}$, которая определяется по формуле

$$p_{\text{ос.пр}} = \sigma_s \left(1 + \frac{\mu d}{4 l} \right),$$

где μ — коэффициент трения на торце прошивня (для данных условий деформирования можно принять $\mu = 0,2$);

4) осадку заготовки в контейнере $p_{\text{ос.з}}$, выраженную формулой

$$p_{\text{ос.з}} = \sigma_s \left(1 + \frac{\mu D}{4 L_3} \right),$$

где D — диаметр заготовки;

L_3 — длина заготовки;

5) *выдавливание заготовки через профильную матрицу*. Удельное усилие выдавливания складывается из удельных усилий на участках цилиндрического приемника (контейнера), формообразующего участка (заходной части) матрицы и участка постоянного профиля.

Будем рассматривать усилия на первых двух участках, поскольку полное усилие с учетом трения на участке постоянного профиля не лимитирует процессы образования соединения быстрорежущей и углеродистой стали.

На участке цилиндрического приемника:

$$p_1 = \sigma_s \frac{4\mu L}{D}.$$

На участке заходной части матрицы:

$$p_2 = \left(\frac{\tau_k}{\sin \gamma} + \frac{2\sigma_s}{1 + \cos \gamma} \right) \ln \frac{F}{f_{\text{пр}}},$$

где τ_k — контактное касательное напряжение;

γ — половина центрального угла заходной части матрицы;

$f_{\text{пр}}$ — площадь поперечного сечения профиля выдавливаемого инструмента.

Полное удельное усилие выдавливания заготовки через профильную матрицу p_v определяется суммой:

$$p_v = p_1 + p_2.$$

Анализ усилий по операциям процесса пластической деформации биметаллического инструмента показывает, что в порядке возрастания усилия выдавливания заготовок располагаются в следующей последовательности:

- 1) открытая прошивка;
- 2) осадка прошивня;
- 3) осадка нагретой заготовки, закрытая прошивка;
- 4) формообразование с истечением деформируемого материала в полость матрицы.

Расчеты показывают, что для исключения осадки самого прошивня до внедрения его в тело заготовки необходимо в последней делать отверстие диаметром не менее 5 мм и глубиной на 1...2 мм меньше длины внедряемой части хвостовика.

Таким образом, технологическая последовательность операций изготовления биметаллических метчиков М12 методом горячего выдавливания может быть представлена в следующем укрупненном виде:

- 1) изготовление хвостовика из стали 40Х;
- 2) изготовление рабочей части под выдавливание из стали Р6М5;
- 3) нагрев заготовки из стали Р6М5 до температуры 1 000...1 050°С;
- 4) выдавливание в штампе хвостовика и рабочей части через профильную матрицу;
- 5) высокий отпуск выдавленной биметаллической заготовки ($T = 760^{\circ}\text{C}$, $\tau = 60...120$ мин);
- 6) центрование базовой поверхности диаметром профильной части заготовки;
- 7) токарная обработка выдавленной биметаллической заготовки (снятие припусков с хвостовой и профильной частей инструмента, проточка заборного конуса);
- 8) фрезерование квадрата на хвостовике;
- 9) закалка, отпуск;
- 10) шлифование резьбы на профильной части.

Сравнение операций традиционной и новой технологий изготовления метчиков, приведенных в таблице 2.6, показывает, что предлагаемая технология исключает операции сварки, проточки грата и фрезерования канавок профиля метчика, но включает новую операцию горячего выдавливания.

Т а б л и ц а 2.6 — Технологическая последовательность операций изготовления метчиков по традиционной и новой технологиям

Традиционная технология	Новая технология
1. Токарная	1. Токарная
2. Сварка трением	2. Горячее выдавливание
3. Удаление грата	3. Отжиг
4. Отжиг	4. Токарная

Окончание табл. 2.6

Традиционная технология	Новая технология
5. Центрование	5. Центрование
6. Токарная	6. Фрезерование квадрата
7. Фрезерование канавок	7. Термообработка (закалка, отпуск)
8. Фрезерование квадрата	8. Шлифование
9. Термообработка (закалка, отпуск)	9. Резьбошлифование
10. Шлифование	10. Заточка
11. Резьбошлифование	11. Клеймение
12. Заточка	
13. Клеймение	

Для упрощения расчета себестоимости можно считать, что (это подтверждает и практика) трудоемкости операций фрезерования канавок на многопозиционных станках-автоматах и горячего выдавливания заготовок примерно равными. Таким образом, новая технология имеет преимущество перед традиционной в части исключения трудозатрат на операции соединения хвостовой и режущей частей инструмента.

Коэффициент использования быстрорежущей стали (по новой технологии) составляет 0,75.

2.4.7 Прочность соединения хвостовой и режущей частей инструмента

В соответствии с разработанной новой технологией для последующего совместного выдавливания были изготовлены заготовки хвостовой и режущей частей метчика М12. Выдавливание производили в специально изготовленном штампе.

Нагрев осуществляли в высокочастотном индукторе до температуры 1 050°С. В результате выдавливания были получены заготовки биметаллических метчиков в количестве 10 шт., которые были использованы для проведения испытаний на прочность соединения хвостовой и режущей частей.

Оценку прочности соединения компонентов биметаллического изделия осуществляли путем сдвига их относительно друг друга при растягивающих нагрузках.

Результаты испытаний прочности соединения представлены в таблице 2.7, откуда видно, что с точки зрения достаточности прочности соединения компонентов биметаллических метчиков опытные образцы вполне удовлетворяют требованиям эксплуатации.

Дополнительный резерв повышения прочности соединения может быть получен при увеличении площади контактной поверхности компонентов биметаллического инструмента за счет увеличения размера l_1 на заготовке хвостовика. Эксперименты показали также, что с целью облегчения операции прошивки отверстие в заготовке может быть увеличено.

2.4.8 Корректировка технологического процесса

Результаты испытаний прочности соединения хвостовой и режущей частей биметаллических метчиков позволили внести некоторые коррективы в конструктивно-технологические параметры опытной технологии горячего выдавливания метчиков. Прежде всего это касается размеров элементов узла соединения. Как показали расчеты усилий прошивки заготовки хвостовиком, с целью

Т а б л и ц а 2.7 — Результаты испытаний прочности соединения хвостовой и режущей частей биметаллических метчиков М12

Номер образца	Усилие сдвига, кН	Площадь поверхности сдвига, мм ²	Прочность соединения, МПа
1	17,8	255	700
2	18,3	247	741
3	19,1	266	728
4	15,3	238	643
5	18,6	260	715
6	20,3	241	842
7	21,2	265	800
8	18,2	248	733
9	19,2	268	716
10	15,4	228	675

исключения его осадки желательно либо увеличивать прочность внедряемой части хвостовика, например, путем закалки его до твердости HRC 50—55, либо созданием благоприятных (облегченных) условий прошивки за счет сверления в теле заготовки центрального отверстия диаметром, близким к диаметру внедряемого прошивня.

Увеличение прочности за счет предварительной упрочняющей термообработки хвостовика, однако, не целесообразно как с точки зрения введения в технологический процесс дополнительной термической операции, отрицательно воздействующей на механические свойства материала в конечном состоянии, так и с точки зрения затруднения пластического деформирования при совместном истечении материалов режущей и хвостовой частей в профилеобразующую матрицу. Последнее вызывает дополнительный рост усилий деформации при выдавливании, что приводит к пиковому росту напряжений на заднюю часть матрицы.

В связи с этим, корректировка конструктивных элементов хвостовика и матрицы является более целесообразной. Отрицательным моментом этого варианта следует считать некоторый дополнительный расход быстрорежущей стали при сверлении отверстия.

Опыты показали, что диаметр отверстия в заготовке следует принимать равным 5...6 мм, а для снижения усилий прошивки температура нагрева заготовки из быстрорежущей стали должна быть близка к верхней границе температурного интервала 1 000—1 050°C. Время контакта хвостовика с телом заготовки должно быть возможно минимальным. На практике оно составляло 0,5...0,8 с.

2.4.9 Температурно-силовые режимы горячего пластического формообразования биметаллических метчиков

Определение удельных давлений и работы деформации при изготовлении биметаллических инструментов горячим выдавливанием приобретает особое значение, так как силовые параметры в этом случае характеризуют не только энергозатраты, но и оптимальные температурно-силовые условия, необходимые для прочного схватывания соединяемых деталей в процессе пластической деформации, в частности при горячем выдавливании.

Измерение усилий деформирования в процессе горячего выдавливания на прессе К2130 осуществляли методом электротензометрирования.

Исследования силовых параметров процесса горячего выдавливания биметаллических заготовок сталь 40Х — сталь Р6М5 для изготовления метчиков М12 проводили в диапазоне температур 900...1 200°С со средними степенями деформации от 30 до 80%, что соответствовало интервалу температур и степеней деформации, встречающихся в обработке металлов давлением. Для определения влияния объемного содержания плакирующего металла (быстрорежущей стали) на усилие выдавливания, в экспериментах применяли заготовки с толщиной слоя 1...4 мм, что соответствовало изменению коэффициента плакирования в пределах 0,16...0,46. Выдавливание осуществляли в штампе как через матрицу с круглым внутренним профилем, так и через матрицу с профилем метчика. Длина заготовки во всех случаях была принята постоянной и составляла 30мм.

Полученные значения средних удельных усилий сведены в таблице 2.8.

Как показывает анализ результатов, с увеличением температуры деформации уменьшение среднего удельного усилия при выдавливании биметаллической заготовки происходит по экспоненциальному закону.

Т а б л и ц а 2.8 — Средние удельные усилия выдавливания биметаллических заготовок, МПа

Степень деформации, %	Температура нагрева, °С	Коэффициент плакирования, m_0				
		0	0,13	0,25	0,36	0,46
32	900	912	1 002	1 122	1 194	1 324
	1 000	812	839	963	1 040	1 090
	1 100	718	784	840	921	980
	1 200	641	690	756	814	841
58	900	1 200	1 220	1 430	1 582	1 610
	1 000	1 120	1 180	1 210	1 361	1 060
	1 100	1 000	1 040	1 120	1 200	1 280
	1 200	880	963	1 040	1 120	1 190
76	900	1 580	1 610	1 830	2 010	2 380
	1 000	1 410	1 530	1 640	1 720	1 920
	1 100	1 280	1 330	1 410	1 580	1 640
	1 200	1 120	1 200	1 280	1 410	1 550

При этом интенсивность уменьшения среднего усилия выдавливания заготовки, выражающаяся показателем экспоненциальной зависимости β , как показали эксперименты, может быть определена из следующего соотношения:

$$\beta = m_0 \beta_1 + (1 + m_0) \beta_2, \quad (2.44)$$

где β_1, β_2 — показатели экспоненциальной зависимости сталей Р6М5 и 40Х соответственно;

m_0 — коэффициент плакирования.

В соответствии с пропорциональной зависимостью ($P_{\text{ср}} = f(m_0)$), выражение для определения средних рабочих напряжений выдавливания биметаллических образцов с заданным объемным содержанием плакирующего слоя для случая, когда наружный слой имеет больший предел прочности, будет иметь вид:

$$P_{\text{ср}} = \left[m_0 \frac{S_1}{S_2} + (1 - m_0) \right] P_2, \quad (2.45)$$

где P_2 — среднее рабочее напряжение выдавливания заготовки из стали 40Х, имеющей равновеликое с биметаллической заготовкой сечение;

S_1, S_2 — сопротивление деформации при выдавливании стали Р6М5 и стали 40Х соответственно.

Таким образом, разработанный в Физико-техническом институте НАН Беларуси метод горячего выдавливания [32] может быть применен для изготовления всей номенклатуры концевой режущего инструмента, включая метчики, сверла, фрезы, развертки и т. д. Сущность технологического процесса с применением этого метода заключается в замене операции фрезерования профильной части инструмента горячим выдавливанием через профильные матрицы.

Использование технологии, основанной на формообразовании пластическим деформированием, дает возможность при относительно низких отходах металла в стружку получать заготовки инструмента по форме, близкой к готовому, и одновременно дополнительно улучшить структурные и механические свойства изготавливаемого инструмента. Использование биметаллических концевых

инструментов позволит существенно экономить дорогостоящие быстрорежущие стали. Наиболее полно технико-экономические возможности процесса горячего выдавливания могут быть реализованы в условиях крупносерийного и массового производства инструмента.

2.5 Износостойкие покрытия в инструментальном производстве

Одним из наиболее распространенных и эффективных направлений совершенствования режущих инструментов (РИ) является модификация их рабочих поверхностей, заключающаяся в направленном изменении физико-механических и кристаллохимических свойств поверхности и поверхностного слоя. При большом разнообразии условий работы РИ практически всегда наиболее нагружен их поверхностный слой, свойства которого в первую очередь определяют работоспособность РИ в процессе резания.

В зависимости от вида РИ и условий резания характер тепловых нагрузок весьма разнообразен. Для того, чтобы противостоять им, рабочие поверхности РИ должны иметь высокие показатели твердости, теплостойкости и т. д. Однако не созданы универсальные инструментальные материалы, обеспечивающие высокую надежность РИ при разнообразном характере нагружения его рабочих поверхностей. Модификация рабочих поверхностей позволяет создать РИ, обладающие уникальным сочетанием на первый взгляд противоречивых свойств — высокой прочностью и твердостью.

Использование современных высокопроизводительных и дорогостоящих металлорежущих станков, оснащенных системами ЧПУ и адаптивного управления, особенно в условиях гибких автоматизированных производств и мехатронных станочных систем, повышает требования, предъявляемые к качеству и надежности режущего инструмента. При этом инструментальный материал должен одновременно обладать достаточным запасом прочности при сжатии и изгибе, приложении ударных импульсов и знакопеременных напряжений.

Перечисленные свойства обычно являются взаимоисключающими, и для создания РИ с комплексом указанных свойств на поверхности и в объеме тела в настоящее время используют различного рода износостойкие покрытия (ИП).

На рисунке 2.13 схематически показано разнообразие влияния износостойких покрытий на свойства режущего инструмента и параметры процесса резания.

По своему химическому составу и физико-механическим характеристикам износостойкие покрытия на основе титана, наносимые на рабочие поверхности РИ, имеют существенные различия. Однако эффекты, которые могут быть достигнуты при их использовании, схожи и связаны с улучшением наиболее важных показателей эффективности (выходных параметров) процесса резания. Изменение свойств поверхности и поверхностного слоя РИ проявляется в повышении микротвердости и теплостойкости, а также изменении шероховатости его рабочих поверхностей, уменьшении адгезионного взаимодействия с материалом заготовки, создании оптимальных напряжений.

Изменение функциональных и физических параметров процесса резания заключается в уменьшении длины контактных площадок на рабочих поверхностях РИ, а также в снижении коэффициента трения, составляющих сил резания, мощности тепловых источников и интенсивности наростообразования.

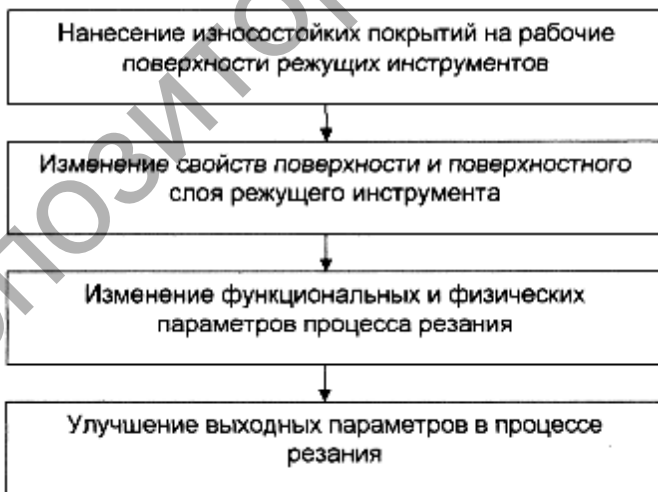


Рисунок 2.13 — Эффекты, достигаемые в результате нанесения износостойких покрытий на рабочие поверхности РИ

Изменение выходных параметров процесса резания состоит в сокращении расхода РИ благодаря повышению его стойкости, в уменьшении требуемой мощности и количества СОЖ, в повышении производительности обработки, а также в точности и качестве изделий.

Улучшение выходных параметров процесса резания является следствием изменения его функциональных и физических параметров, которое в свою очередь обусловлено изменением физико-механических и кристаллохимических свойств поверхности и поверхностного слоя РИ в результате нанесения покрытия.

Состав покрытия следует выбирать исходя из анализа нагрузок, действующих на РИ в процессе резания, и свойств обрабатываемого материала. Одно и то же покрытие в одних условиях эксплуатации РИ может обеспечить существенное увеличение его стойкости, а в других — даже показать отрицательный эффект. Рассмотрим подробнее особенности различных вакуумно-дуговых покрытий на основе титана.

2.5.1 Покрытие нитрид титана TiN (титан, азот)

Это покрытие первым получило широкое применение. Этому способствовали относительно простая технология его получения, невысокая стоимость исходных материалов (титан почти на порядок дешевле остальных тугоплавких металлов, азот — наиболее доступен, дешев и безопасен по сравнению с другими реакционными газами) и самое главное — высокие эксплуатационные характеристики. Микротвердость такого покрытия может изменяться в пределах $H_c = 20 \dots 40$ ГПа и зависит главным образом от давления азота в вакуумной камере в процессе осаждения. Наиболее устойчивы к различным видам изнашивания монофазные покрытия TiN с $H_c \approx 25$ ГПа, содержание азота в которых близко к 40%.

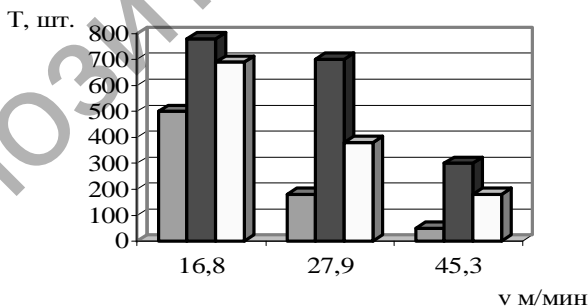
Высокая химическая пассивность TiN существенно снижает адгезионное взаимодействие рабочих поверхностей РИ с материалом заготовки и значительно уменьшает длину контакта стружки и заготовки с передней и задней поверхностями. В результате практически полностью блокируется развитие лунки износа на передней поверхности и замедляется развитие фаски износа по задней поверхности.

Одновременно уменьшаются составляющие сил резания и мощности источников теплоты. При работе РИ с покрытием TiN наблюдается тенденция к снижению интенсивности наростообразования, вследствие чего достигается лучшее качество обработанной поверхности.

Данное покрытие достаточно универсально и может успешно применяться на РИ различных типов в условиях адгезионно-усталостного и абразивного изнашивания при обработке большинства материалов (конструкционных сталей, чугунов, бронз и т. д.). Эффективность этого покрытия значительно снижается при резке вязких хромоникелевых сталей, титановых и алюминиевых сплавов.

Из рисунка 2.14 видно, что нанесение покрытия TiN на сверла Р6М5 позволяет существенно увеличить их стойкость при обработке конструкционных сталей. Эффект повышения стойкости возрастает по мере увеличения скорости резания. При низких скоростях резания (16,8 м / мин) увеличение стойкости относительно невелико (в 1,6 раза); при этом переточка по задней поверхности существенно не снижает стойкости сверл с покрытием. При повышении скорости резания (до 45,3 м / мин) средняя стойкость сверл с покрытием TiN существенно возрастает (до 6 раз) по сравнению со сверлами без покрытия.

Весьма эффективны покрытия TiN на дорогостоящих фасонных РИ, форма которых определяет размеры детали (червячные фрезы, долбяки,



1 — без покрытия; 2 — покрытие TiN ;
3 — покрытие TiN + переточка по задней поверхности

Рисунок 2.14 — Стойкость T сверл из стали Р6М5 при обработке отверстий диаметром 6,35 мм в конструкционной стали на различных скоростях резания при подаче 0,11 мм / об с охлаждением

фасонные резцы и протяжки). Их перетачивают в основном по передней поверхности. Износ по задней поверхности таких РИ с покрытиями примерно в 3 раза меньше, чем у РИ без покрытия, т. е. покрытие позволяет значительно увеличить число переточек до полного износа. Эти режущие инструменты после нанесения покрытия TiN намного эффективнее работают при повышенных скоростях резания.

2.5.2 Покрытие карбонитрид титана TiCN

Покрытие формируется при напуске в вакуумную камеру смеси азота с ацетиленом или метаном в процессе охлаждения покрытия. Микротвердость покрытия зависит от состава и давления реакционной смеси в процессе охлаждения; она повышается с увеличением содержания ацетилена и может превысить 42 ГПа. Одновременно с этим растет и хрупкость покрытия. Реально для повышения износостойкости РИ применяют покрытия TiCN с микротвердостью $H_{\mu} = 27 \dots 30$ ГПа.

Критическая нагрузка, характеризующая прочность адгезионной связи покрытия с основой, зависит от свойств основы, но независимо от материала основы она всегда ниже, чем аналогичный показатель для покрытия TiN. Однако коэффициент трения у покрытия TiCN меньше, чем у покрытия TiN.

При нагреве покрытий TiCN на воздухе их окисление начинается при температуре $t = 365 \dots 400^{\circ}\text{C}$; область их предпочтительного применения — режущие инструменты, работающие на низких и средних скоростях резания при обработке конструкционных сталей и цветных металлов.

2.5.3 Покрытие (Ti, Al)N

В настоящее время покрытие (Ti, Al)N является одним из наиболее перспективных. При сохранении высоких физико-механических характеристик нитрида титана оно обладает дополнительным свойством: при нагреве на воздухе его поверхность покрывается плотным слоем оксида алюминия, который препятствует окислению и адгезионному взаимодействию поверхности РИ с обрабатываемым материалом.

Такое покрытие обладает повышенными стойкостью к окислительному износу и теплостойкостью по сравнению с другими покрытиями; оно создает тепловой барьер, практически изолирующий инструментальный материал, в результате чего тепловые потоки перераспределяются, и большая часть теплоты уносится из зоны резания со стружкой.

Микротвердость покрытий $(\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x)\text{N}$ находится в пределах 10...42 ГПа и растет с увеличением содержания Al, достигая максимума при ≈ 60 мол. % AlN, а после 75 мол. % AlN микротвердость значительно снижается (до 10 ГПа).

При нагреве на воздухе покрытие $(\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x)\text{N}$ сохраняет кубическую структуру до 750°C при $x = 0,25$ и до 830°C при $x = 0,6$. Высокие температуры вызывают диффузию алюминия на поверхность покрытия, в результате чего образуется аморфный слой Al_2O_3 , который защищает покрытие от окисления, в то время как слой, образующийся при окислении покрытия TiN, такой защиты не обеспечивает. Кроме того, оксиды Al значительно более стабильны, чем оксиды титана.

Дополнительно повысить стойкость к окислению покрытия $(\text{Ti}, \text{Al})\text{N}$ можно путем введения в его состав небольшого количества хрома и иттрия.

Например:

- покрытие $(\text{Ti}_{0,46}\text{Al}_{0,54})\text{N}$ окисляется при $t = 870^\circ\text{C}$;
- покрытие $(\text{Ti}_{0,44}\text{Al}_{0,53}\text{Cr}_{0,03})\text{N}$ окисляется при $t = 920^\circ\text{C}$;
- покрытие $(\text{Ti}_{0,43}\text{Al}_{0,52}\text{Cr}_{0,03}\text{Y}_{0,02})\text{N}$ окисляется при $t = 950^\circ\text{C}$.

Указанные особенности покрытия $(\text{Ti}, \text{Al})\text{N}$ определяют область его предпочтительного применения — обработка с большими тепловыми нагрузками. К таким операциям относятся:

- практически любая высокопроизводительная обработка;
- обработка материалов с низкой теплопроводностью (коррозионно-стойкие стали, титановые и никелевые сплавы и т. п.).

Данное покрытие как на твердосплавном, так и на быстрорежущем РИ эффективно при обработке твердых материалов (закаленных подшипниковых сталей), в том числе без применения СОЖ. На рисунке 2.15 показана зависимость стойкости сверл с покрытием TiN и $(\text{TiAl})\text{N}$ от скорости резания на операции сверления отверстия в сером чугуна.

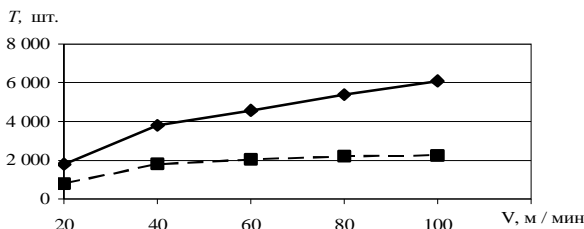


Рисунок 2.15 — Зависимость стойкости у сверл из твердого сплава ВК6 с покрытиями TiN и (Ti Al) N от скорости резания при обработке отверстий диаметром 8 мм в сером чугуне (при подаче $S0 = 0,2$ мм/

Из рисунка видно, что стойкость сверла возрастает с увеличением скорости резания для обоих покрытий, однако эта тенденция больше выражена для покрытия (Ti Al)N.

2.5.4 Покрытие (Ti, Cr)N

Покрытие применяют главным образом для повышения стойкости РИ при обработке сталей аустенитного класса, а также хромоникелевых и титановых сплавов. Оно эффективно также при обработке малолегированных сталей и увеличивает стойкость РИ в большей степени, чем покрытие TiN. Поскольку присутствие хрома способствует росту пластичности, оно эффективно в условиях ударно-циклических нагрузок и больших сечениях срезаемого слоя.

Эксплуатационные испытания РИ из быстрорежущих сталей и твердых сталей с покрытием (Ti, Cr)N показывают, что их стойкость значительно выше, чем у таких же РИ с покрытием TiN. При этом результаты сильно зависят от состава покрытия и типа обрабатываемых материалов.

Например, стойкость твердосплавных пластин с покрытием (Ti, Cr)N при точении конструкционных сталей максимальна при соотношении $Ti / Cr \approx 90 / 10$; при точении коррозионно-стойких сталей и сплавов на никелевой основе оптимальное соотношение составляет $\approx 80 / 20$, а при обработке титанового сплава ВТ-20 наилучшие результаты были получены при соотношении $25 / 75$.

При точении труднообрабатываемых сплавов (ХН70ТЮР, ХН77ВМТЮР, 13Х11Н2В2МФ) стойкость пластин из твердого сплава ВК6 с покрытием (Ti, Cr)N возрастает в среднем в 2—3 раза по сравнению со стойкостью пластин без покрытия.

2.5.5 Покрытие (Ti, Mo)SN

Это покрытие обладает наименьшим коэффициентом трения из всех рассмотренных выше покрытий, поэтому предпочтительная область его применения — обработка материалов, склонных к налипанию на РИ. Кроме того, это покрытие является альтернативой СОЖ, содержащим вредные для окружающей среды компоненты.

Известно, что дисульфид молибдена обладает минимальным коэффициентом трения (до 0,05). MoS_2 представляет собой пластинчатую структуру, в которой атом молибдена окружен со всех сторон атомами серы. Связи между такими пластинками поддерживаются только силами Ван-дер-Ваальса, поэтому они в процессе резания легко скользят относительно друг друга и переходят на поверхность контртела. Вместе с тем MoS_2 обладает небольшой твердостью (≈ 5 ГПа) и низкой износостойкостью.

Для улучшения этих показателей создают многослойные покрытия, состоящие из тонких чередующихся слоев MoS_2 и соединений TiN, TiB₂, Al₂O₃, или однослойные композиты при одновременном осаждении этих соединений и MoS_2 . Такие покрытия характеризуются достаточно низким коэффициентом трения (0,02...0,1) при высокой твердости (15...35 ГПа).

Исследования показывают, что нанесение износостойких покрытий на основе титана, содержащих MoS_2 , на сверла, концевые фрезы и другие РИ способствуют значительному увеличению их стойкости, а также позволяют сократить применение СОЖ или вовсе отказаться от них.

3 ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИИ ИЗДЕЛИЙ

В процессе разработки конструкции машины конструктор придает ей не только необходимые свойства, выражающие полезность будущего изделия, но и свойства, определяющие уровень затрат ресурсов на его создание, изготовление и ремонт.

Технологичность конструкции изделия (ТКИ) — совокупность свойств изделия, определяющих приспособленность его конструкции к достижению оптимальных затрат ресурсов при производстве и эксплуатации для заданных показателей качества, объема выпуска и условий выполнения работ.

Технологичность конструкции изделия выражает не функциональные свойства изделия, а его конструктивные особенности:

- состав и взаимное расположение его узлов;
- форму и расположение поверхностей деталей и соединений;
- их состояние, размеры, материалы и т. д. (рис. 3.1).

Конструктивное исполнение изделия во многом определяет такие его свойства, как функциональность, надежность, экономичность, эстетичность, безотказность, безопасность и экологичность.

Оценка ТКИ подразумевает комплекс взаимосвязанных мероприятий, включающих последовательное выявление ТКИ в целом или отдельных рассматриваемых ее свойств, сопоставление выявленных свойств данного изделия со свойствами изделия, конструкция которого принята в качестве базы для сравнения, и представление результатов сопоставления в форме, приемлемой для принятия управленческих решений по совершенствованию конструкции разрабатываемого



Рисунок 3.1 — Структура ТКИ

изделия. Основные задачи, решаемые при анализе технологичности, сводятся к возможному уменьшению трудоемкости и металлоемкости, возможности обработки детали высокопроизводительными методами. Таким образом, улучшение технологичности конструкции позволяет снизить себестоимость изготовления изделия без ущерба для служебного назначения.

В зависимости от используемых методов различают качественную и количественную оценку ТКИ.

3.1 Качественная оценка ТКИ

Оценка основана на инженерно-визуальных методах и производится по отдельным конструктивным и технологическим признакам для достижения высокого уровня ТКИ. Анализ технологичности целесообразно проводить в определенной последовательности по:

- применяемым материалам (следует учитывать их обрабатываемость, стоимость и возможность получения, а также возможность замены на другой более дешевый материал или повышение физико-механических свойств имеющегося);
- рациональности геометрической формы (обрабатываемые поверхности должны быть простыми: плоскими, цилиндрическими, конусными, винтовыми и т. п.);
- точности и качеству обрабатываемых поверхностей (положительным фактором является наличие возможно большего количества поверхностей детали, не требующих обработки резанием);
- коэффициенту использования материала и по рациональности получения заготовки с максимально возможным приближением ее формы и размеров к форме и размерам готовой детали;
- количеству унифицированных элементов конструкции детали;
- совмещению конструкторских, технологических и измерительных баз;
- применяемому режущему инструменту;
- обоснованности требований к точности размеров и шероховатости поверхности.

Качественная оценка технологичности конструкции детали характеризуется показателями: технологична, не технологична и частично технологична.

3.2 Количественная оценка ТКИ

Она основана на инженерно-расчетных методах, посредством которых определяют и сопоставляют различным путем численные значения показателя ТКИ проектируемого изделия и соответствующего показателя конструкции изделия, принятой в качестве базы для сравнения.

В процессе разработки количественной оценки изделия используют разнообразные показатели ТКИ. Номенклатуру показателей и методику их определения устанавливают в зависимости от вида изделия, типа производства и стадии разработки конструкторской документации. Выбор показателей технологичности проводят с учетом требований ГОСТ 14.201-83. При этом число показателей должно быть минимальным, но достаточным для оценки технологичности.

Показатели ТКИ подразделяют на виды в зависимости от исходного признака. Все их многообразие можно свести к семи группам показателей:

- 1) технологическая рациональность конструкции изделия;
- 2) преемственность конструкции изделия;
- 3) ресурсоемкость изделия;
- 4) производственная ТКИ;
- 5) эксплуатационная ТКИ;
- 6) ремонтная ТКИ;
- 7) общая ТКИ.

К *первой группе* показателей относятся коэффициенты сложности конструкции изделия, собираемости, доступности мест обслуживания, контролепригодности и т. д. Показателями *второй группы* являются следующие коэффициенты:

- новизны конструкции изделия;
- применяемости унифицированных или стандартных составных частей изделия (деталей, сборочных единиц);
- применяемости унифицированных конструктивных элементов деталей (резьб, галтелей, фасок, проточек, отверстий и т. д.);
- применяемости материала в изделии;
- типизации конструктивного исполнения и т. д.

Показатели *третьей группы* отражают комплексную общую или частичную единичную ресурсоемкость (материалоемкость,

энергоёмкость и т. д.). Показатели ресурсоёмкости используют преимущественно для определения затрат ресурсов (труда, материалов, энергии, времени и др.).

Показатели ТКИ *четвертой—седьмой групп* образованы исключительно показателями ресурсоёмкости с учетом рассматриваемых областей проявления.

По значимости для оценки ТКИ различают основные и дополнительные показатели.

Основные показатели характеризуют наиболее важные, самые существенные свойства, входящие в ТКИ и выражающие ее в целом — это трудоёмкость, материалоемкость, энергоёмкость, продолжительность изготовления (эксплуатации, ремонта), себестоимость изготовления.

Дополнительные показатели характеризуют технологическую рациональность и преимущество конструкции изделия применительно к отдельным областям проявления ТКИ. Дополнительные показатели позволяют эффективно и целенаправленно совершенствовать конструкцию изделия в процессе проектирования для последующего улучшения основных показателей ТКИ.

3.3 Основные показатели ТКИ

Рассмотрим следующие основные показатели ТКИ:

1) трудоёмкость изготовления T_d :

$$T_d = \sum_{i=1}^n t_{шт,i},$$

где n — число операций в маршруте изготовления детали;

$t_{шт,i}$ — штучное время изготовления детали при выполнении операций, в час;

2) технологическая себестоимость детали (изделия) C_T

$$C_T = M_o + 3_o + Ц,$$

где M_0 — стоимость основных материалов за вычетом стоимости реализуемых отходов, р.;

Z_0 — заработная плата основных производственных рабочих, р.;

Π — цеховые расходы (или расходы предприятия), р.

3) уровень технологичности по трудоемкости изготовления детали $K_{у.т.д}$

$$K_{у.т.д} = \frac{T_{д.д}}{T_{б.д}}, \quad (3.3)$$

где $T_{д.д}$ — трудоемкость изготовления детали (изделия), час;

$T_{б.д}$ — трудоемкость базового (заводского или отраслевого) варианта изготовления детали (изделия), час;

4) уровень технологичности по себестоимости изготовления детали (изделия) $K_{у.с.д}$

$$K_{у.с.д} = \frac{C_{т.д.д}}{C_{т.б.д}},$$

где $C_{т.д.д}$ — технологическая себестоимость изготовления детали (изделия), р.

$C_{т.б.д}$ — технологическая себестоимость базового варианта изготовления детали (изделия), р.

3.4 Дополнительные показатели ТКИ

Количественная оценка технологичности конструкции изделия осуществляется также по следующим дополнительным показателям:

1) коэффициенту унификации конструктивных элементов по формуле

$$K_{у.э} = Q_{у.э} / Q_э,$$

где $Q_{у.э}$ — число унифицированных конструктивных элементов;

$Q_э$ — общее число конструктивных элементов;

2) коэффициенту применяемости стандартизированных инструментов для обработки поверхностей по формуле

$$K_{ст} = D_{о.с} / D_{м.о.}$$

где $D_{о.с}$ — число поверхностей детали, обрабатываемых стандартным инструментом;

$D_{м.о}$ — общее число поверхностей, подвергаемых механической обработке;

3) коэффициенту обработки поверхностей по формуле

$$K_{о.п} = 1 - D_{м.о} / D_{п},$$

где $D_{м.о}$ — число поверхностей детали, подвергаемых механической обработке;

$D_{п}$ — общее число поверхностей детали;

4) коэффициенту использования материалов по формуле

$$K_{исп} = M_{д} / M_{з},$$

где $M_{д}$ — масса детали, кг;

$M_{з}$ — масса заготовки;

5) максимальному значению качества обработки IT ;

6) максимальному значению параметра шероховатости обрабатываемых поверхностей по Ra ;

7) массе детали $M_{д}$;

8) коэффициенту применимости типовых технологических процессов при изготовлении данной детали (получения заготовки; механической термической и другой обработки) по формуле

$$K_{тип.п} = Q_{т.п} / Q_{о};$$

где $Q_{т.п}$ — число типовых технологических процессов для изготовления детали;

$Q_{о}$ — общее число технологических процессов;

9) уровню (коэффициент) технологичности конструкции по использованию материала по формуле

$$K_{техн} = K_{исп.баз} / K_{исп},$$

где $K_{\text{исп. баз}}$ — базовый коэффициент использования материала;
 $K_{\text{и. м}}$ — достигнутый коэффициент использования материала.
 10) коэффициенту точности обработки детали по формуле

$$K_{\text{точн}} = 1 - 1/A,$$

где A — средний квалитет точности детали, который вычисляется следующим образом:

$$A = \frac{5n_5 + 6n_6 + 7n_7 + \dots + in_i}{n_5 + n_6 + n_7 + \dots + n_i},$$

где n_i — число размеров квалитета i ;
 5, 6, 7... — квалитеты;

11) коэффициенту шероховатости обработки поверхностей:

$$K_{\text{ш.д.}} = \frac{1}{B},$$

где B — средняя шероховатость поверхностей, рассчитывается следующим образом:

$$B = \frac{0,63k_1 + 1,25k_2 + 3k_3 + \dots + ik_i}{k_1 + k_2 + k_3 + \dots + k_i},$$

где k_i — число поверхностей соответствующего класса шероховатости;

0,63; 1,25; 3 — показатели шероховатости.

Если уровень технологичности изделия больше единицы, то это означает, что по данному показателю принятые технические решения привели к повышению технологичности конструкции изделия по сравнению с ее базовой конструкцией. Следовательно, эти решения являются экономически целесообразными.

4 СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ОБЛАСТИ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ

4.1 Автоматизированные производства и средства автоматизации

Большинство современного оборудования приспособлено для работы в составе автоматизированных участков, цехов и заводов. Автоматизированные производства передовых стран обеспечивают колоссальную выработку на одного работающего, зачастую превышающую миллион долларов США на одного работника. Это обеспечивает конкурентоспособность (при высоком уровне заработной платы) даже с Китаем и другими странами с низким уровнем зарплаты, кроме того, обеспечивается не зависящее от человека качество продукции.

Часто автоматизированные производства интегрируются с информационными системами предприятий. В этом случае станки выполняют множество новых функций, таких как:

- автоматическая диагностика;
- «самоисцеление»;
- мониторинг состояния инструмента (ресурс, исправность, наличие в магазине дублирующего инструмента);
- сообщение о неисправности станков;
- сообщение о начале и завершении обработки детали;
- сообщение о поступлении или не поступлении на станок заготовок и т. п., т. е. выполнение диспетчерских обязанностей в автоматическом режиме.

С помощью транспортных систем станки обмениваются заготовками для полной обработки и получения законченных изделий, а также обеспечивается поступление готовых деталей на склад или на сборку. Различные транспортные системы, а именно, транспортеры, напольные роботы для обслуживания нескольких станков и т. д. являются важнейшим элементом «безлюдных» производств. Гибкость линии обеспечивается новыми стандартными функциями, направленными на бесперебойную работу и хорошую производственную среду. Роботы могут выполнять как функции загрузочных устройств автоматизированных станков, так быть и самостоятельными

производственными единицами, осуществляющими сборку и обработку деталей (сварку, плазменную резку и т. д.). Транспортные системы могут быть изготовлены собственными силами или приобретены у специализирующихся на них фирмах.

Например, завод Fanuc (Япония), производящий электродвигатели для приводов подач и главного привода станков, был создан еще в конце 70-х годов прошлого столетия, но постоянно совершенствуется. В настоящее время завод оборудован самой современной автоматизированной робототехнической системой. Все рабочие процессы — от производства деталей электромоторов, сборки, испытаний упаковки для отгрузки автоматизированы с использованием роботов. Производственная мощность завода — 80 000 двигателей и приблизительно 2 000 других изделий (комплектующих) в год. Следует отметить, что фирма Fanuc начала первой в мире строить автоматические заводы и достигла очень больших успехов, так как все ее предприятия (а их более 10) очень широко применяют «безлюдные» технологии и в этом отношении она является мировым лидером.

Компания Mazak (Япония) выпускает роботы, позволяющие автоматизировать замену инструмента в магазине обрабатывающего центра. На станках фирмы Mazak интеллектуальный робот этой же фирмы осуществляет автоматическую загрузку инструмента в магазин обрабатывающего центра. Робот обладает техническим зрением, а также с помощью специального устройства считывает код из чипа, встроенного в инструмент, и со 100%-й точностью устанавливает этот инструмент в магазин станка, а также извлекает из него лишний или изношенный инструмент. Таким образом, человек необходим только для профилактического обслуживания станка (замены масла и СОЖ, ремонта и т. п.). Данная фирма является крупнейшим в мире изготовителем и создателем новых технологий автоматизации производства.

Кроме вышеуказанных достоинств, современные станки отличаются высоким качеством дизайна, который с одной стороны направлен на эстетическое воспитание, а с другой — является важным маркетинговым ходом. Сегодняшний девиз производителей технологического оборудования следующую: «Красивый станок — высококачественный станок».

4.2 Автоматические многошпиндельные и многопозиционные станки

На современных выставках технологического металлообрабатывающего оборудования в больших количествах представляются многошпиндельные станки, что опровергает утверждение, что век многошпиндельных автоматов проходит.

Например, одна из самых известных фирм — производитель многошпиндельных автоматов Index (Германия). Ею выпускается шестишпиндельный автомат с ЧПУ модель MS32 Compact с грузочно-разгрузочным роботом и противошпинделем для обработки обратной стороны детали. Причем во всех шести позициях обработка ведется двумя суппортами — некоторые из них могут быть оснащены несколькими инструментами (всего в 12 суппортах можно установить 18 инструментов), в том числе приводных. Количество программируемых осей может достигать 62 (рис. 4.1).

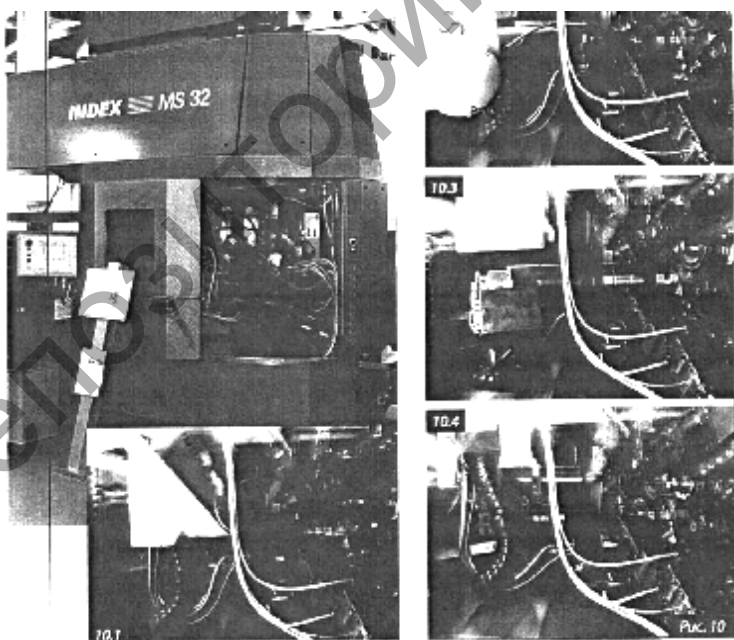
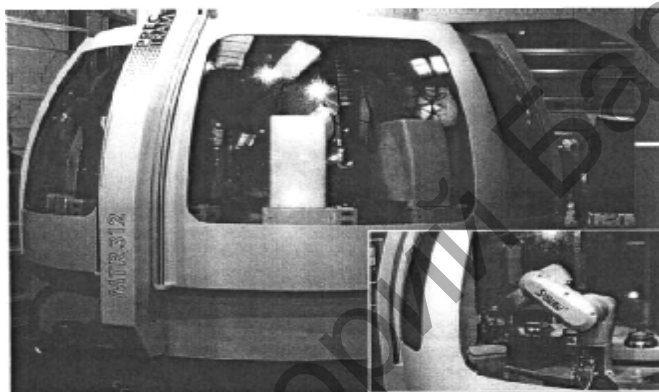


Рисунок 4.1 — Общий вид станка модели MS 32 (фирма Index, Германия)

Этот многошпиндельный автомат с ЧПУ можно считать наиболее приспособленным для «безлюдных» технологий. Он может быть легко перенастроен на выпуск другой детали, может работать с прутковым материалом и штучными заготовками.

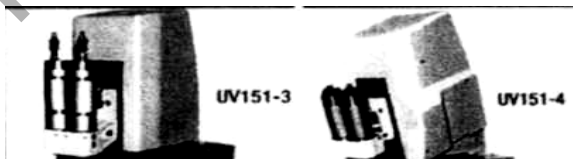
В настоящее время к многопозиционным станкам, кроме общепринятых, относят роторные автоматические линии (рис. 4.2) и агрегатные станки, которые ранее относились к оборудованию с жестким технологическим циклом. В настоящее время новые конструкции



a)



б)



в)

Рисунок 4.2 — Общий вид (*a*) и схемы работы (*б* и *в*) роторной автоматической линии

позволяют произвести переналадку автоматической линии или агрегатного станка на производство новой детали за несколько часов, меняя приспособления и головки с режущими инструментами.

Кроме того, у потребителя есть возможность по принципу, известному из детского конструктора «LEGO», собрать за несколько часов свою роторную линию или агрегатный станок из готовых узлов. Фирмы, специализирующиеся на производстве подобных узлов, есть как в Европе, так и в Юго-Восточной Азии.

Например, Фирма Comex (Франция) предлагает широкую номенклатуру узлов-«кубиков» для сборки различных роторных линий с ЧПУ и агрегатных станков (рис. 4.3). Каждый узел функционально независим от других и может комбинироваться с другими (например, шпиндель с салазками для продольного перемещения или салазками с крестовым перемещением). Линейные перемещения могут задаваться от пневматической или гидравлической систем, а также от электропривода. Объединенные с помощью системы управления и какой-либо транспортной системы или индексного стола, эти узлы могут образовывать автоматические линии роторного или линейного типа, которые могут быть легко переналажены на производство другой продукции.

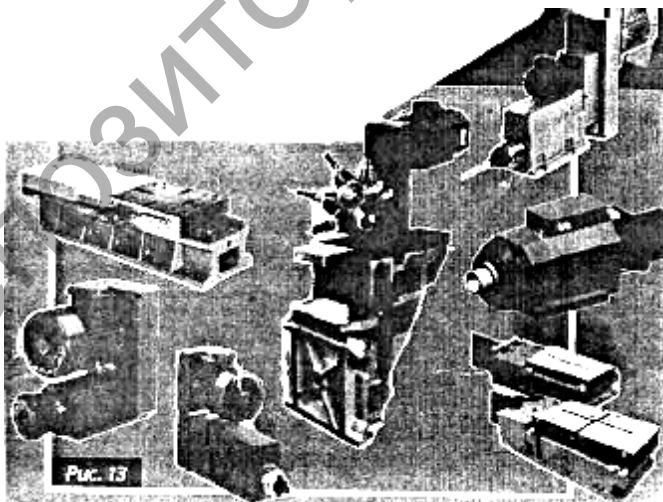


Рисунок 4.3 — Агрегатные станки фирмы Comex (Франция)

Фирма Murata Machinery Ltd. (Япония) предлагает на рынке станок модель MD120— это высокопроизводительный прецизионный токарный станок с ЧПУ, который оснащен двумя параллельными шпиндельными бабками и двумя револьверными головками, и с интегрированным в корпус порталным загрузчиком. В конструкции станка реализована концепция перемещающейся шпиндельной бабки (ось z) и независимо перемещающийся инструмент (ось x) (рис. 4.4).

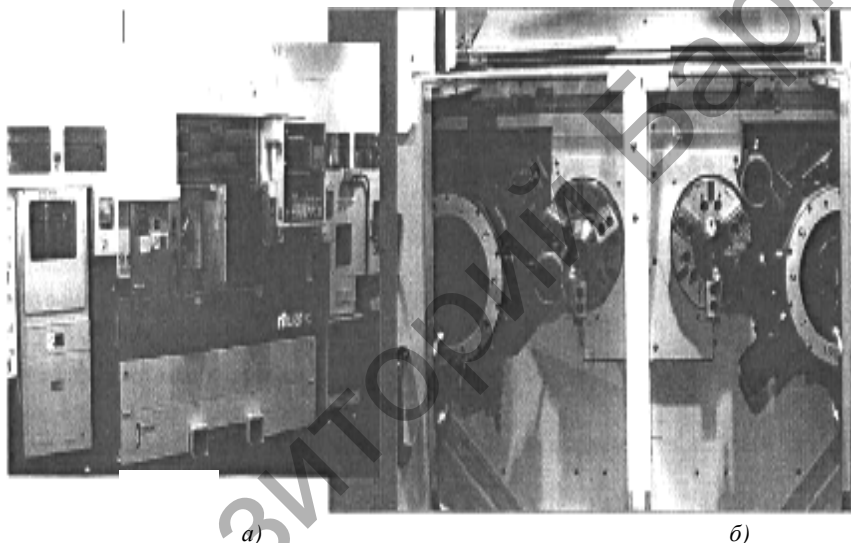


Рисунок 4.4 — Общий вид (а) и шпиндельный узел (б) токарного двухшпиндельного станка фирмы Murata (Япония)

Этот станок приспособлен для различных токарных работ, таких как синхронное точение или обработка передней и задней сторон детали с переворотом.

Одной из современных новинок является токарный обрабатывающий центр модели SPRINT 50 Linear концерна DMG Германия (рис. 4.5) с линейными приводами с противошпинделем и тремя 12-позиционными револьверными головками.

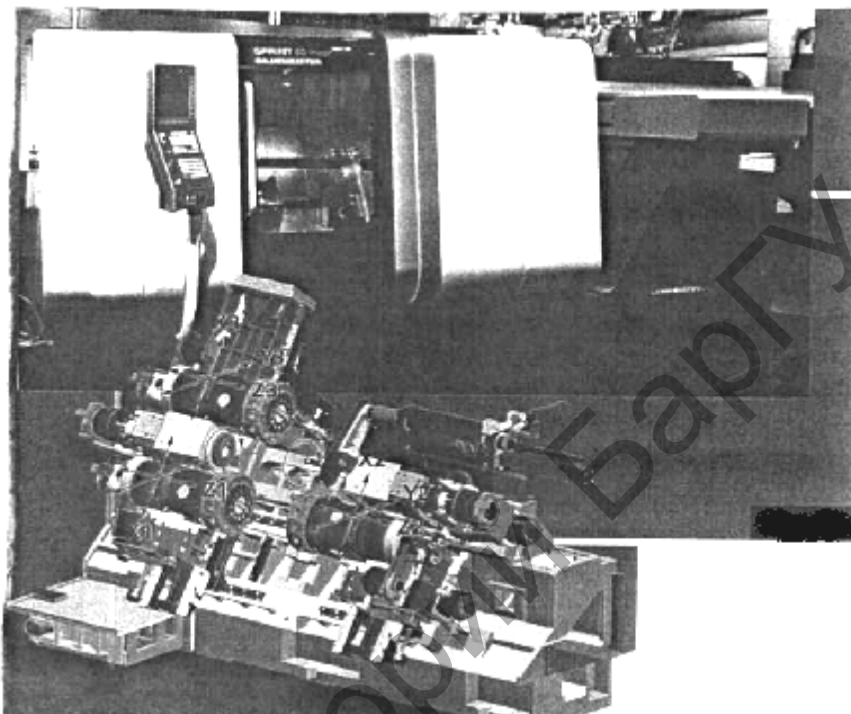


Рисунок 4.5 — Токарный обрабатывающий центр SPRINT 50 Linear (Германия)

Все рассмотренные конструкции станков предназначены для того, чтобы совершать все токарные операции и очень часто еще и сверлильно-фрезерные на одном станке за одну установку. А компоновки станков с противопинделем сегодня стали классическими.

4.3 Комбинированные станки

Максимальное стремление получить окончательно обработанную деталь за одну установку привело к созданию комбинированных станков, выполняющих ранее не объединяемые операции, такие как токарные и лазерные (упрочнение поверхностных слоев, сварка, маркировка, вырезание сложных отверстий и т. д.), токарные

и шлифовальные, токарные и сверлильно-фрезерно-расточные, а также измерительные.

Подобные станки являются перспективными, а при снижении цены на лазеры их применение в металлообработке на комбинированных станках должно быть более широким. Сегодня эти станки выглядят некоторой экзотикой, но эксперименты в этой области продолжаются и позволяют зачастую осуществить изготовление деталей, недоступных для других методов обработки.

Подобные комбинированные станки выпускают в Германии (Unicen 504, фирма Monforts; Lasertec, концерн DMG; NG 200, фирма Bochringer) и в Японии (Integrex 200-IV, фирма Mazak).

Проанализировав всю вышеизложенную информацию, можно сделать вывод, что современные конструкции технологического оборудования можно охарактеризовать как эволюционные, а не революционные. В основном применяются технические усовершенствования (в большей или меньшей степени) и почти отсутствуют принципиально новые технологии.

5 МОДЕРНИЗАЦИЯ МЕХАНООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

5.1 Состояние вопроса

Выпущенные ранее отечественные и зарубежные станки, установленные на российских и белорусских предприятиях, отстают от лучших современных аналогов по производительности в 1,5—4,0 раза, по точности в 1,3—6,5 раза. Это объясняется тем, что большинство моделей станков, установленных на предприятиях, эксплуатируются более 20 лет.

В 2001—2007 годах продолжал расти импорт высокоэффективного оборудования, чему способствовала инвестиционная активность по отдельным направлениям машиностроения (энергетика, авиа- и автомобилестроение) и оборонно-промышленного комплекса. Причина роста импорта также в том, что в отдельных случаях внутренние цены на российские станки требуемого технического уровня приблизились к ценам зарубежных аналогов. При

этом отечественные предприятия редко обеспечивают надлежащий уровень отладки и последующего сервиса оборудования, что в современных условиях также приводит к неконкурентоспособности.

Поэтому отечественные машиностроительные предприятия все больше закупают импортные станки, предпочитая их российскому металлообрабатывающему оборудованию.

Учитывая это, многие зарубежные экспортеры станков создали в России и Беларуси широко разветвленную маркетинговую, товаропроводящую и сервисную сеть с эффективными демонстрационными залами, учебными центрами, складами запасных частей. К крупнейшим представительствам следует отнести «АБАМЕТ» (Ablanalp), ГАЛИКА (Galika AG), DMG, «ФИНВАЛ», «ПЕРГАМ», Sodick, Thyssen Krupp, Schleifring и ряд других, каждое из которых представляет интересы нескольких западных и / или азиатских станкостроительных фирм различной специализации. Отечественные предприниматели также не остались в стороне от этого перераспределения инвестиций. Большой объем импорта осуществляется при посредничестве таких фирм, как «Дюкон», «ИЛК-инжиниринг», «С.Т.Маркет», «ИНТЕРКОС-Тулинг», «Ирлен-Инжиниринг», «ИрленРос», «Линарес», «МЕГАТУЛС», «Прайд-ТВЛ», SOLVER, «Технополис» и многих других.

Такое положение на рынке оборудования оказало самое негативное влияние на российское станкостроение. Сокращение закупок отечественных станков и инструмента предприятиями машиностроительного и оборонного комплексов привело к кризису в станкостроении и резкому сокращению объемов выпуска оборудования. Так, выпуск станков с ЧПУ в 2007 году составил всего 396 шт., из них обрабатывающих центров — 123 шт., с экспортом на сумму 0,8 млн дол. (для сравнения: импорт обрабатывающих центров составил почти 50,0 млн дол.).

Для пополнения бюджета на закупку по импорту и уменьшения затрат на основные производственные площади потребители металлорежущего оборудования проводят в широких масштабах реализацию установленного оборудования.

В настоящее время объем торговли бывшим в употреблении оборудованием принял такие масштабы, что его уже необходимо учитывать при оценке основных фондов российской промышленности.

Ремонт и восстановление станков является весьма выгодным бизнесом, поскольку позволяет получить работоспособное оборудование

без расходов на литье и обработку корпусных деталей. По мнению специалистов, станины, прослужившие много лет, лучше новых по точностным характеристикам (в них ликвидированы все остаточные напряжения). По этой причине западные фирмы охотно закупают в России бывшие в употреблении высокоточные станки, изготовленные много лет назад. Имеются многочисленные факты скупки за бесценок таких уникальных станков, как резьбо-, зубошлифовальные и координатно-расточные, произведенные ведущими фирмами мира.

Среди лидеров реимпорта выделяются Германия (8079,1 тыс. дол.), Украина (2324,6 тыс. дол.), Чехия (1455,3 тыс. дол.), Италия (924,0 тыс. дол.), Япония (601,3 тыс. дол.), Швейцария (518,1 тыс. дол.). Безусловно, что продажа этих станков может являться хорошим подспорьем для покупки нового оборудования, но остается неясной эффективность таких операций. Очевидно, что продажа по цене металлолома высокоточных станин является огромной потерей для предприятия, стремящегося перейти на выпуск конкурентоспособной продукции.

Подтверждением этого факта является то, что существенную долю импорта оборудования в Россию (до 40%) составляют подержанные станки из России же, прошедшие модернизацию в вышеперечисленных странах на специализированных заводах по восстановлению оборудования. Причем в этом импорте присутствуют реимпортированные российские станки на сумму 2104,7 тыс. дол.

Существенным является тот факт, что на фоне сокращения спроса, многие станкозаводы перешли на экспорт полуфабрикатов станков в виде металлических конструкций без электрооборудования, приводов и систем управления с последующей их комплектацией в западных станах по действующим в них стандартам. На этот, далеко не самый эффективный способ зарабатывания денег, отечественные станкостроители идут, чтобы обойти серьезное препятствие на пути экспорта — необходимость сертификации станков на соответствие техническим нормам стран-импортеров и, прежде всего, стран ЕС.

Как результат перечисленных вариантов внешней торговли, фактический экспорт металлообрабатывающего оборудования и российского производства в 2005 году составил всего 79,5 млн дол., а импорт — 353,6 млн дол. с тенденцией роста к 2007 году до 500 млн дол. Характерной для современной России является картина оборота внешней торговли обрабатывающими центрами (табл. 5.1).

Т а б л и ц а 5.1 — Торговый оборот обрабатывающими центрами России

Страна	Экспорт		Страна	Импорт	
	тыс. шт.	тыс. дол.		тыс. шт.	тыс. дол.
Эстония	21,8	249,4	Германия	711,1	13 473,7
Узбекистан	17,0	199,5	Япония	618,2	12 567,5
Казахстан	5,0	179,3	Чехия	548,2	11 465,6
Литва	35,0	72,9	Швейцария	142,5	5 043,7
Украина	27,4	58,6	Франция	41,7	1 818,9

Основными российскими экспортерами этих станков были ЗАО «Петербургский станкостроительный завод «ТБС», ООО «Механо-сборочный завод ИЗТС» (г. Иваново), ООО «Крин-Экспорт». Их зарубежными партнерами явились «Балтиес Лтд.» (Эстония), Навоийский горно-металлургический комбинат (Узбекистан), АО «Шубарколь Комир» (Казахстан), ООО «Алюминиевые сплавы» (Украина).

Зарубежными поставщиками были Grob-Werke Burkhardt Grab E. K., StarragHeckert A. G., Mitsubishi Heavy Industries, Kintetsu World Express Inc., Willemin Macodel, Huller Hille GmbH. Импорт осуществили ОАО «Верхне-салдинское металлургическое производственное объединение», ОАО «Силовые машины «Электросила» в Санкт-Петербурге, ОАО НПО «Сатурн», ОАО «Чебоксарский агрегатный завод», ОАО «Новосибирское авиационное объединение им. Чкалова», ОАО «ГАЗ».

Анализ показателей внешней торговли металлообрабатывающим оборудованием [33] показывает, что как в экспорте, так и в импорте станков участвует большое количество посреднических фирм. В редких случаях производители выступают в качестве экспортеров, а потребители — в качестве импортеров.

Из перечисленных фактов и статистического материала следует очевидный вывод о неиспользовании существенного резерва в технологическом перевооружении машиностроения России и Беларуси, модернизации имеющегося и выпускаемого металлообрабатывающего оборудования силами отечественной станкоинструментальной отрасли.

Концентрация усилий на этом направлении позволила бы улучшить баланс внешней торговли, решить ряд социальных проблем и сохранить потенциал отечественных передовых технологий.

Безусловно, речь идет не о простом капитальном ремонте станков, когда в парке машиностроения нашей страны сохраняется морально устаревшее оборудование, на котором трудно производить конкурентоспособную продукцию. С другой стороны необходимо помнить, что, помимо решения задач повышения качества и снижения себестоимости, модернизация должна соответствовать основным тенденциям мирового машиностроения, к которым относятся:

- а) обязательный учет требований защиты окружающей среды;
- б) мировое разделение труда;
- в) повышение уровня сервиса;
- г) сокращение сроков выполнения заказа.

5.2 Практика модернизации

В настоящее время в России капитальным ремонтом, сопутствующей ему модернизацией и целевой модернизацией занимаются заводы-изготовители механообрабатывающего оборудования и специализированные фирмы. Например, корпорация «МиР» осуществляет оценку технического состояния парка станков, ремонт, модернизацию, поставку модернизированного и реализацию подержанного оборудования. Этими предприятиями накоплен опыт работы, создан задел по типовым решениям. Интерес представляет опыт модернизации электроэрозионного оборудования (ЭЭО).

На основании имеющихся данных [34] возможно провести анализ потребления экспорта и импорта электроэрозионных станков за 2000—2003 годы. Результаты анализа позволяют оценить уровень конкурентоспособности отечественного и зарубежного ЭЭО, степень востребованности этого вида оборудования на внутреннем и внешнем рынках.

Полученные данные свидетельствуют о том, что оборот подержанного ЭЭО занимает большую долю от общих продаж станков. По объему импорта подержанное ЭЭО составляет примерно 45% от импорта новых станков в натуральном выражении и 15...20% — в денежном. В количественном отношении экспорт подержанных станков превышает экспорт новых станков.

Например, среди ЭЭО наиболее широко распространены вырезные станки, находящие применение в инструментальном производстве.

В настоящее время в России на различных предприятиях имеется свыше 4 000 проволочно-вырезных станков, из них до 2 000 станков — производства специализированных предприятий Минстанкопрома (Кировоканский станкозавод, «Станко-конструкция» и др.), до 1 500 станков — производства предприятий оборонного комплекса («Исток», «Фрязино», «Светлана», Ульяновское приборостроительное ПО и др.) и около 600 станков были поставлены в 1982—1993 годы фирмами AGIE AG (Швейцария), Charmilles Technologies (Швейцария), ONA (Испания), JAPAX (Япония) и др. При этом основным поставщиком импортного оборудования являлась фирма AGIE (до 300 станков моделей AC 50, 100, 200, 300 и DEM 315,415, 425 и др.).

Российские станки, изготовленные в 80-е годы XX века, обеспечивают невысокие технологические показатели (по производительности, точности и чистоте обработки), ограничивают геометрические размеры обрабатываемых деталей и возможности многомерной обработки. К тому же эти станки требуют большого расхода воды и мало пригодны по существующим экологическим требованиям.

Технологические показатели зарубежных станков выпуска середины 80-х годов XX века по паспортным данным соответствуют современным требованиям, но за период длительной эксплуатации эти показатели ухудшились в 3—4 раза. К тому же обслуживающие подсистемы — ЧПУ, генератор, привод, дизлектрический агрегат, программное обеспечение, система подготовки данных — базируются на элементной базе, принципах управления и программирования начала 80-х годов XX века и вряд ли могут соответствовать задачам, которые решаются сегодня или которые планируется решить в будущем. Таким образом, потребитель может выбирать из следующих вариантов:

- 1) приобретение нового импортного станка;
- 2) приобретение нового отечественного станка;
- 3) модернизация импортного станка;
- 4) модернизация отечественного станка.

В связи со сложностью выбора оптимального варианта на рынке появились отечественные фирмы, осуществляющие технологический аудит, которые в первую очередь проводят технический мониторинг состояния оборудования предприятия и выявляют технологическую потребность в станках.

При проведении мониторинга рассматриваются:

- показатели оборудования на момент подачи заявки (производительность, точность, чистота обработки);
- задачи, решаемые в данный момент на электроэрозионном оборудовании, и причины, по которым необходимо закупать новое оборудование (увеличение объема производства, увеличение размеров и массы обрабатываемых деталей, необходимость в существенном повышении точности и чистоты обработки);
- функции старого оборудования после покупки нового станка;
- передача старого оборудования на другое производство;
- продажа старого оборудования по остаточной стоимости;
- обоснование выбора данной модели нового станка;
- изготовление детали-представителя на станках других фирм в присутствии заказчика;
- наличие квалифицированных операторов;
- возможность организации двухсменной работы на новом оборудовании;
- соответствие показателей метрологического обеспечения технологическим возможностям нового оборудования;
- обрабатываемые материалы;
- характерные особенности геометрии обрабатываемых деталей (min радиусы, конусность и др.);
- критерии выбора данной модели (скорость или качество обработки);
- температурный режим помещения, в котором планируется установить новое оборудование;
- наличие квалифицированной сервисной службы на предприятии;
- регулярность поставки расходных материалов.

По результатам мониторинга определяют вариант закупки нового станка или модернизации имеющегося оборудования.

Частичный (средний или текущий) ремонт станков путем замены наиболее изношенных элементов станочного модуля, в частности, механизма транспортировки электрода-проволоки, отказавших электронных узлов, дает временный эффект, но не решает проблемы в целом. При этом надо иметь в виду, что закупка комплектующих после 15-летней эксплуатации очень затруднительна, так как связи с бывшим поставщиком бывают практически разорваны. Предприятия, заблаговременно закупившие развитый ремонтный комплект,

поддерживают работоспособность своего оборудования, но таких в наше время осталось немного.

Капитальный ремонт станков, особенно после потери ими основных показателей, представляется еще более сложной задачей и может быть произведен только фирмой-изготовителем или ее представителем, отвечающим за сервис в России. Торговые представители западных фирм в России экономически не заинтересованы в проведении таких работ, ибо им значительно выгоднее поставить данному предприятию новый станок современной модели. Как правило, продажей станков после капитального ремонта или проведением капитального ремонта станка занимаются специализированные фирмы. Их требованием является вывоз станка за рубеж, так как для его восстановления необходимы определенные технологические условия. При этом стоимость восстановленного станка относительно высока. Следует отметить, что при сложившейся практике на восстановленные станки гарантия дается на срок не более чем одного—трех месяцев и только на вновь установленные узлы и детали.

Закупка современного станка на первый взгляд решает все проблемы. Однако при более детальном анализе на основе функционально-стоимостного подхода становится ясно, что не всегда такой путь является оптимальным по следующим причинам.

Закупка нового электроэрозионного станка, как правило, требует значительных средств с учетом таможенных расходов. Например, самые дешевые ЭЭО (как правило, со струйной охлаждающей обработкой и без автозаправки проволоки), которые предлагаются в настоящее время на российском рынке с учетом таможенных и прочих расходов, на 40...50% дороже, чем модернизированный станок AC100M фирмы AGIE, в котором предусмотрена автозаправка проволоки и охлаждающая обработка методом погружения. Если предприятие покупает новый станок, но другой фирмы, то оно может нарушить технологическую преемственность.

Станки крупных западных производителей, монополизирующих российский рынок, обеспечивают высокие технологические показатели только с использованием западных расходных материалов, что требует от российского потребителя значительных регулярных расходов.

Поэтому модернизация ЭЭО является одним из наиболее эффективных направлений совершенствования технологии производства. Путем модернизации можно продлить ресурс оборудования,

экономить средства и существенно повысить качество всей производственной системы за счет расширения технологических возможностей станков, повышения их производительности, увеличения точности и надежности. Однако в случае модернизации системы управления такой подход не однозначен.

Дело в том, что, если для токарных, фрезерных и других подобных станков, такие фирмы, как Fanuc, Siemens и другие, выпускают унифицированные системы ЧПУ и приводы (поэтому модернизация подобного оборудования упрощается), то для ЭЭО станков их производители выпускают комплект подсистем (ЧПУ, генератор, привод и дизэлектрический агрегат) только для фирменной продукции. Отдельно подсистемы не продаются и все фирменные «ноу-хау» тщательно защищаются. Поставлять для капитального ремонта новые подсистемы к своим старым моделям фирмам экономически и стратегически не выгодно, так как такой подход может вступить в противоречие с маркетингом новых моделей, являющихся по существу модернизациями ранее выпускаемых моделей.

Отсюда следует, что для предприятия с ограниченными финансовыми возможностями, ориентированного на выпуск конкурентоспособной продукции, наиболее приемлемым вариантом является модернизация, уменьшающая как физический, так и моральный износ оборудования.

5.3 Направление современной модернизации

Часть технологического оборудования, устаревшего морально, но не физически, и практически не применяемое предприятиями из-за падения объемов машиностроительного производства, является серьезной основой для рынка модернизации, который в настоящее время используется станкостроителями не полностью из-за:

- отсутствия типовых решений и отечественных комплектующих для модернизации механообрабатывающего оборудования;
- отсутствия персонала высокой квалификации для проведения больших объемов разнородных монтажных работ в короткие сроки;
- больших затрат, связанных с транспортировкой громоздкого оборудования и /или выездом персонала на место для пусконаладочных работ.

Несмотря на перечисленные трудности, модернизация существующего металлообрабатывающего оборудования в современных экономических условиях является реальным путем быстрого технологического перевооружения отечественного машиностроения. Модернизация большого количества различных типов механообрабатывающего оборудования с применением современных комплектующих изделий, оснастки и инструмента способна качественно повысить технический уровень машиностроения и обеспечить выпуск конкурентоспособной продукции. Задача модернизации основных фондов машиностроения является приоритетной задачей также и для станкозаводов, причем должна начинаться с их собственного оборудования.

Основой модернизации механообрабатывающего оборудования, используемого в машиностроении, силами предприятий станкоинструментальной отрасли России, является разработка типовых проектов модернизации. *Параметрами высококачественного типового проекта модернизации* являются:

- нацеленность на конкретный вид оборудования, подлежащего модернизации;
- распространенность объекта модернизации в машиностроении;
- эффективность модернизации данного оборудования (существенное повышение производительности, принципиально новые технологические возможности, значительное сокращение затрат на переналадку);
- равноценность оборудования после модернизации аналогам нового оборудования;
- экономическая обоснованность модернизации данного вида оборудования (существенно меньшие затраты на модернизацию оборудования по сравнению с покупкой аналогичного нового оборудования).

Разработка типовых проектов модернизации оборудования позволит предприятиям станкоинструментальной отрасли перейти от выполнения индивидуальных заказов по модернизации отдельных видов оборудования к промышленной организации всех видов работ по единой технической документации, что должно придать процессу модернизации оборудования массовый характер. Учитывая, что модернизация оборудования осуществляется, в основном, мелкими и средними предприятиями, необходимым условием массовой модернизации является доступность типовых проектов модернизации этим предприятиям.

Модернизация в направлении высокоскоростного резания в настоящее время затруднена из-за отсутствия в России и Беларуси собственного производства необходимых комплектующих, прежде всего, высокопроизводительных систем ЧПУ, высокоскоростных электрошпинделей, скоростных приводов подачи, направляющих, датчиков линейных и угловых перемещений с высокой разрешающей способностью и т. д.

В связи с этим на первый план выходит инструментальное обеспечение модернизированных станков, в частности:

- новые материалы и упрочняющие покрытия для высокоскоростного режущего инструмента;
- новые конструкции высокоскоростного режущего инструмента, автоматизированные системы его проектирования;
- новые технические решения в области систем базирования и крепления высокоскоростного инструмента, правки абразивного инструмента, идентификации и диагностики инструмента;
- создание универсальной инструментальной оснастки, расширяющей возможности станков (ускорительные головки, угловые фрезерные и расточные головки, в том числе с ЧПУ, многошпиндельные головки и т. п.).

Важным ресурсом модернизации являются результаты поисковых научных разработок в области «нетрадиционных» технологий обработки, к которым, в первую очередь, следует отнести:

- новые технологии обработки («сухое» резание, так называемые «гибридные» технологии, в которых резание комбинируется с процессами пластического деформирования, с электрофизическими и электрохимическими методами удаления материала, с методами модификации поверхности детали и т. п.);
- методы адаптивного управления механообрабатывающим оборудованием с целью повышения его точности за счет учета в реальном времени информации об усилиях, возникающих в системе «станок-приспособление-инструмент-деталь» и микроперемещениях, о температурных деформациях станка, об износе инструмента и узлов станка, обеспечивающих точность обработки; высокоэффективные методы обработки, альтернативные резанию материалов.

В настоящее время в России капитальным ремонтом, сопутствующей ему модернизацией и целевой модернизацией занимаются

заводы-изготовители механообрабатывающего оборудования и специализированные фирмы, которые осуществляют оценку технического состояния парка станков, ремонт, модернизацию, поставку модернизированного и реализацию подержанного оборудования. Этими предприятиями накоплен опыт работы, создан задел по типовым решениям.

Основой модернизации механообрабатывающего оборудования силами предприятий станкоинструментальной отрасли России является разработка типовых проектов модернизации. Примерами высококачественного проекта модернизации являются работы, выполненные на ЗАО «Техническое бюро станкостроения», Савеловском машиностроительном заводе и др.

Разработка типовых проектов модернизации оборудования позволит предприятиям станкоинструментальной отрасли перейти от выполнения индивидуальных заказов по модернизации отдельных видов оборудования к промышленной организации всех видов работ по единой технической документации, что должно придать процессу модернизации оборудования массовый характер.

Помимо решения задач повышения качества и снижения себестоимости, модернизация должна соответствовать основным тенденциям развития мирового машиностроения.

5.4 Реконфигурируемые производственные системы

Глобализация производства, усиление конкурентной борьбы, в частности, в автомобильной промышленности, вызвали более частую смену моделей, представленных на рынке, что создало потребность в реконфигурируемых автоматизированных производственных системах, предназначенных для выпуска группы однотипных деталей.

Однотипные детали отличаются размерами, числом однотипно обрабатываемых поверхностей (например, блоки цилиндров двигателей с двумя, тремя, четырьмя, шестью цилиндрами, головки блоков цилиндров и др.). В середине 90-х годов XX века в Мичиганском университете (США) [35] начались разработки теоретического обоснования необходимости создания и требуемых характеристик реконфигурируемых производств. В работе [36] приводятся следующие из них:

- модульность;
- приспособленность для производства группы деталей;
- возможность значительного изменения производительности при увеличении спроса на какую-либо модель машины;
- способность изменения функциональности;
- открытая архитектура системы управления;
- развитая система наблюдения за работой контроля и диагностирования.

Проводилось сравнение высокопроизводительных производств с жестким построением автоматических линий из агрегатных станков [37] и с гибкими автоматическими линиями из станков с ЧПУ и обрабатывающих центров [35—42]. По производительности последние занимают среднее положение, но имеют экономические преимущества при серийном производстве, сохраняя высокую гибкость и возможность перестраивания на новую продукцию. В состав оборудования реконфигурируемых систем входят: многопозиционные и однопозиционные агрегатные станки с большим количеством инструментов, с возможностью замены многошпиндельных головок [42]; станки с ЧПУ с несколькими шпинделями, в том числе и дополнительно установленными, со столами, позволяющими устанавливать детали под различными углами; обрабатывающие центры упрощенной конструкции, с достаточным количеством инструментов для обработки данной группы деталей; дисковые и цепные магазины для инструмента; промышленные роботы (ПР) для установки, обработки и контроля деталей; транспортеры; лазерные системы для контроля точности установки и обработки деталей; свободные позиции для возможности встраивания дополнительного оборудования (например, для ультразвуковой, лазерной, химико-термической обработки покрытий, мойки, выполнения операций нанотехнологии и др.)

В применяемом оборудовании часто используются мехатронные устройства [38; 39], что облегчает переналадку, позволяет использовать более высокие режимы резания, скорость позиционирования шпинделя, поворотные столы.

Такие устройства, как и новые конструкции станков с ЧПУ, обрабатывающие центры, автоматизированные быстроперенастраиваемые системы, были широко представлены в мае 2006 года на 9-й Международной выставке «Металлообработка» в Москве. На выставке

был представлен ряд интересных докладов, посвященных развитию станкостроения. В них отмечается перспективность применения реконфигурируемых производств. Основное внимание уделялось:

- гибким производственным системам (в том числе реконфигурируемым);
- оборудованию с программным управлением;
- мехатронным системам и ПР;
- обрабатывающим центрам модульной конструкции;
- прецизионным координатно-расточным станкам;
- оснастке, увеличивающей технологические возможности (поворотным и глобусным столам, револьверным головкам различных типов, магазинным устройствам смены инструмента);
- технологии модернизации станков, актуальной в связи с недавним спадом машиностроительного производства в России;
- лазерным технологиям.

Большое внимание представленными фирмами (в том числе российскими) уделялось автоматизации производства в автомобилестроении.

Основным оборудованием являются обрабатывающие центры. Так как их производительность невелика, то широко применяется дублирование станков. Большое внимание уделяется применению развитых систем управления, включая системы контроля мониторинга и диагностики.

На выставке были представлены данные реконфигурируемой производственной системы для изготовления 1,3 млн алюминиевых головок блока цилиндра. Утверждается модульный принцип построения линий из обрабатывающих центров. Использованы две системы: одна — из 54 обрабатывающих центров, вторая — для финишной обработки — из 43 обрабатывающих центров, входящих в четыре блока.

Загрузка станков осуществляется сверху загрузочными устройствами, перемещающимися по направляющим вдоль линии стakov. Стружка дробится и вместе с охлаждающей жидкостью поступает в систему очистки. Качество обработки проверяется на каждом станке и дополнительно на координатно-измерительной машине. Фирма уделяет особое внимание подготовке персонала цеха. Для этого используются специальные тренажеры и обучение программированию и работе

в компьютерных классах. Подготовка (включая технику безопасности) заканчивается в производственных условиях. Система может быть легко приспособлена для обработки других деталей аналогичной конструкции. Саратовская фирма выпускает для автоматизированных производств особо точные координатно-измерительные машины, позволяющие проводить и многокоординатную обработку деталей. Измерения осуществляются лазерными устройствами. На выставке можно было ознакомиться с обрабатывающими центрами модульной конструкции российских предприятий, которые могут использоваться в реконфигурируемых производствах. Российские фирмы знакомили посетителей с различной оснасткой и инструментом для автоматизированных линий. На выставке было представлено оборудование из Рязани, Москвы, Кирова, Санкт-Петербурга и других городов. Также был представлен системный подход к вторичному использованию металлообрабатывающего оборудования. В состав выпускаемого оборудования входят обрабатывающие центры, станки с ЧПУ, станки для предприятий нефтедобычи, железнодорожного транспорта, вспомогательный инструмент, револьверные головки и многое другое оборудование, используемое в автомобильной промышленности. Станкостроительные заводы сейчас не получают крупных заказов, как это было в XX веке, на агрегатные станки и автоматические линии, хотя они отличаются высокой производительностью и включаются в реконфигурируемые производства. Заказы на проектирование автоматических линий из агрегатных станков московскими заводами поступают из Китая и Белоруссии. В работе [40] предлагаются модернизированные перестраиваемые линии из агрегатных узлов. Они могут строиться по технологии поточно-автоматизированного производства [42] и состоять не только из нормализованных унифицированных узлов, но и различных узлов с ЧПУ, магазинов для инструмента, столов и бабок. Такие линии обладают пятью видами гибкости: конструкционной, технологической, структурной, по объему выпуска продукции, операционной.

При определении производительности линий, последовательно выпускающих несколько близких по конструкции деталей, следует учитывать потери времени на реконфигурацию и затраты времени на заполнение позиций линии при запуске очередной детали отличной конструкции. Пока еще накоплен небольшой опыт создания реконфигурируемых производств, но они могут найти более

широкое применение не только в механосборочных, но и в заготовительных цехах.

В комплект унифицированных узлов, в том числе с управлением от ЧПУ, включено следующее оборудование: столы однокоординатносиловые семи габаритов с шариковинтовой парой и высокомоментным электродвигателем; столы однокоординатносиловые с гидроприводом двух габаритов; столы крестовые трех габаритов; столы продольно-поворотные с гидроприводом двух габаритов; комплект унифицированных узлов с программируемым от системы ЧПУ перемещением по трем координатным осям и инструментальным магазином; бабки револьверные (с веерным расположением шпинделей, с поворотной шпиндельной коробкой и с параллельным расположением шпинделей); бабка расточная с планшуппортом с ЧПУ одного габарита; бабки фрезерные, работающие с инструментом из СТМ двух габаритов [41].

Наличие таких узлов позволит на одной гибкой автоматической линии обрабатывать несколько модификаций однотипных деталей с минимальным количеством встраиваемых узлов и в отдельных случаях обеспечит возможность перестройки линии при смене объектов производства. Инновационный процесс в станкостроении предусматривает внедрение новых или усовершенствованных технических решений, а также разработки с последующим внедрением в базовые технологии станкостроения (высокоскоростная обработка резанием, «сухое» резание, лазерная обработка и т. п.).

Высокоскоростная обработка резанием характеризуется использованием на порядок более высоких по сравнению с традиционными скоростями резания (до 1 200 и 4 000...6 000 м / мин при обработке черных и цветных металлов соответственно). Это возможно благодаря применению инструментов из прогрессивных материалов (керметов, кубического нитрида бора, поликристаллического алмаза, мелкозернистых твердых сплавов с одно- и многослойными покрытиями) и высокоскоростных моторшпинделей в сочетании с современными устройствами и агрегатами, обладающими многократно более высоким быстродействием. К таким устройствам принадлежат:

- 1) приводы перемещения узлов (линейные или с использованием шариковых винтовых пар с большим шагом), обеспечивающие совместно с новыми компоновками станков (типа Box-in-Box;

с параллельной кинематикой) скорости быстрого хода узлов 60...120 м / мин с ускорениями 0,5...1,5 g;

2) механизмы автоматической смены инструментов, обеспечивающие время их смены (от реза до реза) 2...5 с и менее, и время смены столов-спутников 5...8 с и менее;

3) вспомогательные агрегаты с управлением от быстродействующих устройств с ЧПУ на базе персональных компьютеров.

5.5 Современные высокоэффективные технологии, применяемые в ведущих машиностроительных фирмах

«Сухое» резание — обработка с использованием специальных инструментов (в том числе с покрытиями) с подводом микродоз смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) в количестве 20...50 см³ / ч и менее (измельчение капель до 3...5 мкм) лучше всего через шпиндель станка непосредственно к рабочей зоне, что позволяет значительно сократить эксплуатационные расходы по сравнению с расходами при традиционной обработке, сопровождающейся обильной подачей СОТС, а также решить ряд экологических проблем и уменьшить энергопотребление станка.

Лазерная обработка. Инновации в этой области предполагают следующее:

1) использование новых твердотельных YAg-лазеров и газовых СО₂-лазеров, имеющих в несколько раз большую (5...6 кВт и выше) мощность по сравнению с ранее применявшимися;

2) повышение качества луча;

3) использование быстродействующих линейных приводов перемещения узлов, высокоточных измерительных систем;

4) автоматизацию вспомогательных операций с управлением от современных устройств с ЧПУ на базе персональных компьютеров, благодаря чему намного возрастает скорость резания (до 20 м / мин), сокращается время вспомогательных операций и повышается точность обработки (до 0,01 мм на длине 1 000 мм).

Другие электрофизические методы обработки. Инновации в этой области предполагают:

1) использование новых генераторов импульсов с намного более высокой частотой (до 100 кГц) и максимальной силой тока до 600 А;

2) применение специальных материалов с малым температурным коэффициентом линейного расширения ($\approx 5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) и высоким удельным электрическим сопротивлением ($1 \text{ } 014 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ и более);

3) использование быстродействующих линейных приводов перемещения узлов и высокоточных измерительных систем;

4) автоматизацию вспомогательных операций с управлением от современных устройств с ЧПУ на базе персональных компьютеров, благодаря чему намного повышается производительность по сечению реза (до $250 \dots 300 \text{ мм}^2 / \text{мин}$ в вырезных станках), по съему металла (до $20 \text{ мм}^3 / \text{мин}$ и более; в прошивных станках), значительно улучшается качество обработанной поверхности (шероховатость до 11-го класса);

5) точность обработки (отклонение от параллельности до $0,004 \text{ мм}$ на длине 300 мм) и уровень ее автоматизации.

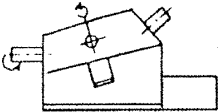
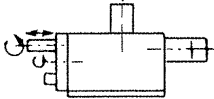
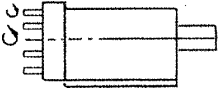
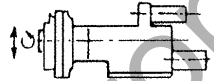

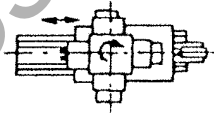
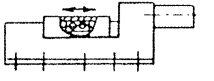
Водоструйная обработка. Новая экологически чистая технология с использованием струи жидкости (с добавлением абразива) под давлением до $300 \dots 350 \text{ МПа}$, позволяющая с высокой скоростью и точностью производить резание (в том числе фасонное) ряда материалов и деталей (сотовых панелей, титановой губки, мрамора, вредных и взрывоопасных материалов), которые не поддаются качественной обработке другими методами, например из-за смятия, оплавления или «размочаливания» кромки реза.

Сверхпрецизионные технологии и нанотехнологии обеспечивают субмикронную точность обработки (отклонения формы и размеров поверхностей $0,1 \dots 0,3 \text{ мкм}$; отклонения взаимного расположения $0,5 \dots 0,8 \text{ мкм}$; шероховатость поверхностей 12-13-го классов) благодаря специальным компоновкам станков, использованию лазерных измерительных систем, применению аэро- и гидростатических направляющих, а также встроенных в станок сенсорных и контрольных средств в сочетании с управлением от современных ЧПУ.

В таблице 5.2 показаны модернизированные системы металлообрабатывающих станков, направленные на повышение производительности, точности и расширение технологических возможностей выпускаемых современных станков.

Комбинированные методы обработки и оборудование для их реализации также являются инновационным путем в станкостроении и представляют собой дальнейший шаг в направлении концентрации операций, выражающейся в сочетании на одном станке разнохарактерных методов обработки (токарной и сверлильно-фрезерно-расточной;

Т а б л и ц а 5.2 — Модернизированные системы металлообрабатывающих устройств

Рассматриваемая система металлообрабатывающих устройств		Применение
Название	Рисунок	
Бабка револьверная с верхним расположением шпинделя		Для одношпиндельной или многошпиндельной (в случае применения многошпиндельных коробок) обработки отверстий: 1) в одной детали за несколько переходов; 2) в четырех различных деталях
Бабка револьверная с параллельным расположением шпинделя		Для обработки одиночных или двух близко расположенных отверстий (двумя головками) за два-три перехода
Бабка револьверная с поворотной шпиндельной коробкой		Для многошпиндельной обработки ограниченного количества отверстий за несколько переходов
Бабка расточная с планшуппортом с ЧПУ		При установке на координатно-силовой стол производится полная обработка фасонных и ступенчатых отверстий
Бабки фрезерные, работающие с инструментом из СМТ		Для возможности повышения режимов обработки детали в 1,5—2 раза
Столы продольно-поворотные с гидроприводом		Для обработки одной детали за несколько переходов. Для обработки нескольких типоразмеров деталей
Столы однокоординатно-силовые с шариковинтовой парой		Применяется при необходимости автоматического изменения последовательности быстрых ходов и рабочих подач, их длин и скоростей. При последовательном осуществлении нескольких технологических операций обработки одной детали

сверлильно-фрезерно-расточной и токарно-карусельной), а также в комбинации лезвийной обработки с шлифовальной, лазерной и др. Это позволяет существенно сократить длительность производственного цикла и повысить точность обработки.

6 НАДЕЖНОСТЬ СОВРЕМЕННЫХ СТАНКОВ

Важнейшей характеристикой современных машин является качество. Под **качеством продукции** понимают совокупность свойств, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенным потребностям в соответствии с ее назначением.

Качество машины характеризуется определенной системой показателей, учитывающих ее назначение и регламентируемых стандартами. При этом степень совершенства машины, выражаемая ее мощностью, КПД, производительностью, экономичностью, степенью автоматизации, точностью работы, надежностью, ресурсом и т. д., определяет общий технический уровень машины.

Сегодня наиболее актуальным для каждого предприятия являются вопросы, связанные с производительностью, надежностью, стоимостью обслуживания и ремонта имеющегося технологического оборудования и оснастки.

Если рассматривать качество станков с позиции приносимой обществу пользы, то в современном производстве надежность станков наиболее полно характеризует их совершенство и определяет затраты на автоматизацию и ее уровень.

Для металлообрабатывающих станков наиболее характерны функциональная и параметрическая (точностная) надежность. Способы их обеспечения в значительной степени различаются. Существенно различаются также требования к надежности станков различных типов (универсальных, многоцелевых, легких, тяжелых и т. д.). Все это не позволяет сформулировать единые требования к конструкции с позиции ее надежности.

В самом общем плане надежной можно считать такую конструкцию, в которой предприняты меры к тому, чтобы даже при наличии помех или отказов отдельных элементов не наносился серьезный ущерб функционированию всей системы.

Надежность в значительной степени определяется основной идеей машины. Например, для станков — методом формообразования, компоновкой, кинематической структурой.

Наиболее прогрессивны станки с непрерывными (и желательно простыми) процессами формообразования и движениями, например, с вращательным движением вместо возвратно-поступательного (как при строгании, долблении и т. д.), при которых велика роль инерционных нагрузок и переходных процессов. Обработка зубчатых колес методом непрерывной обкатки отличается существенно более высокой надежностью, чем методом единичного копирования. Это связано, в первую очередь, с непрерывностью процесса формообразования в отличие от работы с периодическим поворотом стола после обработки очередной впадины. Кроме того, повышается технологическая надежность из-за меньшего влияния износа инструмента на точность формообразования.

Надежность, связанная с компоновкой станка определяется величиной и диапазоном изменения его характерных параметров (нагрузки направляющих, жесткости несущих систем во всем рабочем пространстве и т. д.) при перемещении узлов. С этих позиций большей надежностью обладают портальные компоновки, нежели консольные (особенно тяжелых и точных станков). Удобство удаления стружки также может служить показателем надежности компоновки станка в автоматизированном производстве.

Рассмотрим некоторые конструкторские методы повышения надежности станков, а именно:

- 1) повышение технического уровня;
- 2) упрощение конструкции;
- 3) усовершенствование силовой схемы;
- 4) обеспечение помехоустойчивости;
- 5) замена силового замыкания геометрическим;
- 6) фиксация деталей;
- 7) технологичность конструкции;
- 8) вопросы триботехники.

6.1 Повышение технического уровня

Большинство мер, направленных на повышение технического уровня станка, благоприятно отражаются на его надежности, даже если они непосредственно не направлены на улучшение этого показателя. Применение простых и проверенных решений,

стандартизации, унификации и агрегатирование конструкций повышают надежность.

Повышение точности деталей, как правило, способствует повышению долговечности и улучшению виброакустических качеств станка. Так, повышение точности зубчатых колес на одну степень повышает долговечность на 8...10%; снижение погрешностей формы дорожек подшипников качения с 1,5 до 0,3 мкм позволяет увеличить их долговечность в 2,5 раза и снизить уровень шума до 30%.

Применение механизмов, надежность которых обеспечивается самой природой их функционирования. Существенное повышение надежности достигается, например, при применении механизмов, приспособляющихся к изменяющимся условиям эксплуатации.

Например, в высокоскоростном шпиндельном узле (рис. 6.1) требуется уменьшить натяг в подшипниках при увеличении частоты вращения. Для этого целесообразно использовать эффект, который всегда сопровождается изменением частоты вращения (тепловой). В данной конструкции повышение температуры при росте частоты

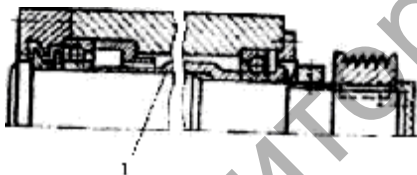


Рисунок 6.1 — Шпиндельный узел

вращения сопровождается удлинением втулки 1 (выполненной из материала с большим, чем у шпинделя, коэффициентом линейного расширения, например из бронзы) и уменьшением натяга. Соответствующим подбором материалов можно добиться и противоположного эффекта.

Второй пример касается конструктивного оформления направляющих токарного станка.

На рисунке 6.2 показаны различные схемы расположения направляющих токарного станка. Учитывая, что износ направляющих скольжения линейно возрастает с увеличением давления, наиболее надежными оказываются направляющие, у которых широкая грань перпендикулярна к результирующей силе F_{Σ} (она складывается из веса G узла и силы резания F_p). Для того чтобы износ меньше влиял на точность, он должен по возможности вызывать только тангенциальное относительное смещение инструмента и заготовки. Этому условию в определенной мере удовлетворяет схема (см. рис. 6.2, б),

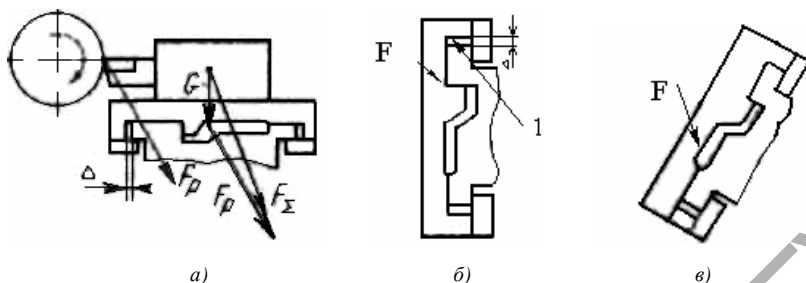


Рисунок 6.2 — Схемы расположения направляющих станка

при которой изнашивается преимущественно грань 1 направляющих. Совокупности же названных требований в наибольшей степени отвечает схема (см. рис. 6.2, в), которой и отдают предпочтение при конструировании.

6.2 Упрощение конструкции механизмов станка

Упрощение конструкции является наиболее эффективным (но не простым) методом повышения надежности. Использование электрошпинделей без коробок скоростей или шкивов, максимальное упрощение привода подачи (когда двигатель непосредственно соединен с шарико-винтовой парой (ШВП)) и другие решения создают условия для обеспечения высокой надежности. Упрощение конструкции может проводиться по следующим направлениям:

- 1) путем упрощения конструкции деталей при увеличении их числа;
- 2) путем усложнения конструкции отдельных наиболее важных деталей (узлов) при сокращении их числа;
- 3) путем использования различных физических эффектов.

Ниже приведен пример упрощения конструкции по варианту 1.

На рисунке 6.3 приведена схема механизма для реализации весьма точного перемещения

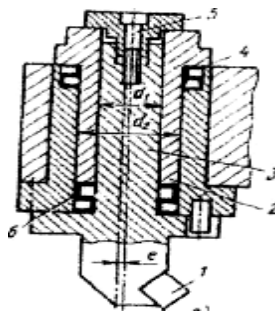


Рисунок 6.3 — Механизм перемещения реза

реза 1 в результате поворота втулки 2 , выполненной с эксцентриситетом e отверстия d_1 , по отношению к наружной поверхности d_2 . В отрегулированном положении оправки 3 с резцом фиксируется сильфонными втулками 4 и 6 при затягивании винта 5 . Хотя, на первый взгляд, здесь имеется много деталей, это не снижает надежности механизма, так как все детали имеют простую форму и их нетрудно выполнить с высокой точностью.

Упрощение конструкции по варианту 2 приведено на рисунке 6.4, на котором показаны три схемы совмещенного привода главного движения и привода подачи для станков токарной группы. Схемы (см. рис. 6.4, a и $б$) соответствуют работе в режиме главного привода. В этом случае одна из двух ступеней частоты вращения включается в работу при перемещении зубчатого колеса z_3 с внутренним зубом.

В схеме 1 водило 1 жестко соединено с колесом z_3 , и коробка работает как жесткая муфта с передаточным числом ($u = 1$). При перемещении зубчатого колеса z_3 во второе положение (см. рис. 6.4, $б$) вращение от колеса z_1 на водило 1 передается через сателлиты z_2 , которые обкатываются по колесу z_3 , обеспечивая снижение частоты вращения, т. е. $u = (1+z_1/z_3) / (z_1/z_3) = 4 \dots 5$.

Логическим шагом при совмещении привода главного движения и привода круговой подачи (и в конечном счете упрощения конструкции механизмов) является использование положительных свойств планетарной передачи с целью получить большие передаточные

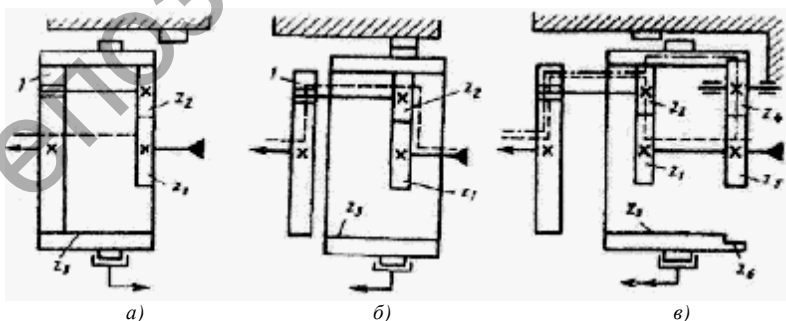


Рисунок 6.4 — Схемы совмещенного привода главного движения и привода подачи токарного станка

числа. Для этого центральное колесо z_3 имеет дополнительный привод от того же электродвигателя через передачу $z_5 - z_4 - z_6$ (см. рис. 6.4, в); тогда $u = (1 + z_1 / z_3) / (z_1 / z_3 - z_5 / z_6) = 80 \dots 200$. Здесь вместо двух механизмов (коробок скоростей и подач, а также механизмов их включения и блокировки) использован один, выполняющий все функции заменяемых механизмов.

Пример реализации варианта 3 представлен на рисунке 6.5, на котором изображен привод микроперемещения салазок 1 высокоточного токарного станка, в котором использованы упругие ленты 2. Предусмотрен зазор δ между электромагнитом ЭМ2 и лентой и обеспечивающую последовательность включения электромагнитов ЭМ1—ЭМ3, можно получить весьма малую величину перемещений $Dl \gg l(1 - \cos \alpha)$, где $\alpha = \arcsin(\delta / L)$.

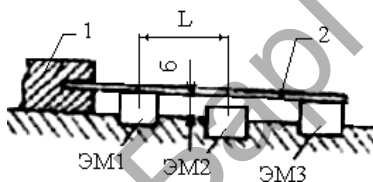


Рисунок 6.5 — Схема привода микроперемещения салазок токарного станка

6.3 Совершенствование силовой схемы

Наибольший эффект в этом случае достигается на стадии выбора схемы резания и компоновки станка, но важной является также и рационализация конструкций отдельных механизмов.

Например, рациональному распределению нагрузки в конструкциях способствует устранение избыточных (или введение недостающих) связей. Так, в V-образных статически неопределимых направляющих токарных станков (рис. 6.6) тепловые деформации вызывают рост давления на гранях 1 и 2, по которым происходит базирование салазок 5, а грани 3 и 4 исключаются из работы (см. рис. 6.6, а). В более рациональной конструкции (см. рис. 6.6, б) даже при возникновении упругих или тепловых деформаций базирование происходит по граням 1 и 4 при практически неизменных давлениях на них.

При установке крупных и тяжелых заготовок, превышающих размеры планшайбы (стола) (рис. 6.7), могут возникать большие упругие деформации, что вызывает перекося направляющих. При

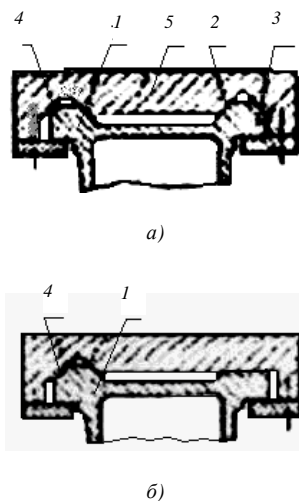


Рисунок 6.6 — Варианты конструкции направляющей токарных станков

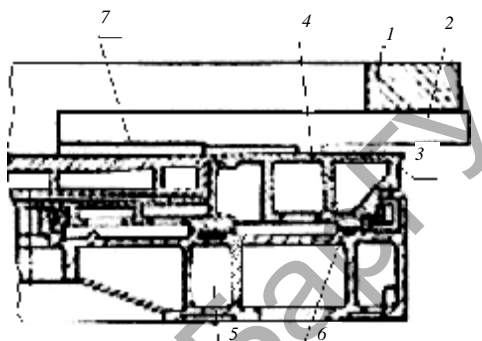


Рисунок 6.7 — Схема установки крупных заготовок на стол станка

рациональной схеме нагружения этого удастся избежать. На рисунке 6.7 показано, что заготовка 1, превышающая по диаметру рабочую планшайбу 3, установлена на балках 2, которые опираются плоскостью 4 на рабочую планшайбу между гидростатическими направляющими 5 и 6. Закреплены же балки на нерабочей планшайбе 7, воспринимающей момент от заготовки. В такой схеме исключается закручивание рабочей планшайбы и перекос направляющих 5 и 6; она реализована в конструкции одностоечного токарно-карусельного станка с диаметром планшайбы 10 м, на которой можно закреплять заготовку диаметром 22 м.

6.4 Обеспечение помехоустойчивости

При работе станка могут создаваться ситуации, когда нагрузки выходят за допустимые пределы или возникают помехи, способные вывести его из строя (столкновение узлов, обрыв тросов и т. д.). Главным способом устранения больших нагрузок при столкновении

узлов является замена в движущихся системах механизмов с геометрическим замыканием механизмами с силовым замыканием.

Например, в конструкции ШВП станка столкновение гайки 1 с опорой 4 невозможно даже при ошибке программирования (рис. 6.8). При подходе гайки к опоре полумуфта 3 винта соединяется

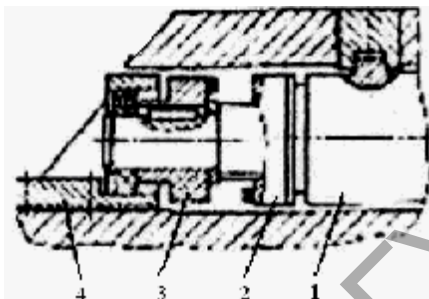


Рисунок 6.8 — Схема предотвращения поломки станка при аварийных ситуациях

с полумуфтой 2 корпуса гайки, вращение ШВП блокируются и тем самым устраняется опасность повреждения элементов качения.

На рисунке 6.9 показана схема защиты привода узла 1 при наезде на препятствие 2. В случае наезда происходит осевое перемещение червяка 3 привода, сжатие пружины (червяк вывинчивается из червячного колеса, как из гайки) и отключение привода с помощью конечного выключателя 4 (аналогичный привод может использоваться для многократного подвода узла в заданное положение).

Повышение помехоустойчивости при автоматической смене инструмента и заготовки достигается, если в устройствах смены предусмотрен контроль наличия (отсутствия) свободных гнезд (позиций) в магазине.

Весьма важно также предотвратить аварийные ситуации при различных нарушениях в работе станков, например при внезапном отключении электроэнергии и т. д. Это достигается путем правильного подбора фрикционных материалов, а также смазывания опор с помощью гидроаккумулятора либо смазочного насоса, которые автоматически подсоединяются к узлу, движущемуся по инерции (к шпинделю, планшайбе), и снабжает опоры маслом в течение всего времени выбега.

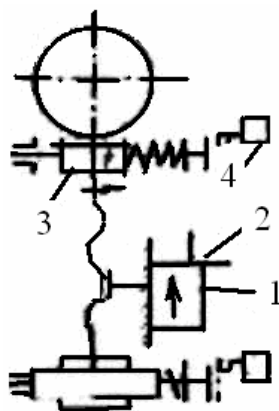


Рисунок 6.9 — Схема защиты привода станка при наезде на препятствия

6.5 Замена силового замыкания геометрическим

Такая замена особенно важна в механизмах, работа которых требует исключительной надежности (необходимости обеспечения безопасности людей, выполнения дорогостоящих операций и т. д.).

На рисунке 6.10 показан механизм зажима инструмента в двухзахватной руке устройства автоматической смены инструмента (в манипуляторе). Выпадение тяжелого инструмента *1* под действием его веса и сил инерции при повороте руки исключается, так как главную роль играет не силовое замыкание, осуществляемое пружиной *2*, а геометрическое замыкание подвижной клешни *5* с помощью толкателей *3* и *4* (привод толкателей не показан).

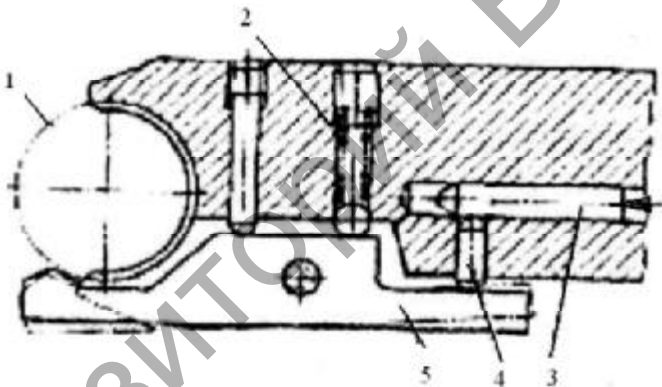
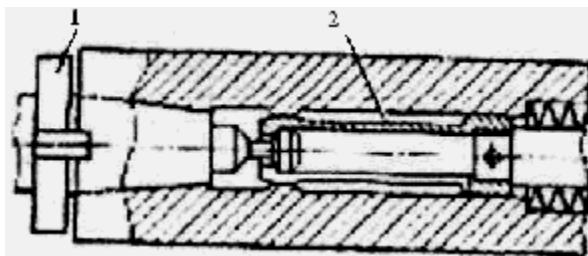


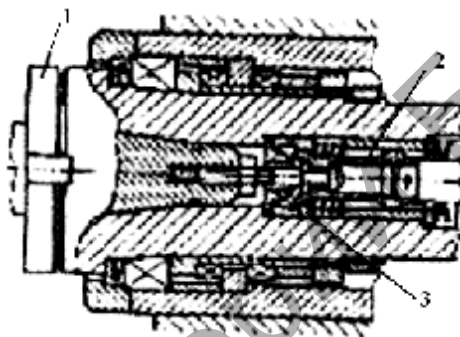
Рисунок 6.10 — Механизм зажима инструмента в манипуляторе

На рисунке 6.11, *а*, и 6.11, *б*, показаны схемы цангового зажима инструмента в многоцелевом станке.

Освобождение инструмента *1* многоцелевого станка (рис. 6.10, *а*) осуществляется при осевом перемещении цанги *2* вследствие ее упругих свойств (силовое замыкание). Более надежна схема (см. рис. 6.10, *б*), в которой лепестки цанги *2* разжимаются принудительно конической поверхностью втулки *3* (геометрическое замыкание) при осевом перемещении цанги.



a)



б)

Рисунок 6.11 — Механизм зажима инструмента

На рисунке 6.12 представлен механизм зажима инструмента в шпинделе токарного станка с помощью гидропривода. Инструмент зажимается в шпинделе под действием гидропривода (силовое замыкание) при осевом перемещении тяги 2 влево (масло подается в полость 1 гидроцилиндра). Геометрическое замыкание предусмотрено на случай аварийного отключения давления (например, при обрыве трубопровода). При этом подпружиненные фиксаторы, выполненные в виде поворотных рычагов 4, препятствуют самопроизвольному перемещению вправо тяги 2 вместе с втулкой 5, т. е. ослаблению крепления инструмента (при этом рычаги упираются в торец втулки б). Для освобождения инструмента необходимо переместить вправо поршень 3, который своей конической поверхностью отжимает рычаги 4, благодаря чему механизм деблокируется.

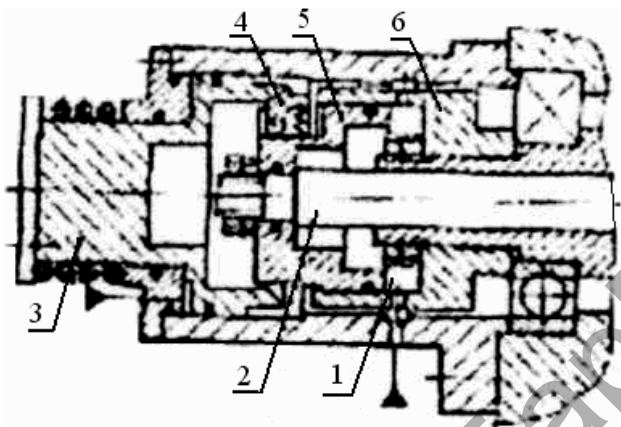


Рисунок 6.12 — Механизм зажима инструмента в шпинделе станка под действием гидропривода

Сравнительно небольшое усилие от пружины 1 передается через конические поверхности втулок 2, 3 и 5 и шарики 4 на шток 6 и далее на инструмент 7. Правильно выбрав углы наклона конических поверхностей, можно увеличить усилие пружины в 5—6 раз при его передаче на шток (верхняя часть рис. 6.13).

При возникновении осевого усилия F , вытягивающего инструмент 7 из шпинделя, коэффициент передачи усилия от штока 6 к пружине 1

дополнительно увеличивается (за счет угла трения) и достигает 10 и более. Таким образом, механизм блокируется, и перемещение инструмента 7 при возникновении на нем усилий, даже превышающих расчетные, становится невозможным. Для разжима механизма необходимо переместить втулку 3 влево посредством, например, гидроцилиндра (нижняя часть см. рис. 6.13).

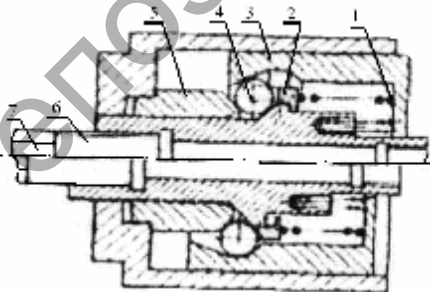


Рисунок 6.13 — Механизм зажима инструмента

6.6 Фиксация детали

В станках, где возникают значительные динамические нагрузки, на долю резьбовых соединений приходится до 20% всех отказов механической системы. Это приводит к разрегулированию направляющих (качения), ослаблению крепления конечных выключателей, резьбовых деталей, опор ходовых винтов, соединений гидропривода.

Отвинчивание винтов наблюдается как при осевой, так и при поперечной (вдоль стыка) динамической нагрузке, причем второй случай встречается наиболее часто. При увеличении затяжки стыков надежность повышается, так как уменьшается доля поперечной нагрузки на винт. Длинные винты малого диаметра менее склонны к самоотвинчиванию, поэтому чем крупнее винт, тем с большим усилием его нужно затягивать. Влияние плоских шайб на склонность к самоотвинчиванию незначительно.

На рисунке 6.14 показаны различные схемы закрепления блоков зубчатых колес. Резьбовые соединения 2 и 3 (см. рис. 6.14, б и в) обеспечивают меньшую надежность, чем фиксация с помощью пружинного кольца 1 (см. рис. 6.10, а).

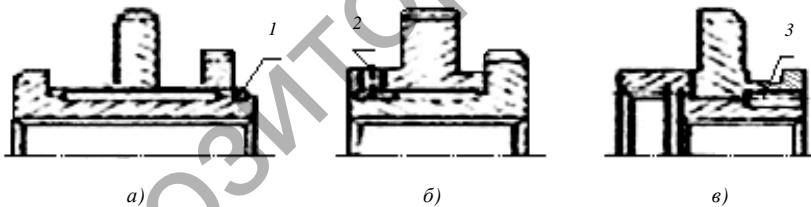


Рисунок 6.14 — Схемы закрепления зубчатых колес

На рисунке 6.15 представлены четыре схемы закрепления корпуса опоры 1, винта 2 привода подач на станке с ЧПУ. В большинстве случаев более надежная и жесткая фиксация (см. рис. 6.15, а и б) является и более трудоемкой. Однако даже самая простая фиксация корпусов опор с помощью штифтов 4 или шпонок 5 требует тщательной подготовки отверстий под штифты или шпонки (см. рис. 6.15, в и г).

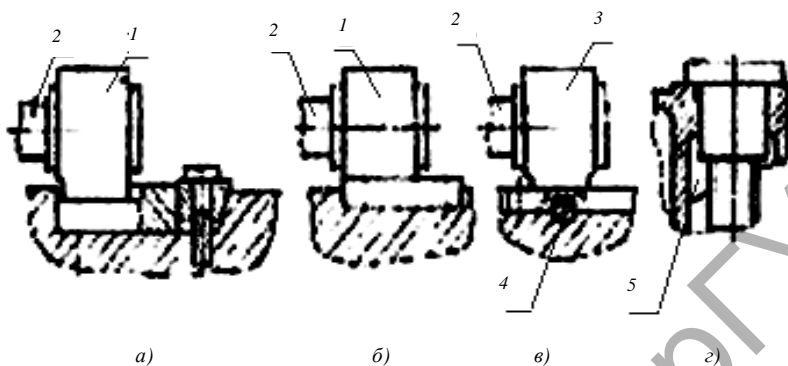


Рисунок 6.15 — Схемы закрепления корпуса опоры винта привода подачи

В представленных на рисунке 6.16 схемах фиксации блока зубчатых колес более надежной, особенно при больших окружных скоростях, является схема (см. рис. 6.15, б), поскольку центробежная сила, действующая на фиксаторы 1, увеличивает усилие закрепления. Это может оказаться важным при фиксации крупного колеса с внутренним зубом в коробке скоростей.

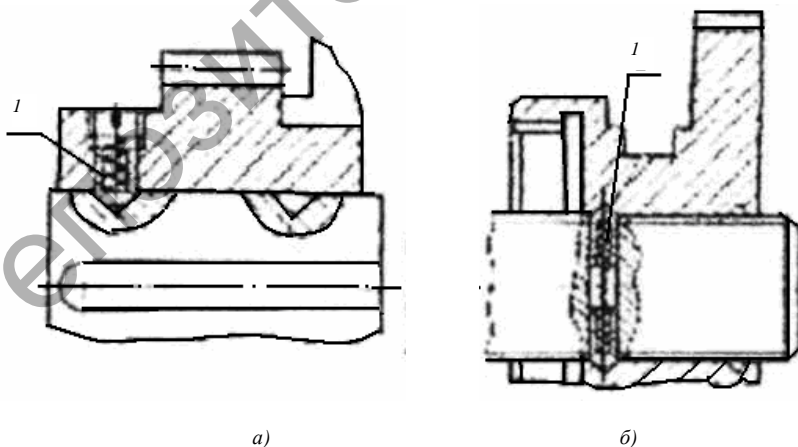


Рисунок 6.16 — Механизм фиксации блока зубчатых колес

6.7 Примеры улучшения технологичности монтажа подшипников качения

Технологичность конструкции оказывает большое влияние на надежность.

Надежность сильно зависит от качества соединения деталей, которое связано с фактическими размерами сопряженных элементов в пределах допусков. Слишком прочное соединение не всегда способствует повышению надежности, так как может повлиять на правильность геометрии сопряженных поверхностей. Поэтому технологический процесс должен гарантировать малое рассеяние размеров даже в пределах допуска.

На рисунке 6.17 показаны схемы монтажа радиальных подшипников, обеспечивающие разную технологичность конструкции с точки зрения получения требуемого натяга. В схеме (см. рис. 6.17, а) не исключен чрезмерный натяг, так как для его образования необходимо переместить внутреннее кольцо 2 подшипника с помощью втулки 3, воздействуя на верхнее кольцо подшипника фланцем 1 через тела качения, в данном случае — ролики. В схеме (см. рис. 6.17, б) натяг устанавливается при перемещении только внутреннего кольца подшипника под воздействием втулок 3 и 4.

На рисунке 6.18 показаны схемы регулировки натяга в системе осевого и радиального подшипников.

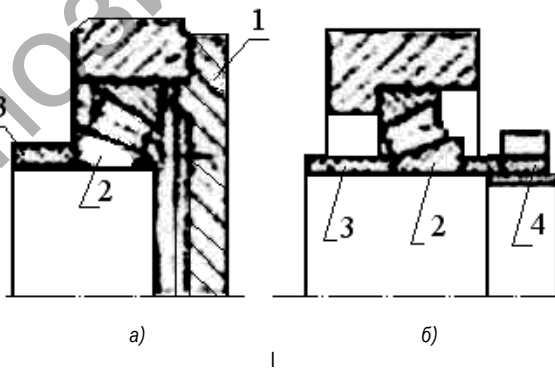
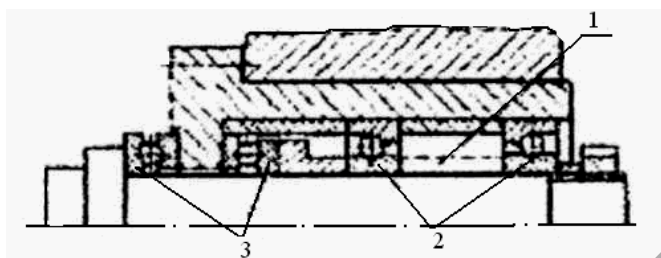
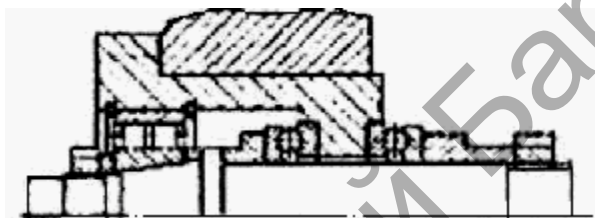


Рисунок 6.17 — Схемы регулирования натяга радиального подшипника



а)



б)

Рисунок 6.18 — Схемы регулировки натяга в осевых и радиальных подшипниках

В схеме (см. рис. 6.18, а) натяг в осевых 1 и радиальных 3 подшипниках создается одновременно, что не обеспечивает требуемой надежности. Не помогает и проставочное кольцо 2, поскольку для радиальных опор требуется большее усилие затяжки гайки, чем для осевых. Этому недостатка лишена конструкция по схеме (см. рис. 6.10, б), где натяг регулируется раздельно для осевых и радиальных подшипников.

6.8 Вопросы триботехники

Большое влияние на надежность оказывает выбор материала ответственных деталей с точки зрения обрабатываемости. Например, разброс твердости точных червячных колес сказывается как на точности колес, так и на равномерности их износа (с этих позиций лучшие результаты достигаются при использовании бронзы).

Стабильность во времени размеров, в первую очередь наиболее ответственных деталей (шпинделей, ходовых винтов и т. д.), а также уровень остаточных напряжений влияют на сохранение точностной надежности. С увеличением прочности материала (например, сложнолегированных сталей) влияние остаточных напряжений на точность снижается.

Износ направляющих, винтов, различных узлов трения является основной причиной потери точности. В станках наибольшее значение имеет абразивный износ. Поскольку износ закаленной стали обратно пропорционален ее твердости, необходимо закалывать поверхности до твердости, превышающей 60% твердости абразива. Мелкие (менее 5 мкм) частицы абразива, содержащиеся в масле, не приносят вреда, поэтому необходимо производить диспергирование масла, обеспечивая размельчение частиц абразива.

7 МОНИТОРИНГ ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ ПРЕЦИЗИОННЫХ ТОКАРНЫХ СТАНКОВ

Качество продукции машиностроения определяет ее конкурентоспособность в условиях рынка, поэтому обеспечение заданной точности станков, обрабатывающих высокоточные детали, является важной задачей. Для автоматизированного металлорежущего станка актуален мониторинг (постоянный контроль) состояния узлов, непосредственно влияющих на качество формообразования. Одним из таких узлов является шпиндельный узел (ШУ), входящий в состав подсистемы привода главного движения (ПГД) станка.

Высокие требования к точности обработки деталей привели к необходимости использования новых технических решений в конструкции ПГД прецизионных станков. Это обусловило актуальность исследования некоторых физических процессов, не учитывавшихся ранее при конструировании узлов станков, а также анализа параметрической надежности формообразующих узлов.

Указанный анализ может быть выполнен только на базе мониторинга ПГД (и в том числе его основного узла — ШУ) по таким характеристикам, как точность положения оси вращения шпинделя, вибрационные характеристики ШУ, жесткость, долговечность и т. д. Эти задачи решают в рамках системного подхода, учитывающего

как структуру ПГД, так и его технико-эксплуатационные характеристики. При этом основное внимание уделяют конструктивным особенностям узлов как элементов подсистемы и их параметрической надежности в эксплуатации (рис. 7.1). В структуре мониторинга подсистемы ПГД выделяют три уровня (рис. 7.2), которые характеризуются динамикой процессов функционирования узлов подсистемы, т. е. охватывают все пространство ее состояний. На первом уровне в качестве динамических характеристик выделены: частота вращения шпинделя, вибрационные характеристики функциональных узлов, динамическое положение оси шпинделя в пространстве; тепловые характеристики узлов. На втором уровне контролируют параметры функциональных узлов (например, стабильность частоты вращения шпинделя и время его разгона до заданного значения).



Рисунок 7.1 — Системный подход к повышению параметрической надежности привода главного движения (ПГД) прецизионных станков на основе мониторинга



I, II, III — уровни структуры мониторинга

Рисунок 7.2 — Схема мониторинга ПГД по динамическим характеристикам

Контроль вибрационных характеристик ПГД осуществляется посредством измерения амплитуды вибраций ШУ и двигателя; при этом параметры вибраций ШУ однозначно характеризуют как положение оси шпинделя, так и жесткость ШУ. Кроме того, контроль амплитуды вибраций обеспечивает проведение статической и динамической балансировки шпинделя, что необходимо для прецизионной обработки. На третьем уровне по результатам мониторинга (см. рис. 7.2) осуществляют диагностирование, наладку, ремонт (замена подшипников), обслуживание (смазка подшипников) или замену выявленных неисправных узлов.

К ШУ прецизионных станков предъявляют ряд требований:

- 1) высокая точность вращения (допускается биение в пределах 0,1—0,5 мкм);
- 2) высокая жесткость, обеспечивающая реализацию заданного технологического режима;
- 3) виброустойчивость, обеспечивающая минимальные колебания переднего конца шпинделя в заданном диапазоне частот;
- 4) минимальные тепловыделение и тепловые деформации ШУ, связанные с потерями на трение при вращении;
- 5) надежность (долговечность, безотказность).

Конструктивное исполнение опор ШУ (скольжения, качения, гидростатических, аэроостатических и др.) определяется классом

точности станка. В прецизионных станках применяют в основном гидро- и аэростатические опоры. В прецизионных токарных модулях типа ТПАРМ производства ПО «Тантал» опоры ШУ аэростатические [43]. Такие опоры использовались ранее в шлифовальных станках с высокой частотой вращения шпинделя (до 100 000 об / мин), сверлильных станках для обработки хрупких неметаллических материалов и единичных образцах токарных станков для алмазного точения.

В соответствии с концепцией системного подхода (см. рис. 7.1), а также методологией динамических испытаний станков на параметрическую надежность [44] разработаны методические основы мониторинга, проводимого на базе виброакустического анализа элементов конструкции станков на различных этапах их жизненного цикла. Минимизация виброакустических колебаний по предложенным методикам в условиях эксплуатации обеспечивала устойчивое получение заданных параметров при прецизионном точении деталей из алюминиевых сплавов на токарных модулях моделей ТПАРМ-100, ТПАРМ-100М и ТПАРМ-80 (I, II, III — уровни структуры мониторинга).

Проведенные динамические испытания ШУ различных станков позволили реализовать предложенную методику мониторинга по динамическим (вибрационным) характеристикам (рис. 7.3). Результатом выполнения комплекса испытаний и мероприятий в рамках мониторинга стало эффективное повышение параметрической надежности токарных модулей типа ТПАРМ.

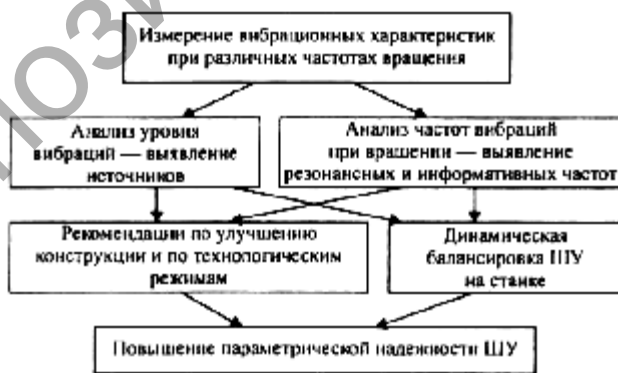


Рисунок 7.3 — Схема мониторинга ШУ станков по вибрационным характеристикам

В начальный период эксплуатации модулей типа ТПАРМ потребовалось провести обширные исследования их надежности и качества обработки деталей. Это позволило в дальнейшем внести ряд конструктивных изменений, сформулировать требования как к технологии изготовления и сборки узлов модулей, так и к особенностям их эксплуатации, в частности, для обеспечения такого теплового режима работы ШУ, который существенно снижает влияние тепловых деформаций на точность обработки [44].

Важное место было отведено исследованиям ШУ 45 модулей, используемых непосредственно в цеховых условиях. При этом как наиболее существенные выделены исследования динамических характеристик ШУ, в частности, анализ вибраций шпинделей в диапазоне до 500 Гц, оказывающих наибольшее влияние на точность обработки и стойкость инструмента.

При прецизионной обработке деталей из медных и алюминиевых сплавов уровень вибраций ШУ незначительно (на 10—15%) превышает уровень вибраций на холостом ходу, что обосновало возможность проведения измерений без резания [44]. Источниками вибровозбуждения являются погрешности изготовления и сборки шпиндельных опор, неуравновешенность элементов ШУ и ПГД в целом.

Для оценки динамического состояния ШУ использовали два комплекта виброизмерителей ВШВ-003-М2 и компьютер типа Notebook со специальным программным обеспечением. Вибродатчики модели ДН-3 устанавливали на опорах ШУ с помощью магнитных оснований. Регистрировали вибрации в диапазоне частот до 4 кГц и отдельные составляющие, связанные с дисбалансом шпинделя.

Информация накапливалась в соответствующей базе данных компьютера, используемого совместно с виброаппаратурой, и передавалась в информационно вычислительную сеть технологического участка. Периодичность измерений определяли по результатам контроля макро- и микрогеометрических параметров изготовленных деталей (точности размеров, погрешности формы, шероховатости); кроме того, измерения проводили при переналадке на обработку другой детали, а также после обслуживания и ремонта модулей.

Измерения вибраций ШУ 45 модулей модели ТПАРМ-100 показали, что их уровень различался первоначально в 10—15 раз, что объяснялось дисбалансом шпинделя. На рисунке 7.4 приведены результаты измерений для пяти модулей с наибольшим и для пяти

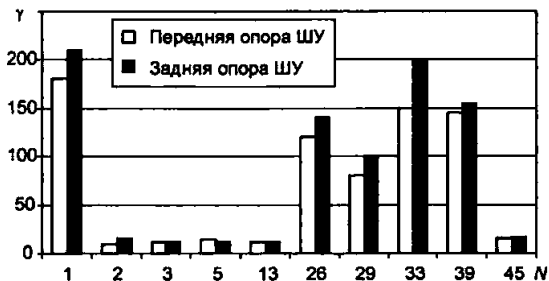


Рисунок 7.4 — Уровень Y вибрации ШУ (в отн. ед.)
(N — номер станка)

модулей с наименьшим уровнем вибраций на частоте 16 Гц, соответствующей частоте вращения шпинделя 1 000 об / мин.

Анализ результатов измерений позволил разработать и реализовать ряд организационно-технических мероприятий, включающих: ужесточение требований к точности изготовления и сборки ШУ; балансировку шпинделей (статическую и динамическую) на специально разработанном стенде перед сборкой модуля; дополнительную динамическую балансировку ШУ вместе с патроном и заготовкой на модуле непосредственно в цеховых условиях по разработанной методике; мониторинг ШУ всех модулей по уровню вибраций на соответствие нормативным значениям, определенным по эталонному станку, и включенным в технические условия на модули моделей ТПАРМ-100М и ТПАРМ-80.

Динамическая балансировка ШУ с патроном и заготовкой позволила снизить уровень вибраций на частоте 16 Гц до 12...15 относительных единиц и обеспечить одинаковый уровень вибраций на передней и задней опорах, что стабилизирует положение шпинделя в пространстве. Одновременно снизился уровень вибраций на резцовом блоке, что улучшило условия работы инструмента.

Мониторинг ШУ по уровню виброакустических колебаний и использование его результатов в производстве обеспечили повышение точности формы деталей из алюминиевого сплава АК-4Т, меди МОБ и других материалов (отклонение от круглости снизилось с 4...5 до 1...2 мкм; непараллельность торцов — с 2...3 до 1...1,5 мкм).

Кроме того, удалось повысить стойкость резцов (по уменьшению числа подналадок на размер детали) в 1,5—2 раза и реализовать на токарных модулях модели ТПАРМ-100М алмазное точение с достижением параметра шероховатости $Ra = 0,04 \dots 0,06$ мкм.

8 НАЛАДКА СТАНКОВ

8.1 Контрольно-измерительные инструменты

При наладке и настройке станков необходимо уделять особое внимание методам и средствам измерений, способам обработки результатов измерений и оценки их точности и достоверности.

Неумение правильно использовать средства измерений или оценить результаты измерений нередко бывает причиной брака и снижения качества продукции.

Для правильного выбора средств измерений и методики оценки результатов измерений необходимо знание основ метрологии — науки об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

Измерение — нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств. В процессе наладки и эксплуатации станков периодически проверяют их настроечные размеры и геометрическую точность на соответствие нормам, указанным в паспорте, а также контролируют качество обработки деталей.

8.1.1 Универсальные измерительные инструменты и приборы для проверки точности станков

Поверочная линейка предназначена для измерения отклонений поверхности от прямолинейности или плоскостности. Линейки выпускают прямоугольного сечения длиной 400, 630 и 1 000 мм и двутаврового сечения длиной 1 600, 2 500 и 4 000 мм. Линейку можно использовать в горизонтальном или вертикальном положении. При проверке горизонтальных поверхностей с установкой линейки на опоры расстояние между опорами должно быть равно $\frac{5}{9}$ длины

линейки, и опоры необходимо располагать на расстоянии $\frac{2}{9}$ длины линейки от ее концов. Рекомендуемые точки опоры обозначены на линейке штрихами.

Поверочный угольник служит для контроля перпендикулярности смежных поверхностей деталей и сборочных единиц станка. Угольники бывают слесарные плоские и с широким основанием. Размеры сторон угольника следующие: 60 × 40; 100 × 60; 160 × 100; 250 × 160 мм.

Щуп (рис. 8.1, а) предназначен для измерения зазора между двумя сопрягаемыми поверхностями. Он выполнен в виде набора калиброванных пластинок различной толщины, укрепленных между двумя щечками, которые предохраняют пластинки от повреждения.

В зависимости от количества и толщины пластинок щупы различают по номерам — от № 1 до № 7. Щуп № 1 включает восемь пластинок толщиной 0,03...0,01 мм, а щуп № 5-14 пластинок толщиной 0,05...1 мм.

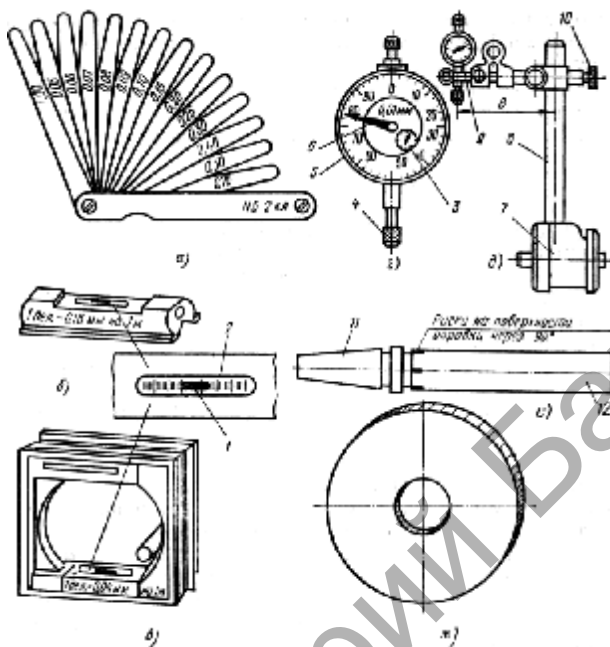
Концевые меры длины представляют собой стальные плоскопараллельные прямоугольные плиты или цилиндрические стержни с двумя зеркально отполированными параллельными поверхностями, расстояние между которыми является их номинальным размером.

Каждая плитка воспроизводит только один размер (например, 50, 25, 10 мм). Плитки комплектуют в наборы. Например, в наборе № 4 содержится десять концевых мер с градацией номинальных размеров 1 мкм.

Уровень применяют для проверки отклонений от горизонтальности. Уровни выпускают с отсчетом по ампуле брусковые (см. рис. 8.1, б) и рамные (см. рис. 8.1, в) длиной 100, 150 и 200 мм. Наиболее распространены уровни с ценой деления 0,05...0,16 мм на длине измерения 1 000 мм. При измерении уровень устанавливают базовой поверхностью на контролируемую поверхность.

Рамный уровень имеет четыре рабочих поверхности, благодаря чему он удобен для проверки как горизонтальных, так и вертикальных поверхностей. При отклонении пузырька 1 воздуха отсчитывают количество делений по шкале, нанесенной на ампуле 2. Измерения уровнем необходимо производить быстро, чтобы избежать влияния температуры воздуха и контролируемых элементов станка.

Индикатор часового типа (см. рис. 8.1, г) предназначен для измерения отклонений детали от правильной геометрической формы



- а — шуп; б — брусковый уровень; в — рамный уровень;
 г — индикатор; д — магнитная стойка; е — контрольная оправка;
 ж — контрольный диск; 1 — пузырек воздуха; 2 — ампула;
 3 — указатель оборотов; 4 — измерительный наконечник;
 5 — циферблат; 6 — стрелка; 7 — основание; 8 — штатив;
 9 — индикатор; 10 — винт; 11 — конический хвостовик;
 12 — цилиндрическая часть

Рисунок 8.1 — Инструменты и приспособления для проверки точности станков

и взаимного расположения поверхностей. Выпускают индикаторы с пределом измерений 0...2 мм (ИЧ-2), 0...5 мм (ИЧ-5), 0...10 мм (ИЧ-10) и ценой деления 0,01 мм. Индикатор снабжен циферблатом 5, стрелкой 6, указателем оборотов 3 и измерительным наконечником 4. При перемещении измерительного наконечника на 1 мм основная стрелка 6 сделает один оборот, а стрелка указателя оборотов повернется на одно деление.

Магнитная стойка с индикатором (см. рис. 8.1, д) служит для измерения биения шпинделей, валов и других вращающихся деталей

станка, а также параллельности рабочих поверхностей столов относительно шпинделя. Стойка включает в себя магнитное основание 7, которым она устанавливается или укрепляется на корпусной, обычно неподвижной детали станка, штатив 8 и индикатор 9. Положение измерительного наконечника индикатора относительно измеряемой поверхности регулируют винтом 10.

Контрольные оправки (см. рис. 8.1, *е*) используют при проверке биения и взаимного расположения элементов станка. При наличии в шпинделе конического отверстия применяют оправку с коническим хвостовиком 11. Цилиндрическую часть 12 оправки используют при измерении. При проверке биения оправку устанавливают по рискам последовательно в четырех положениях с поворотом на 90° . Биение определяется разностью между наибольшим и наименьшим показаниями индикатора.

Прямолинейность перемещения суппорта станка или параллельность хода по направляющим проверяют последовательно по двум противоположным образующим оправки, поворачивая шпиндель и оправку на 180° .

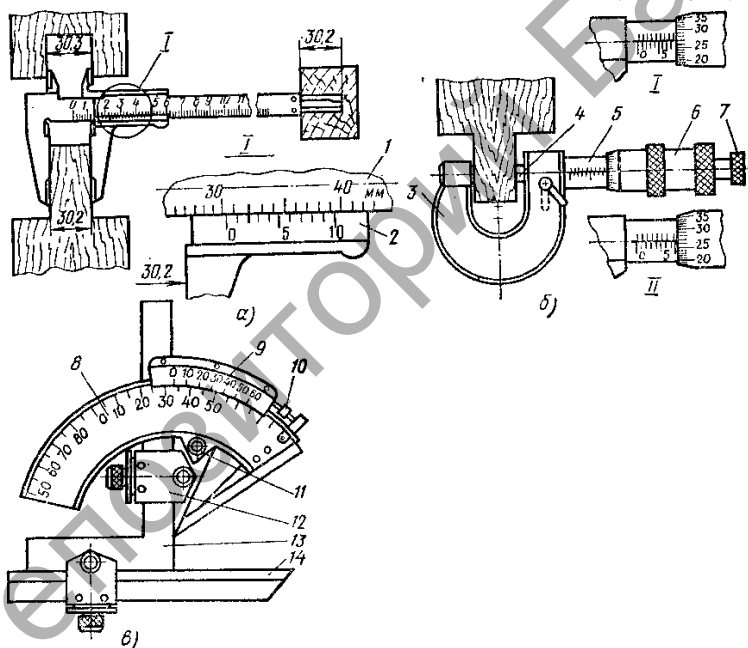
Контрольные диски (см. рис. 8.1, *ж*) предназначены для проверки точности вращения шпинделя и опорных шайб или фланцев круглопильных и шипорезных станков. Диск изготавливают достаточно жестким с точными параллельными плоскостями, которые используют для измерения торцового биения индикатором. Диск крепят на шпинделе вместо детали и производят проверку при поворачивании шпинделя вручную.

Штриховые линейки, складные метры и рулетки изготавливают жесткими, складными и упругими. Пределы измерения жестких линеек 100...1 000 мм, упругих — 150...5 000 мм. Интервал делений линеек равен 1 или 0,5 мм. Торцовая грань линеек совпадает с нулевым штрихом и является базовой при измерениях.

Штангенциркуль (рис. 8.2, *а*) служит для измерения линейных размеров деталей. Штангенциркуль имеет две штриховые шкалы — основную и дополнительную (нониус) 2. Нулевой штрих нониуса указывает целое число миллиметров. Номер штриха, совпадающий со штрихом основной шкалы, указывает число десятых долей миллиметра. Например, измеряемый размер равен $30 + 2 \cdot 0,1 = 30,2$ мм. Штангенциркуль изготавливают с величиной отсчета по нониусу 0,1 и 0,05 мм. Интервал между штрихами основной шкалы равен 1 или 0,5 мм. Допускаемые погрешности штангенциркуля принимаются

равными величинам отсчетов по нониусу. Например, на участке шкалы до 1 000 мм при величине отсчета 0,1 мм допускаемое отклонение составляет $\pm 0,1$ мм.

Микрометр (см. рис. 8.2, б) с ценой деления шкалы 0,01 мм снабжен скобой 3 с измерительной пяткой, стеблем 5, микрометрическим винтом 4 и барабаном 6. Торцовая поверхность винта, обращенная к пятке, является измерительной. Трещотка 7 предназначена для обеспечения постоянства измерительного усилия. Для отсчета числа оборотов винта служит продольная шкала. Она нанесена на стебле с интервалом деления 0,5 мм, равным расстоянию между двумя соседними штрихами, из которых один расположен сверху,



- а — штангенциркуль; б — микрометр; в — угломер; 1 — основная шкала;
 2; 9 — нониусы; 3 — скоба; 4 — микрометрический винт; 5 — стебель;
 6 — барабан; 7 — трещотка; 8 — основание; 10 — винт настройки; 11 — стопор;
 12 — державка; 13 — угольник; 14 — съемная линейка;
 I и II — области измерений штангенциркуля;
 III и IV — области измерений микрометра

Рисунок 8.2 — Измерительные инструменты

а другой снизу. Сотые доли миллиметра отсчитывают по круговой шкале барабана. Указателем служит продольный штрих, проведенный на стебле.

Положению шкал в области измерений III (см. рис. 8.2, б) соответствует размер 8,77 мм ($8 \text{ мм} + 0,5 \text{ мм} + 0,27 \text{ мм} = 8,77 \text{ мм}$), а в области IV — размер 8,27 мм ($8 \text{ мм} + 0,27 \text{ мм} = 8,27 \text{ мм}$).

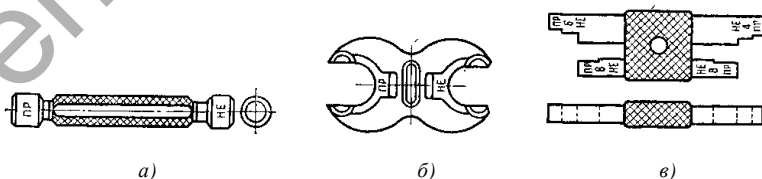
Угломер (см. рис. 8.2, в) используют для измерения величины углов наклона двух смежных поверхностей. Угломеры бывают с нониусом и оптические.

Угломер с нониусом позволяет измерять углы наружные от 0 до 180° и внутренние от 40 до 180° с погрешностью не более $\pm 5'$. Для измерения угловых параметров режущей части инструментов применяют оптические угломеры. Они снабжены лупой, что обеспечивает отсчет величин углов с погрешностью не более $10''$ (угловых секунд).

8.1.2 Измерительный инструмент для контроля точности обработки деталей

Точность обработки деталей контролируют калибрами или измерительными инструментами со шкалой. В зависимости от назначения рабочие калибры бывают следующих видов:

- калибры-пробки (рис. 8.3, а) для контроля диаметра высверливаемых отверстий;
- калибры-скобы (см. рис. 8.3, б) для контроля длины, ширины и толщины изделий, а также расстояний между заплечиками зашипованных деталей;



а — пробка для контроля диаметра отверстия; б — скоба для контроля толщины детали; в — комбинированный калибр

Рисунок 8.3 — Калибры

– калибры-нутромеры для контроля внутренних размеров продолговатых гнезд и проушин шириной 3...18 мм, длиной 6...120 мм, а также проемов размерами 120...1 500 мм;

– калибры-глубиномеры, или уступомеры, для контроля глубины пазов, высоты заплечиков, ширины четвертей и т. п.;

– комбинированные калибры для контроля толщины шипов и высоты заплечиков (см. рис. 8.3, в). Применение такого калибра снижает затраты времени на измерение детали.

Предельные калибры маркируют надписями с обеих сторон с обозначением номинального размера, основного отклонения и номера соответствующего качества (ГОСТ 6449.1—82).

Проходную и непроходную стороны калибра маркируют буквами ПР (проходная) и НЕ (непроходная). Размер одной стороны соответствует наименьшему, а другой — наибольшему предельному размеру контролируемой детали. У калибров, предназначенных для измерения глубины и высоты уступов, заплечиков, пазов, Б — большая сторона, М — меньшая сторона.

Таким образом, с помощью калибров устанавливают, находится ли действительный размер детали в поле допуска. Каждый калибр должен иметь паспорт, в котором указывают марку, наименование и назначение калибра, исполнительные размеры калибра с указанием фактических отклонений, массу, дату изготовления, а также дату последней проверки калибра.

Калибры следует хранить в сухом вентилируемом и отапливаемом помещении при температуре $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ в закрытых шкафах или на специальных стеллажах, защищенных от пыли. Металлические калибры повышенной точности хранят в деревянных футлярах, оклеенных внутри сукном или другим мягким материалом.

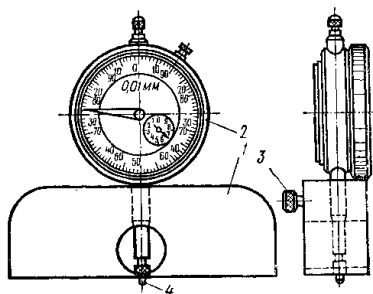
При контроле изделий предельными калибрами измерительные поверхности должны быть чистыми; нельзя использовать калибры для выполнения других работ, кроме измерения; не следует измерять изделие, если температура и влажность в помещении превышают эксплуатационные.

Точность изготовления и степень износа рабочих калибров проверяют эталонными контрольными калибрами (контркалибрами) и концевыми мерами длины. Рабочие калибры контролируют 1 раз в месяц.

8.1.3 Приборы для определения качества обработанной поверхности

Приборы, применяемые для оценки качества поверхности, выбирают в зависимости от вида и высоты неровностей.

Индикаторный глубиномер (рис. 8.4) предназначен для измерения глубины рисок, вырывов, волн и других микронеровностей высотой 800...1 600 мкм. В колодке 1 глубиномера винтом 3 укреплен индикатор 2,



1 — колодка; 2 — индикатор;
3 — винт; 4 — наконечник

Рисунок 8.4 — Индикаторный
глубиномер

который снабжен ощупывающим наконечником 4 с шаровым сегментом радиусом 4 мм. В свободном состоянии наконечник выступает на 2...5 мм над опорной поверхностью колодки. Перед измерением прибор устанавливают на контрольную плоскую плиту и настраивают индикатор, совмещая стрелку с нулевым делением шкалы. При контроле прибор размещают на измеряемой поверхности так, чтобы его наконечник касался дна впадины. Высоту неровности определяют отсчетом по шкале индикатора.

Микроскоп ТСП-4 используют для измерения шероховатости поверхности обработанной детали. Работа прибора основана на методе теневого сечения профиля поверхности. К измеряемой поверхности подводят нож с прямолинейным лезвием, которое освещают пучком параллельных лучей света. Возникающие тени от неровности наблюдают в микроскоп и измеряют с помощью окуляр-микрометра.

Двойной инструментальный микроскоп МИС-11 предназначен для лабораторного исследования шероховатости поверхности с $R_{t\max}$ до 60 мкм.

Образцы сравнения (эталоны) используют в условиях цеха на рабочих местах. Изготавливают их из того же материала, что и обрабатываемую деталь, и аттестуют с помощью микроскопов МИС-11 и ТСП-4М.

Техника измерений шероховатости поверхности изложена в стандарте и более подробно в документации на приборы.

Электроизмерительные приборы, виброметры, шумомеры применяют при испытаниях станков после их ремонта для измерения потребляемой мощности, вибрационных перемещений и шума.

8.2 Нормы точности станков и их проверка

Качество изготовления станков характеризуется геометрической точностью и жесткостью его основных сборочных единиц.

Под геометрической точностью станка понимают:

- степень соответствия установочных поверхностей, базирующих заготовку и режущий инструмент, геометрически правильным поверхностям (плоскости, цилиндру, конусу);
- точность взаимного расположения установочных поверхностей одна относительно другой и относительно направлений основных перемещений, обуславливающих формообразование обрабатываемых поверхностей;
- соответствие фактических перемещений основных элементов станка, несущих заготовку и инструмент, расчетным геометрическим перемещениям.

Жесткостью станка называют его способность обеспечивать необходимую точность обработки при нагрузках, возникающих в процессе работы станка.

Нормы точности и жесткости (допускаемые отклонения) на соответствующие типы станков установлены государственными стандартами.

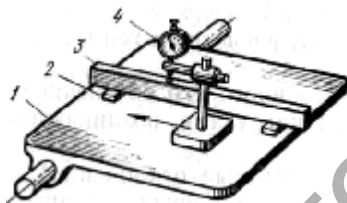
При приемке на заводе-изготовителе станок испытывают на соответствие нормам точности и жесткости. Допустимые отклонения и фактические данные проверки оформляют в виде акта приемки и вносят в паспорт или руководство к станку. Кроме того, в паспорте указывают метод проверки и инструмент, используемые при испытании.

Установленным нормам должны соответствовать и станки, находящиеся в эксплуатации. Их проверяют на точность периодически, во время плановых ремонтов, а также при техническом обслуживании. Цель проверки — получить данные о фактическом состоянии сборочных единиц станка и их взаимном расположении при перемещении. При этом контролируют:

- геометрическую форму установочных и посадочных поверхностей (плоскостность столов, прямолинейность направляющих линейек, овальность посадочного места шпинделя);
- взаимное расположение поверхностей (расстояние, параллельность, перпендикулярность, биение, совпадение осей);
- форму траектории при перемещении (прямолинейное, вращательное);
- соответствие фактических перемещений расчетным (линейные и угловые отклонения).

Перед проверкой станок нужно установить на фундамент горизонтально с отклонением не более 0,1 мм на длине 1 000 мм и жестко прикрепить к фундаменту.

Проверка плоскостности рабочей поверхности каретки (выпуклость не допускается) (рис. 8.5). На рабочей поверхности каретки *1* в продольных, поперечных и диагональных направлениях на двух регулируемых опорах *2* (плоскопараллельных концевых мерах длины) устанавливают поверочную линейку *3* на всю длину (ширину) проверяемой каретки таким образом, чтобы получить одинаковые показания индикатора *4* на концах линейки.



1 — каретка; *2* — концевые меры длины; *3* — поверочная линейка; *4* — индикатор

Рисунок 8.5 — Проверка плоскостности рабочей поверхности каретки

регулируемых опорах *2* (плоскопараллельных концевых мерах длины) устанавливают поверочную линейку *3* на всю длину (ширину) проверяемой каретки таким образом, чтобы получить одинаковые показания индикатора *4* на концах линейки. Индикатор устанавливают на столе так, чтобы его измерительный наконечник касался рабочей поверхности линейки и был перпендикулярен ей.

Индикатор перемещают вдоль линейки и определяют прямолиней-

ность формы профиля поверхности. Отклонение рассчитывают как наибольшую алгебраическую разность результатов измерений.

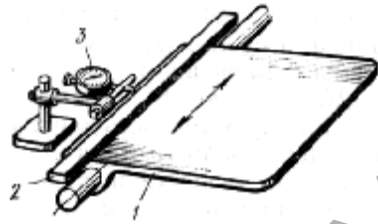
При длине измерения до 400 мм предельное отклонение составляет 0,1 мм; 400...800 мм — 0,15 мм; более 800 мм — 0,2 мм.

Проверка прямолинейности перемещения каретки по направляющим (рис. 8.6). На рабочей поверхности каретки *1* в направлении ее перемещения устанавливают поверочную линейку *2*. На неподвижной части станка укрепляют индикатор *3* так, чтобы его измерительный наконечник касался рабочей поверхности линейки

и был перпендикулярен ей. Линейку на каретке устанавливают так, чтобы показания индикатора в крайних положениях каретки были одинаковыми.

Каретку перемещают по направляющим на всю длину хода. Отклонение определяют как наибольшую алгебраическую разность показаний индикатора.

При длине перемещения до 800 мм предельное отклонение составляет 0,15 мм; 800...1 600 мм — 0,25 мм; более 1 600 мм — 0,3 мм.



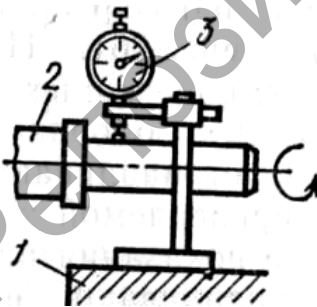
1 — каретка; 2 — поверочная линейка; 3 — индикатор

Рисунок 8.6 — Проверка прямолинейности перемещения каретки по направляющим

Проверка радиального биения шпинделя (рис. 8.7). На станине 1 укрепляют индикатор 3 так, чтобы его измерительный наконечник касался поверхности шпинделя 2 у его основания и был направлен к его оси перпендикулярно образующей. Шпиндель поворачивают на полный оборот.

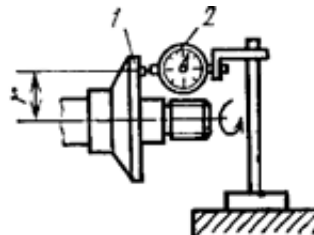
Биение определяют как наибольшую алгебраическую разность показаний индикатора. Предельное отклонение составляет 0,03 мм.

Проверка торцевого биения опорной поверхности шпинделя и фланца под инструмент (рис. 8.8). На неподвижной части станка укрепляют индикатор 2 так, чтобы его измерительный наконечник



1 — станина; 2 — шпиндель; 3 — индикатор

Рисунок 8.7 — Проверка радиального биения шпинделя



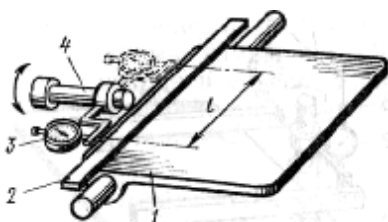
1 — торцевая поверхность фланца; 2 — индикатор

Рисунок 8.8 — Проверка радиального биения шпинделя

(непосредственно или через рычажное приспособление) касался торцевой поверхности фланца 1 и был перпендикулярен ей. Шпиндель поворачивают на полный оборот. Биение определяют как наибольшую алгебраическую разность показаний индикатора. При радиусе измерения $r = 25$ мм предельное отклонение составляет 0,03 мм, при $r = 50$ мм — 0,05 мм.

Проверка перпендикулярности оси вращения горизонтального шпинделя направлению перемещения каретки (рис. 8.9).

На рабочей поверхности каретки 1 устанавливают поворочную линейку 2. На шпинделе 4 укрепляют индикатор 3 так, чтобы его



1 — каретка; 2 — поворочная линейка;
3 — индикатор; 4 — шпиндель

Рисунок 8.9 — Проверка перпендикулярности горизонтального шпинделя направлению перемещения каретки

измерительный наконечник касался рабочей поверхности поворочной линейки и был перпендикулярен ей. Линейку на каретке устанавливают так, чтобы показания индикатора в крайних положениях каретки были одинаковыми. После первого измерения шпиндель поворачивают на 180° и измерения повторяют. Измерения производят в двух крайних положениях шпинделя по горизонтали.

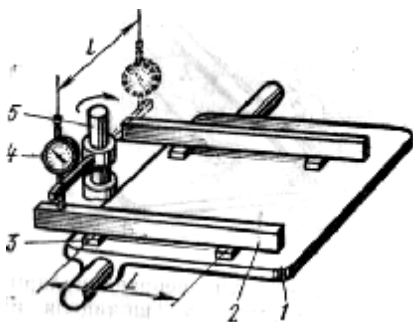
Отклонение определяют как наибольшую алгебраическую разность

показаний индикатора в первоначальном положении и при повороте на 180° в каждом положении шпинделя. При длине измерения $l = 100$ мм предельное отклонение составляет 0,05 мм, при $l = 200$ мм — 0,1 мм.

Проверка перпендикулярности оси вращения вертикального шпинделя рабочей поверхности каретки в направлении ее перемещения (рис. 8.10).

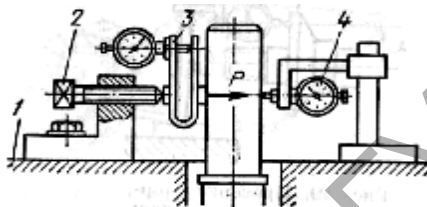
На рабочей поверхности каретки 1 устанавливают на четырех опорах 3 (плоскопараллельных концевых мерах длины) две поворочные линейки 2 одинаковой высоты на расстоянии. На вертикальном шпинделе 5 укрепляют индикатор 4 так, чтобы его измерительный наконечник касался рабочей поверхности линейки и был перпендикулярен ей.

После первого измерения шпиндель поворачивают на 180° и измерение повторяют. Измерения производят в двух крайних положениях шпинделя по вертикали. Отклонение определяют как



1 — каретка; 2 — поверочная линейка;
3 — концевые меры длины;
4 — индикатор; 5 — шпиндель

Рисунок 8.10 — Проверка перпендикулярности оси вращения вертикального шпинделя



1 — каретка; 2 — нагружающее устройство;
3 — динамометр; 4 — индикатор

Рисунок 8.11 — Проверка жесткости шпиндельного узла

наибольшую алгебраическую разность показаний индикатора в первоначальном положении и при повороте на 180° в каждом положении шпинделя. При длине измерения $l = 100$ мм предельное отклонение составляет 0,05 мм, при $l = 200$ мм — 0,1 мм.

Проверка перемещения под нагрузкой вертикального шпиндельного узла относительно рабочей поверхности каретки (рис. 8.11). На каретку 1 помещают нагружающее устройство 2 с динамометром 3 для измерения величины усилия нагружения. Шпиндель устанавливают по высоте относительно стола и фиксируют клиньями и стопорными винтами. Между шпинделем и столом создают плавно возрастающую до заданного предела силу P . Производят три-четыре предварительных нагружения силой P до полной стабилизации показаний индикатора 4 и возврата стрелки в нулевое положение после снятия нагрузки. Затем производят контрольное нагружение, регистрируя показания индикатора. При нагрузке $P = 600$ Н предельное отклонение составляет 0,1 мм.

После проверки геометрической точности и жесткости станок проверяют в работе, обрабатывая пробные образцы при заданных режимах работы.

8.3 Общие сведения о наладке и настройке станков

Наладка оборудования — совокупность трудовых приемов, совершаемых с целью регулирования и согласования взаимодействия всех сборочных единиц оборудования, установления режимов обработки, пробного пуска оборудования и контроля обработанных деталей.

Размерной настройкой станка называется совокупность трудовых действий по обеспечению требуемой точности расположения режущего инструмента относительно установочных баз станка.

По окончании наладочных и настроечных работ оборудование должно обеспечить выполнение заданных функций с требуемой производительностью и качеством обработки. По характеру выполнения различают первоначальную и текущую наладку оборудования.

Первоначальную наладку выполняют по окончании монтажа станков на предприятии, *текущую* — в процессе эксплуатации и после ремонта оборудования.

До выполнения работ по первоначальной наладке необходимо подготовить оборудование к пуску. Этот этап начинается после того, как станки установлены на фундаменты, к ним подведено электропитание, смонтирована система удаления отходов, осуществлена подача сжатого воздуха.

Перед подготовкой к пуску наладчику необходимо внимательно прочитать и изучить:

- паспорт и руководство по обслуживанию станка;
- конструктивные особенности и размещение основных сборочных единиц в станке;
- действие органов управления и системы блокировок;
- назначение всех рукояток, кнопок, переключателей и сигнальных лампочек;
- общие и специальные правила техники безопасности, относящиеся к данному типу оборудования.

В процессе подготовки к первоначальному пуску следует:

- подготовить рабочее место наладчика;
 - удалить с оборудования антикоррозионное покрытие и промыть механизмы станка керосином (при необходимости);
 - протереть рабочие поверхности станка чистой ветошью и покрыть их тонким слоем индустриального масла И-20А (ГОСТ 20799-75).
- Не разрешается применять для очистки станка металлические предметы;

- проверить заземление станка, состояние электроаппаратуры, изоляции проводов и ограждений движущихся частей;
 - смазать трущиеся соединения согласно карте смазки, находящейся в паспорте станка;
 - заполнить маслом емкости гидравлической системы;
 - проверить отсутствие забоин, заусенцев, ржавчины и других дефектов на рабочих поверхностях посадочных мест шпинделей, направляющих столов, суппортов и других узлов;
 - проверить разрежение в системе удаления отходов, подачу сжатого воздуха в пневмосистему, а также подачу электроэнергии;
 - проверить ручную плавность перемещения (на отсутствие рывков и заеданий) шпинделей, столов, суппортов и прочих движущихся частей станка;
 - подготовить режущий и контрольно-измерительный инструмент для выполнения наладочных работ;
 - подготовить необходимое количество пробных заготовок для пуска станка. Режущий инструмент и заготовки должны быть тщательно проверены на соответствие требованиям чертежа и технических условий. Негодные инструменты и заготовки следует изъять;
 - выверить правильность расположения режущего инструмента.
- После устранения выявленных дефектов *необходимо опробовать станок на холостом ходу* в течение 30 мин. При этом нужно проверить:
- утечек масла в смазочных устройствах;
 - безотказность срабатывания кнопок «Пуск» и «Стоп», правильность работы сигнальных лампочек, переключателей и блокировок на остановку и пуск отдельных частей станка путем многократного нажатия соответствующих кнопок;
 - направление вращения рабочих шпинделей и подающих элементов станка;
 - соответствие давления воздуха в пневмосистемах и масла в гидросистемах приводов величинам, указанным в технической документации;
 - отсутствие утечки воздуха (масла) из мест присоединения трубопроводов, крышек, маслоуказателей и т. д.;
 - отсутствие работу отдельных элементов станка на холостом ходу, проверив плавность, отсутствие рывков, наличие замедленного движения.

При повышенном нагреве трущихся частей (выше 40...50°C) из-за отсутствия (недостаточности) смазки или заклинивания работа станка должна быть немедленно прекращена для выяснения причин и устранения дефекта.

По окончании испытания станка на холостом ходу приступают к наладке. Для этого необходимо:

- осуществить наладку отдельных элементов, а затем всего станка;
- установить величины перемещений суппортов, головок, столов и других подвижных частей, отрегулировав положение упоров и ограничителей хода;
- выбрать режим работы станка;
- проверить правильность подвода и отвода рабочих «органов» зажима и освобождения обрабатываемых заготовок;
- произвести размерную настройку режущего инструмента согласно заданным размерам деталей;
- выполнить пробную обработку деталей. После обработки необходимо проверить обработанные поверхности мерительными инструментами и в зависимости от полученных результатов и возможных отклонений выполнить частичную поднастройку или подналадку станка.

Одновременно следует проверить шероховатость обработанной поверхности детали и при недопустимых отклонениях принять необходимые меры (изменить режим обработки, заменить инструмент, устранить вибрацию шпинделя или инструмента).

В процессе пробной обработки деталей наладчик должен внимательно следить за работой отдельных элементов станка. При выявлении каких-либо недостатков в работе (повышенный стук, скрип, недопустимый нагрев подшипников, разрушение режущих кромок резцов, неправильный зажим заготовки на рабочей позиции) нужно выключить станок и устранить дефекты. В многшпиндельных станках наблюдение следует вести последовательно за каждым шпинделем, режущим инструментом, подающим и прижимным элементами.

При получении деталей, годных по геометрической форме, размерам и шероховатости поверхности, станок можно считать готовым к работе.

В процессе устранения неисправностей и при плановых ремонтах станка нарушается его первичная наладка. В этом случае надо повторно провести первичную наладку станка или отдельных его элементов.

При эксплуатации станков возникает необходимость периодически переналаживать станки на обработку деталей, различающихся размерами и формой. При этом следует:

- проверить наличие режущего инструмента и его исправность (отсутствие внешних дефектов);
- очистить элементы станка от стружки и пыли;
- снять или отомкнуть ограждения;
- осмотреть подвижные элементы на отсутствие неисправностей и при необходимости выполнить мелкий ремонт;
- проконтролировать наличие смазки в механизмах и на направляющих. При обнаружении неполадок устранить дефекты и обеспечить подачу смазки;
- произвести переналадку станка согласно заданному размеру и форме обрабатываемой детали, затем осмотреть его на отсутствие видимых неисправностей: незакрепленных ограждений, суппортов, направляющих линейек, упоров и т. п.;
- опробовать станок на холостом ходу, чтобы выявить неисправности и устранить их;
- произвести пробную обработку деталей и измерить их;
- по результатам контрольного замера произвести поднастройку, после чего повторно обработать и измерить детали.

Переналадка считается выполненной в полном объеме, если станок обеспечивает точность и качество обработки деталей при установленной скорости подачи.

8.4 Методы настройки станков

При настройке станка на заданные размеры обработки обеспечивают требуемую точность расположения режущего инструмента относительно установочных элементов станка (столов, направляющих линейек, упоров). Настройка станков бывает статическая и путем обработки пробных деталей.

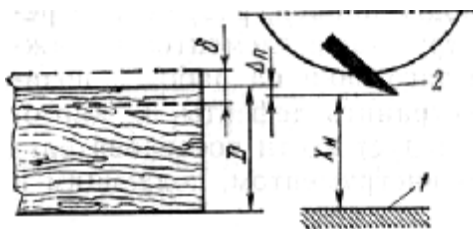
Статическую настройку выполняют на неработающем станке (рис. 8.12) так, чтобы расстояние от лезвия режущего инструмента 2 до установочной базы 1 было равно заданному размеру детали по чертежу. Однако размер обработанной детали оказывается больше или меньше требуемого. Для компенсации возникающих отклонений в расположение режущего инструмента заранее вводят поправку $x_{\text{п}}$ и рациональный настроечный размер $x_{\text{н}}$ вычисляют по формулам: $x_{\text{н}} = D - x_{\text{п}}$ — для деталей, обрабатываемых по толщине, ширине или длине; $x_{\text{н}} = D + x_{\text{п}}$ — для получения внутренних размеров (отверстий, пазов), выбираемых в детали, где D — размер детали, который должен быть получен после обработки. Когда настройка ведется посередине поля допуска детали, размер детали определяется по формуле

$$D = (D_{\text{наиб}} + D_{\text{наим}}) / 2,$$

где $D_{\text{наиб}}$, $D_{\text{наим}}$ — наибольший и наименьший предельные размеры детали по чертежу (поправку $x_{\text{п}}$ для каждого станка определяют опытным путем (в среднем она равна 0,1 мм)).

В зависимости от типа применяемых средств различают следующие **виды настройки**:

1) *статическая настройка с использованием встроенных в станок измерительных устройств*, к которым относятся механизмы настройки с ручным приводом, снабженные встроенными устройствами в виде лимбов, шкал, нониусов или цифровыми отсчетными устройствами. Наладчик перемещает рабочий орган на требуемый настроечный размер и одновременно визуально контролирует величину перемещения по отсчетному устройству;



1 — установочная база; 2 — резец

Рисунок 8.12 — Схема статической настройки станка

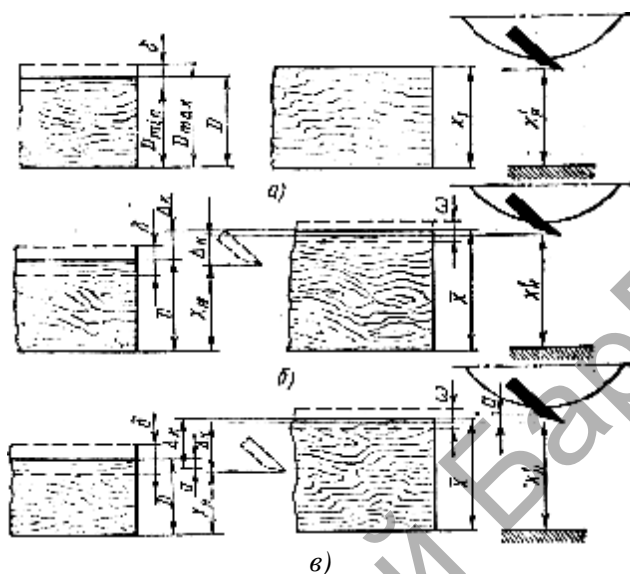
2) *статическая настройка станка по эталону* (шаблону), которая заключается в регулировке положения инструмента до касания его лезвий рабочей поверхности шаблона. Шаблон изготавливают из легкого металла, древесно-слоистого пластика или древесины твердых пород. Предельное отклонение на рабочий размер шаблона должно быть меньше предельного отклонения на размер детали, подлежащей обработке. Часто в качестве эталона используют ранее изготовленную на станке деталь. Эталоны целесообразно применять при настройке многошпиндельных станков, а также в тех случаях, когда учитывают одновременно несколько настроечных размеров или взаимных положений режущих инструментов, обрабатывающих деталь сложной формы. Настройка станка по эталону в ряде случаев не обеспечивает требуемой точности и не является окончательной. После обработки некоторого количества деталей необходимо дополнительно регулировать и поднастраивать станок;

3) *статическая настройка станка с помощью универсальных измерительных приборов*, которую целесообразно использовать для станков, налаживаемых на один настроечный размер или не имеющих встроенного отсчетного устройства. В качестве измерительного инструмента применяют индикаторные стойки, микрометры, штангенциркули.

Контроль перемещения рабочего органа в момент его регулировки позволяет достичь высокой точности настройки. Однако универсальные приборы нельзя использовать для настройки элементов, к которым затруднен доступ.

Статистическая настройка с помощью настроечно-измерительных приспособлений позволяет осуществлять настройку с высокой точностью. Приспособления конструируют для конкретного станка. Они могут быть оснащены универсальными измерительными средствами (индикаторами);

4) *настройка станка путем обработки пробных деталей*. Станок настраивают сначала с помощью встроенного в станок отсчетного устройства или других средств, используемых при статистической настройке (рис. 8.13). Предварительную настройку выполняют с меньшей точностью, чем статистическую. Обычно величина первоначального размера x_n существенно отличаются от величины среднего размера детали $(D_{\text{наиб}} + D_{\text{наим}}) / 2$ и выбирается такой, чтобы при обработке деталей по толщине (длине и ширине) размер их



a — контроль размера предельным калибром;
 $b, в$ — измерение размеров мерительным инструментом
 Рисунок 8.13 — Настройка станка путем обработки пробных деталей

получился несколько большим, чем нужно. Это исключает появление неисправимого брака. После предварительной грубой настройки станка обрабатывают пробные заготовки (3—5 шт.). Полученные детали контролируют калибром или измеряют мерительным инструментом.

Настройку путем обработки пробных деталей с контролем их размеров предельным калибром осуществляют тем же рабочим калибром, который используют в дальнейшем при контроле деталей всей партии (см. рис. 8.13, a). Если размер x_1 одной пробной детали (или нескольких деталей) находится в пределах допуска δ , то настройка считается правильной и разрешается обрабатывать всю партию деталей.

Настройка по пробным деталям с измерением их размеров универсальным мерительным инструментом с отсчетным устройством (микрометром, индикаторной скобой, штангенциркулем) позволяет

определить по результатам измерений среднее значение размера x трех-пяти пробных деталей и поле рассеивания ω размеров (см. рис. 8.13, б). Величину поднастройки x_k , которую нужно скорректировать перемещением режущего инструмента, определяют по формуле

$$x_k = x - D,$$

где x — среднее значение размеров всех пробных деталей;

D — средний размер детали по чертежу.

В результате поднастройки получают новое значение настроечного размера x_n . Если этот размер находится в пределах допуска δ , обрабатывают всю партию деталей.

Рассмотренный метод расчета величины поднастройки применяют при обработке небольших партий деталей, когда износ инструмента невелик и не может оказать существенного влияния на точность обработки. В процессе обработки крупных партий деталей, сопровождаемой быстрой потерей точности (см. 8.13, в), величину поднастройки x_k определяют по формуле

$$x_k = x - D + a,$$

где a — возможное увеличение размера деталей от систематических переменных погрешностей, вызываемых износом инструмента или его смещением в конце обработки партий аналогичных деталей на данном станке.

Таким образом, удастся увеличивать период работы станка без поднастройки и повысить производительность труда.

9 ПРИЧИНЫ ОТКАЗОВ ДЕТАЛЕЙ СТАНКОВ

9.1 Влияние поверхностного слоя на эксплуатационные свойства деталей

Роль поверхностного слоя. Отказы изделий чаще всего вызываются определенными физическими и физико-химическими процессами, протекающими в их деталях. Эти процессы определяются первоначальными свойствами материала и поверхностей деталей,

конструкцией изделия, условиями работы. Изучение сущности происходящих процессов является необходимой предпосылкой для разработки методов управления надежностью изделий.

Особую роль в обеспечении эксплуатационных свойств деталей машин играет их поверхностный слой. Поверхность детали контактирует с поверхностями других деталей и с окружающей средой. При изгибе и кручении детали механические напряжения на поверхности значительно выше напряжений в ее теле. Поэтому часто разрушения деталей или происходят только в их поверхностном слое (износ) или начинаются в нем (усталостные разрушения).

Формирование поверхностного слоя. Поверхностный слой деталей характеризуется микрогеометрией поверхности (шероховатостью), микроструктурой металла, упрочнением и остаточными напряжениями.

Свойства поверхностного слоя деталей создаются на протяжении всего технологического процесса их изготовления, начиная с получения заготовки, а не только на финишных операциях. Параметры детали, в том числе свойства поверхностного слоя, достигаемые на последующих операциях, связаны с параметрами, полученными на предшествующих операциях. Это явление называют *технологической наследственностью*.

В процессе эксплуатации детали под влиянием окружающей среды, силовых и температурных факторов поверхностный слой испытывает большие изменения. Благодаря избытку энергии он вступает во взаимодействие с окружающей средой, в результате чего возникают явления адсорбции (поглощения), когезии (сцепления), адгезии (прилипания) и др. Интенсификации этих процессов способствует пластическая деформация тонких поверхностных слоев в процессе трения. Названные явления сопровождаются образованием вторичных структур, которые защищают основной металл от разрушения.

Влияние упрочнения поверхностного слоя на эксплуатационные свойства деталей. Упрочнение характеризуют степенью наклепа и глубиной наклепанного слоя. Степень наклепа, %, определяется по формуле:

$$N = \frac{H_1 - H}{H} 100\% ,$$

где H_1 — микротвердость поверхности;

H — микротвердость исходного металла.

При обработке поверхности степень наклепа увеличивается с ростом сил резания. Этому способствуют, например, при точении, увеличение глубины резания, подачи и радиуса округления режущего лезвия, износа резца, а также уменьшение его переднего угла; при шлифовании — увеличение глубины шлифования, размера и радиуса округления абразивных зерен. Глубина наклепанного слоя увеличивается с повышением продолжительности воздействия сил резания на поверхностный слой металла, например с увеличением числа ходов выхаживания при шлифовании.

При нагреве наклепанного слоя металл возвращается в исходное состояние — происходит отдых (разупрочнение, возврат). Во многих случаях разупрочнение усиливается с возрастанием скорости резания. Следовательно, упрочнение поверхностного слоя зависит от соотношения силового и теплового факторов при образовании поверхностей.

Упрочнение поверхностного слоя до определенной степени снижает износ деталей, а перенаклеп приводит к ускоренному износу в результате отслаивания переупрочненных частиц металла. Упрочнение препятствует появлению в поверхностном слое усталостных трещин. В настоящее время применяются разные способы упрочнения поверхностным пластическим деформированием: алмазное выглаживание, обкатывание, прошивка отверстий шариком и др.

Влияние остаточных напряжений на эксплуатационные свойства деталей. Напряжения, которые сохраняются при снятии внешней нагрузки называют остаточными напряжениями в детали. Напряжения первого рода охватывают значительную часть детали, второго — одно или несколько зерен металла, третьего — возникают в пределах нескольких кристаллических ячеек. В поверхностном слое детали появляются напряжения первого или второго рода.

К сжимающим напряжениям в поверхностном слое и растягивающим в нижележащих приводят:

- 1) пластическая деформация металла в поверхностном слое, сопровождающаяся снижением его плотности и увеличением объема, которому препятствуют недеформированные нижележащие слои;
- 2) вытягивание зерен поверхностного слоя при резании с образованием элементной стружки, когда трение задней поверхности инструмента по обработанной способствует дополнительному их вытягиванию.

Остаточные напряжения оказывают существенное влияние на эксплуатационные характеристики деталей. Благодаря остаточным

сжимающим напряжениям усталостная прочность деталей повышается. Остаточные растягивающие напряжения снижают ее.

Значительные пластические деформации, имеющие место в поверхностном слое детали при трении, снижают остаточные растягивающие напряжения, которые появились в процессе обработки детали, и довольно быстро приводят к остаточным сжимающим напряжениям.

В результате этого износостойкость деталей не зависит от величины и знака остаточных напряжений в поверхностном слое, возникших в процессе изготовления деталей.

Влияние структурных изменений в поверхностном слое на эксплуатационные свойства деталей. При определенных условиях теплота резания может вызывать фазовые превращения в поверхностном слое обрабатываемой детали. Например, при шлифовании закаленной стали засаленным кругом, большой глубине резания или недостаточном охлаждении возникают прижоги, представляющие участки отпущенного металла. Они являются причиной более интенсивного изнашивания поверхностей. В отпущенном металле, имеющем меньший удельный объем, возникают неблагоприятные остаточные растягивающие напряжения. На границах прижогов и нормального металла появляются шлифовочные трещины. Все это снижает усталостную прочность деталей.

9.2 Износ деталей

Влияние износа на работоспособность станка. Износ является результатом изнашивания, которое представляет собой процесс разрушения и отделения материала с поверхности твердого тела и (или) накопления его остаточной деформации при трении, проявляется в постепенном изменении размеров и (или) формы тела.

Станок состоит из большого числа узлов разного функционального назначения и их износ в различной степени снижает его работоспособность. Наиболее сильно влияет на работоспособность станка износ целевых механизмов, участвующих в образовании формы обрабатываемых деталей. Износ опор шпинделя, направляющих, винтовых пар, червячных делительных пар, фиксирующих механизмов, базирующих элементов приспособлений определяет параметрическую надежность станка. Износ зубчатых колес и других

деталей приводов наиболее сильно влияет на надежность функционирования, так как уменьшение их сечений при износе ведет к поломкам.

Основными показателями износа являются линейный износ, скорость изнашивания и интенсивность изнашивания. Наиболее часто определяют линейный износ U , т. е. уменьшение размера детали вследствие износа в направлении, перпендикулярном к трущейся поверхности. Иногда линейный износ измеряется не по нормали к трущейся поверхности, а определяется как изменение основных параметров детали. Например, на ходовых винтах измеряют износ по шагу, т. е. изменение шага в результате износа винта.

Скорость изнашивания γ характеризует изменение износа во времени и определяется по формуле

$$\gamma = \frac{dU}{dt}.$$

Интенсивность изнашивания I характеризует изменение износа с ростом пути трения S или объема выполненной работы и вычисляется по формуле

$$I = \frac{dU}{dS}.$$

Часто находят *среднюю скорость* и *среднюю интенсивность* изнашивания за время Δt или на пути трения по формулам:

$$\gamma = \frac{\Delta U}{\Delta t},$$

$$I = \frac{\Delta U}{\Delta S}.$$

Виды изнашивания. Шероховатость и волнистость поверхностей определяют дискретность контакта деталей, которая вызывает многократное повторение элементарных актов разрушения микрообъемов материала. Разрушение сопровождается процессами упругого и пластического деформирования микрообъемов материала, окислением, срывом окисных пленок. Усталостная теория изнашивания основную

причину износа контактирующих деталей объясняет возникновением усталостных трещин, приводящих к отделению мельчайших частиц материала или его окислов.

В зависимости от внешних воздействий на поверхности деталей, окружающей среды и свойств поверхности имеют место следующие **виды изнашивания**:

1) **механическое** — изнашивание в результате механических взаимодействий контактирующих материалов;

2) **коррозионно-механическое** — изнашивание в результате механического воздействия, сопровождаемого химическим и (или) электрическим взаимодействием материала и среды;

3) **абразивное** — механическое изнашивание материала в результате, в основном, режущего или царапающего действия на него твердых частиц, находящихся в свободном или закрепленном состоянии;

4) **гидроэрозионное (газоэрозионное)** — эрозионное изнашивание в результате воздействия потока жидкости (газа);

5) **гидроабразивное (газоабразивное)** — абразивное изнашивание в результате действия твердых частиц, взвешенных в жидкости (газе) и перемещающихся относительно изнашивающегося тела;

6) **усталостное** — результат циклического воздействия на микровыступы трущихся поверхностей. Отделение частицы износа может происходить в результате наклепа поверхностного слоя, который становится хрупким и разрушается (иногда его называют изнашивание при хрупком разрушении).

Различают контактную усталость и усталостное изнашивание.

Контактная усталость возникает при качении без проскальзывания и проявляется в развитии местных очагов разрушения (питтинг).

Усталостное изнашивание характерно для трения скольжения и проявляется в отделении микрообъемов поверхности.

В сопряжениях типа «кулачок» (ролик, зубчатые передачи, опоры качения и другие могут иметь место оба вида разрушения). При большом проскальзывании основную роль играет изнашивание, которое интенсивнее, чем образование питтинговых разрушений поверхности;

7) **кавитационное** — гидроэрозионное изнашивание при движении твердого тела относительно жидкости, при котором пузырьки газа захлопываются вблизи поверхности, что создает местное повышение давления или температуры;

8) **изнашивание при схватывании и заедании** — явление прочного соединения металлов в результате взаимного трения или совместного деформирования при температуре ниже температуры рекристаллизации. При этом образуются прочные металлические связи в зонах непосредственного контакта поверхностей. В местах схватывания исчезает граница между соприкасающимися телами, происходит сращивание одно- и разноименных металлов;

9) **заедание** — наиболее яркая форма проявления схватывания. При этом на поверхности одного тела образуются широкие и глубокие борозды с неровными краями, иногда слившиеся, а на поверхности контртела присутствуют крупные наросты. Может произойти полное заклинивание деталей;

10) **окислительное** — коррозионно-механическое изнашивание, при котором основное влияние на изнашивание оказывает химическая реакция материала с кислородом или окисляющей окружающей средой;

11) **изнашивание при фреттинге** — механическое изнашивание соприкасающихся тел при малых колебательных относительных перемещениях (образование мелких «оспин» и «язвин»);

12) **изнашивание при фреттинг-коррозии** — процесс разрушения плотно контактирующих поверхностей пар металл-металл или металл-неметалл в результате малых колебательных перемещений. Для возбуждения фреттинг-коррозии достаточны перемещения поверхностей с амплитудой 0,025 мкм. Разрушение заключается в образовании на соприкасающихся поверхностях мелких язвин и продуктов коррозии в виде пятен, налета и порошка;

13) **электроэрозионное** — эрозионное изнашивание поверхности в результате воздействия разрядов при прохождении электрического тока.

Влияние условий трения на износ. Скорость изнашивания зависит от множества факторов. В случае абразивного изнашивания износ пропорционален давлению в зоне контакта p и пути S трения и определяется по формуле $U = kpS$.

Коэффициент k зависит от материала сопряженных деталей и условий в зоне контакта.

Износостойкость материалов зависит от их химического состава и структуры. Обычно более износостойки материалы с мелкозернистой структурой, с графитовыми включениями, выполняющими

роль твердой смазки, а также материалы с твердыми составляющими, воспринимающими нагрузку (баббиты).

При трении без смазочного материала (*сухое трение*) на ряде участков контакта возникают значительные давления и температура, имеет место молекулярное взаимодействие поверхностей и, как результат, наибольшая скорость изнашивания. Часто сухое трение сопровождается заеданием и схватыванием поверхностей.

Жидкостное (гидростатическое или гидродинамическое), а также аэростатическое трение обеспечивается слоем смазочного материала, разделяющего трущиеся поверхности. Их износ при этом минимальный. Он является следствием физико-химического взаимодействия материала детали и смазочного материала, попадания твердых частиц в зазор между деталями, нарушения жидкостного трения.

Тонкие слои смазочного материала (не более 0,1...0,2 мкм) обеспечивают *граничное трение*, при котором на процессы трения и изнашивания оказывают влияние различные явления: перераспределение нагрузки на поверхностные микрообъемы материала, локальные разрывы масляной пленки, физико-химическое взаимодействие с поверхностным слоем детали поверхностно-активных веществ, содержащихся в смазочном материале. Эти явления приводят к уменьшению пластических деформаций и понижению прочности материала. При граничном трении скорость изнашивания значительно ниже по сравнению с трением без смазочного материала.

9.3 Повреждения деталей

Повреждения тела деталей. Существенную роль в нарушении работоспособности станков играют коробление, пластические деформации, статические поломки и усталостные разрушения деталей.

Коробление деталей — самопроизвольная деформация их в результате изменяющихся во времени остаточных напряжений, чему способствуют внешняя нагрузка и нагрев. Коробление особо ответственных деталей (станины, шпиндели) приводит к снижению точности станка, изменению контактных напряжений, повышенному износу.

Для стабилизации размеров базовых чугунных деталей применяют старение. Естественное старение пригодно для деталей любой массы и сложности, но из-за большой длительности используется

сравнительно редко. Отжиг при 500...600°C приводит к резкому снижению остаточных напряжений, но не полностью устраняет коробление, так как не упрочняет металлическую основу чугуна. Более эффективен отжиг с последующим медленным охлаждением при температуре ниже 350°C. Вибрационное старение и статическая перегрузка целесообразны для деталей сравнительно малой жесткости с одним или двумя преобладающими размерами.

По окончании старения в деталях сохраняется некоторый уровень остаточных напряжений. Последующая механическая обработка сопровождается их перераспределением и короблением деталей. Поэтому для особо точных деталей применяют двукратное старение; при этом до первого старения выполняют черновую обработку, после него — полустовую, а после второго старения — чистовую с минимальным съемом металла.

Пластические деформации имеют место, когда рабочие напряжения в деталях превосходят предел текучести. В результате может происходить вытягивание крепежных винтов, искривление осей и валов.

Усталостные поломки происходят при многократном приложении нагрузок даже в том случае, когда напряжения в деталях ниже предела упругости.

Усталостное разрушение начинается с появления трещины усталости. Она возникает у поверхности детали возле какого-либо дефекта, являющегося концентратором напряжения. Дефектами поверхностного слоя являются шлифовочные трещины и прижоги, зерна остаточного аустенита, риски от механической обработки, забоины, коррозионные раковины, неметаллические включения. Под действием переменной нагрузки трещина медленно распространяется вглубь тела детали, образуется зона усталостного развития. Из-за усталостных поломок могут выходить из строя зубчатые колеса, валы, пружины, винты.

Основными путями повышения усталостной прочности являются предотвращение в деталях концентраторов напряжений с помощью технологических и конструктивных методов и создание в их поверхностном слое остаточных сжимающих напряжений.

Повреждения поверхностей деталей. Наиболее часты следующие существенные изменения макрогеометрии и свойств поверхностного слоя деталей: пластические деформации, усталостное выкрашивание, налипание посторонних частиц, коррозия.

Пластические деформации поверхностного слоя (смятие) происходят, когда давление в зоне контакта превосходит предел текучести. По этой причине из строя выходят валы (смятие шлицев и шпоночных пазов), шпонки, штифты, резьбовые и зажимные детали. Для предотвращения смятия необходимо повышать твердость поверхностного слоя детали.

Усталостное выкрашивание имеет место при трении качения, при качении со скольжением, а иногда и при скольжении. Выкрашивание начинается с появления усталостных трещин, которые зарождаются в тех местах контактных площадок, где имеются дефекты микроструктуры или концентраторы напряжений. На развитие процесса влияет смазочный материал, который проникает в образовавшиеся трещины и расклинивает их при нагружении, что приводит к выламыванию кусочков металла из поверхностного слоя детали.

Первоначальные оспины (питтинги) могут «залечиваться» в результате наклепа, а также снижения контактного давления в условиях выглаживания поверхностей. В случае прогрессирующего выкрашивания первоначальные питтинги развиваются, и с течением времени на поверхности детали образуются крупные оспины.

Этот вид разрушения характерен для контактных поверхностей зубчатых колес, тел качения и беговых дорожек шариковых и роликовых подшипников, шаров винтовых пар качения.

Основными мероприятиями, предотвращающими поверхностную усталость, являются повышение твердости поверхностного слоя, снижение давления в зоне контакта и предупреждение появления концентраторов напряжений в поверхностном слое детали.

Налипание на поверхность посторонних частиц изменяет ее форму и свойства и является следствием адгезии, когезии, адсорбции, диффузии и других процессов. Оно проявляется в виде «сыпи» на поверхности, нароста на режущих инструментах, и, соответственно, задиоров на поверхности обрабатываемой детали.

10 РАВНОПРОЧНОСТЬ МАШИН

10.1 Основные понятия и задачи

На протяжении десятков лет в технической литературе промышленно развитых стран отмечается значение равнопрочности

машин и публикуются упреки потребителей в адрес конструкторов, не сумевших устранить разновременность отказов элементов конструкций. Такого рода претензии могут быть в той или иной мере предъявлены почти к любой современной машине, в том числе к любому объекту массового или крупносерийного производства. Техничко-экономические последствия неравнопрочности, выражающиеся в отказах, простоях, ремонтах, повышенном расходе запасных частей, снижении эффективности и увеличении стоимости эксплуатации машин, весьма значительны, поэтому проблема неравнопрочности машин заслуживает серьезного внимания. Ее следует рассматривать как один из разделов проблемы надежности, поскольку большинство задач, связанных с неравнопрочностью машин, теснейшим образом переплетается с вопросами обеспечения их надежности. Имеются, однако, и специфические задачи. Так, хотя проблема неравнопрочности машин не нова, до сих пор не существует единой трактовки основных понятий проблемы, единства взглядов на цели и задачи машиностроителей в данной области, общепринятых методов оценки равнопрочности и даже общепринятой терминологии.

Наиболее употребляемы следующие определения, которые хорошо согласуются с физическим смыслом проблемы:

1. **Неравнопрочность** — свойство изделия, заключающееся в неравенстве ресурсов его составных элементов.

2. **Равнопрочность** — свойство изделия, заключающееся в отсутствии проявлений неравнопрочности на протяжении заданного периода эксплуатации или заданной наработки.

«Прочность» в данном случае подразумевает стойкость изделия против любого вида разрушения — изнашивания, усталости, коррозии, старения и др.

Неравенство ресурсов компонентов изделия может не проявляться в течение некоторого периода его работы. По мере увеличения наработки изделия (или продолжительности его использования) рано или поздно возникнут отказы отдельных деталей, постепенно или быстро учащающиеся. В конструкциях неудачных или плохо изготовленных эти отказы возникают рано и происходят часто, в отработанных и качественно изготовленных конструкциях отказы длительное время не возникают, а затем в течение значительного периода случаются сравнительно редко. Существует возможность создания конструкции, которая вообще не отказывает на протяжении

заданной наработке или отказывает не чаще, чем это разрешено техническими условиями. Отсюда вытекает приведенное выше определение термина «равнопрочность».

Следует подчеркнуть, что неравнопрочность — свойство, присущее почти любому изделию, в то время как равнопрочность — свойство, присущее лишь продуманным и тщательно доведенным конструкциям, причем, только временно, так как за пределами обусловленного периода эксплуатации неизбежно проявится свойственная данному изделию неравнопрочность.

Равнопрочность изделий следует рассматривать только в статистическом аспекте с использованием кривых убыли, отражающих закономерности распределения ресурсов элементов изделия. Например, узел состоит из шести основных деталей, распределения ресурсов которых известны. Тогда равнопрочность узла в общем виде характеризуется кривыми убыли соответствующих деталей, показанными на рисунке 10.1. Очевидно, что оценка равнопрочности узла будет существенно различной при разных его наработках [45].

Например, до достижения наработки T_1 неравнопрочность элементов узла не проявилась (ни одна из его деталей не потеряла работоспособности), а ко времени достижения наработки T_4 потребуется

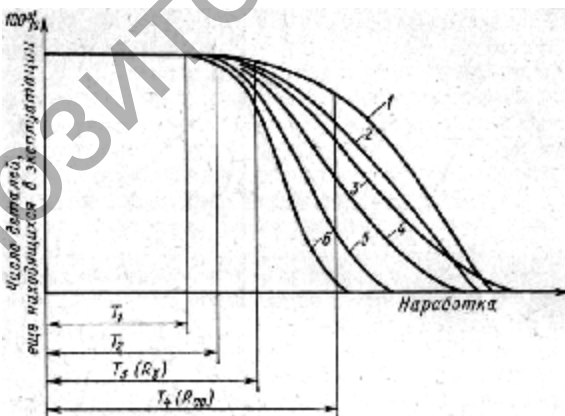


Рисунок 10.1 — Кривые убыли шести условных деталей узла, имеющего гамма процентный ресурс R_r , средний ресурс R_{cp}

заменить 17, 29, 34, 51, 74 и почти 96% деталей 1—6 соответственно (см. рис. 10.1). Таким образом, нельзя судить о равнопрочности «вообще», можно и необходимо оценивать равнопрочность узла за определенный период эксплуатации или до достижения им определенной наработки.

Исходя из приведенных выше определений основных терминов, полагаем равнопрочными: деталь, имеющую несколько рабочих элементов, если ни один из них не теряет работоспособности ранее заданной наработки; комплект одноименных деталей одинакового назначения, если входящие в комплект детали не требуют ремонта или замены ранее заданной наработки; агрегат (узел), если входящие в него детали не требуют ремонта или замены, вызывающей необходимость в разборке агрегата ранее заданной наработки; машину при отсутствии существенных отказов ее узлов, агрегатов или систем в течение заданной наработки или заданного периода эксплуатации. Существенным считается отказ, вызывающий необходимость в трудоемкой разборке узлов, агрегатов или систем для ремонта.

Приведем пример, иллюстрирующий смысл терминов «неравнопрочность» и «равнопрочность».

При ускоренных испытаниях зубчатых колес коробки передач число циклов до поломки при изгибе различных зубьев одного колеса колебалось в пределах от 1:1,5 до 1:4, в отдельных случаях до 1:7. Тем не менее ресурс зубчатых колес был достаточным и, согласно определению термина «равнопрочность», он удовлетворял требованиям равнопрочности. При попытке применить ту же коробку передач для более нагруженной машины произошли ранние поломки зубьев, и, следовательно, зубчатые колеса не обеспечили требования равнопрочности.

Итак, подобно тому, как допустима неточность изготовления изделий, не выходящая за установленные пределы, неравнопрочность изделий терпима, если ее проявления не нарушают установленных для них норм надежности. В таком случае изделия условно считают равнопрочными в пределах заданной нормы. При повышении требований может измениться и оценка: то же изделие будет квалифицироваться как неравнопрочное. Любые характеристики степени неравнопрочности изделий имеют познавательную ценность сами по себе, но для отнесения изделий к одной из двух категорий (равнопрочное или неравнопрочное), эти характеристики следует

анализировать в сопоставлении с нормативными показателями надежности и равнопрочности изделий. Вместе с тем даже терпимую неравнопрочность изделия необходимо рассматривать как недостаток, требующий количественной оценки и анализа.

Предложенная реалистическая трактовка понятия «равнопрочность» радикально отличается от широко распространенной трактовки, подразумевающей равную долговечность всех элементов изделия. Еще в 1858 году Оливер Холмс писал о «логичной конструкции» кареты, все детали которой должны проработать 100 лет без единого отказа, а в день своего столетия выйти из строя одновременно. Поскольку эта задача для сложных конструкций неосуществима, ниже предложена иная ее постановка и перечислены основные причины неравнопрочности.

Первая из них, уже упоминавшаяся, заключается в рассеивании ресурсов деталей, узлов и агрегатов. Даже в одинаковых условиях эксплуатации долговечность изделий каждого вида характеризуется своей кривой распределения, потеря работоспособности деталей происходит при различных наработках, прогноз которых с вероятностных позиций возможен, однако с ограниченной точностью и лишь при наличии обширной информации, почти всегда отсутствующей на стадии проектирования.

Вторая причина неравнопрочности заключается в разнообразии функций разных деталей машин и значительных различиях в характере их эксплуатационной нагруженности. Детали в целом и их элементы подвергаются растяжению, сжатию, изгибу, смятию, кручению, изнашиванию, коррозии, старению, причем различные виды воздействий могут происходить в отдельности или совместно в самых различных сочетаниях. Даже одинаковые детали одного агрегата, выполняющие одни и те же функции, и, казалось бы, одинаково смонтированные, могут оказаться существенно неравнопрочными из-за незаметных, на первый взгляд особенностей конструкции. Поэтому чрезвычайно трудно, если не невозможно, обеспечить одновременное разрушение деталей сложного узла даже в том редком случае, когда в течение всего срока его службы он подвергается действию неизменных нагрузок известной величины. В действительности же, в большинстве машин нагрузки на детали и условия их работы изменяются в широких пределах в зависимости от условий и режимов эксплуатации.

Третья причина заключается в неодинаковом влиянии изменений условий эксплуатации на различные элементы машины.

Изменение условий эксплуатации машины по-разному влияет не только на ресурсы различных ее деталей и агрегатов, но и на интенсивность разрушения различных поверхностей одной детали.

Четвертая причина неравнопрочности обусловлена технико-экономическими ограничениями. Во-первых, для обеспечения приемлемой массы и стоимости конструкции в большинстве случаев необходимо применять сменные изнашиваемые детали. Во-вторых, некоторые элементы конструкции иногда не удается довести до желаемого уровня надежности из-за неумения или неприемлемых затрат.

Из перечисленных четырех причин неравнопрочности основной и практически непреодолимой является первая, три остальные причины служат весьма серьезными дополнительными препятствиями. В результате совместного влияния всех трудностей на пути уравнивания ресурсов элементов изделия в настоящее время вряд ли существуют сложные машины или агрегаты, равнопрочные в традиционном смысле этого понятия. Неравнопрочность элементов сложной конструкции теперь не только рассматривается как неизбежное ее свойство, но и нашло отражение в практике дифференциации гарантий на различные элементы машин или агрегатов.

Изложив причины, по которым, к сожалению, невозможно добиться одинаковой долговечности элементов сложного изделия рассмотрим теперь те реальные задачи, которые, несмотря на все трудности, должны быть в той или иной мере решены при разработке конструкций машин и технологии их производства. Первая и главная из этих задач, сформулированная в определении термина «равнопрочность», заключается в устранении или сведении к минимуму проявлений неравнопрочности на протяжении заданной наработки или установленного периода эксплуатации. Пока эта задача не решена, целесообразность производства изделия может оказаться спорной.

Простейший путь обеспечения равнопрочности изделия — применение значительных запасов (прочности, износостойкости и др.). На этом пути стоят технико-экономические ограничения: как правило, масса изделия и его стоимость не должны превышать определенных пределов. Ограничения влияют в двух направлениях. С одной стороны, они препятствуют достижению желаемых ресурсов деталей и узлов, если необходимые затраты превышают границы дозволенного.

С другой стороны, они сдерживают ненужное завышение ресурсов сверх того уровня, который оправдан требованиями к машине.

При невозможности обеспечить требуемый ресурс некоторых деталей возникает необходимость в разборке агрегата для их замены в процессе эксплуатации. В ряде случаев разборка агрегата влечет за собой «попутные» замены деталей, которые израсходовали часть своего ресурса и создают опасность дальнейших отказов. Ресурсы одновременно заменяемых элементов желательно сблизить, чтобы уменьшить потери остаточного ресурса тех из них, которые изымаются из эксплуатации, не достигнув предельного состояния.

Таким образом, задачи по обеспечению равнопрочности различных машин и уменьшению последствий неравнопрочности могут варьироваться как качественно, так и количественно, но главные задачи сводятся к следующему:

а) устранение сложных отказов, вызывающих необходимость в трудоемких разборках изделий на протяжении заданной части их наработки;

б) сведение к минимуму числа таких разборок на протяжении срока службы изделия до капитального ремонта.

10.2 Оценка равнопрочности

Каждое свойство изделия, существенное по своему значению, требует количественной оценки, допускающей, например, нормирование показателей свойства, сравнение различных изделий одинакового назначения, одинаковых изделий разного времени выпуска или различным образом изготовленных, используемых в разных условиях и т. д. Несмотря на значение неравнопрочности конструкций, методическим вопросам ее оценки до последнего времени не было уделено должного внимания. Может быть предложен «коэффициент равнопрочности машины», практически определяемый отношением суммарной стоимости машины к стоимости конструктивных элементов, изнашиваемых за срок службы до списания. Для каждого конструктивного элемента машины в той же книге рассмотрены «частные коэффициенты равнопрочности».

Предложенные коэффициенты предназначены для оценки машины за весь срок ее службы, что ограничивает область их применения,

причем более или менее точное вычисление величин коэффициентов возможно лишь после ряда лет эксплуатации машин данной модели. Сопоставив между собой величины «частных коэффициентов равнопрочности» различных элементов машины, действительно можно получить представление о равнопрочности за период наработки за весь срок службы до списания. Что касается «общих коэффициентов равнопрочности» и «коэффициента долговечности», то их использование не решает задачи оценки равнопрочности изделий, по крайней мере, по двум причинам. Во-первых, эти коэффициенты не дают представления о доле отдельных элементов в сумме затрат, во-вторых, стоимость деталей не может служить единственной характеристикой значения и последствий отказа для потребителей. Если в двигателях данной модели необходимо многократно заменять поршневые кольца, то стоимость замененных деталей пренебрежимо мала в сравнении со стоимостью двигателя, поэтому значения коэффициентов равнопрочности достаточно высоки, но, тем не менее, равнопрочность двигателей явно неудовлетворительна. Судить о равнопрочности невозможно без сравнительной оценки свойств различных элементов конструкции.

Способы оценки неравнопрочности разнообразны и могут варьироваться в зависимости от имеющейся информации и особенностей оцениваемых изделий. Целесообразно разделить возможные показатели этого свойства на «основные», наиболее существенные по своему значению или наиболее информативные, и «дополнительные», применение которых полезно для более полного и разностороннего анализа уровня неравнопрочности. Число основных показателей (при необходимости включаемых в технические задания на проектирование изделий или в технические условия на их поставку) должно быть небольшим, в то время как число дополнительных показателей не требуется ограничивать.

Проявления неравнопрочности зависят от множества переменных факторов, следовательно, количественные оценки должны быть статистическими, основанными на наблюдениях за достаточно большими группами изделий. Точность оценок в ответственных случаях должна быть оговорена, как и условия эксплуатации изделий, при которых получена исходная информация.

Поскольку понятия «неравнопрочность» и «равнопрочность» не взаимоисключающие (см. пояснения к терминам в начале раздела 10.1),

они характеризуются одними и теми же показателями: различия носят не качественный, а количественный характер. Любой из приведенных ниже показателей характеризует свойственную каждому сложному изделию неравнопрочность, но в случае, когда при рассматриваемой наработке она еще не проявилась или когда проявления неравнопрочности не вышли за границы допустимого, изделие считают равнопрочным (или, точнее, соответствующим норме).

Неравнопрочность (или равнопрочность) может быть характеризована следующими группами показателей:

а) *косвенные* — путем количественной оценки последствий нарушений равнопрочности;

б) *непосредственные* — путем сопоставления ресурсов элементов машины с оценкой отклонений ресурсов от заданного или условно принятого уровня.

Обе группы характеристик необходимы. Поскольку равнопрочность — не самоцель и нужна лишь для обеспечения заданных эксплуатационных свойств машины, потребителям должны быть известны показатели группы А (приводятся ниже). Чтобы эти показатели были приемлемыми, в процессе создания и доводки машины или агрегата машиностроителям надлежит оперировать показателями группы Б. Так как сбор информации о последствиях нарушений равнопрочности гораздо проще, а необходимый объем информации неизмеримо меньше, чем в случае сбора информации о ресурсах элементов машин, показатели группы А более доступны для практики и будут использованы шире, чем показатели группы Б.

При определении показателей группы А проявлением неравнопрочности следует считать отказ, вызывающий необходимость в трудоемкой разборке агрегата (узла), которая:

1) часто ухудшает состояние агрегата и влечет за собой повторную приработку деталей;

2) приводит к увеличению расхода запасных деталей в связи с «попутными» заменами;

3) при недостатке собственных ремонтных средств служит поводом для отправки агрегата в преждевременный капитальный ремонт.

Если принимать разборку за основное проявление неравнопрочности, то существенно упрощается сбор эксплуатационной информации и исключаются из оценок неравнопрочности мелкие нарушения работоспособности изделия, хотя и заслуживающие

внимания, но легко устранимые и незначительные по своим последствиям.

Для характеристики нарушений равнопрочности предлагаются следующие основные *показатели группы А* [45]:

1. *Для машин в целом:*

- 1) среднее (на одну машину) число разборок агрегатов (узлов) за данный интервал наработки с указанием доли каждого агрегата (узла) в общем числе разборок;
- 2) средние (на одну машину) затраты на поддержание в работоспособном состоянии каждого агрегата (узла) за данный интервал наработки с указанием доли каждого агрегата (узла или системы) в общей сумме затрат.

2. *Для агрегатов (узлов или систем):*

- 1) среднее число W разборок основных агрегатов (узлов) за данный интервал наработки, отнесенное к 100 агрегатам и определяемое по формуле

$$W = B \cdot 100 / N,$$

где B — суммарное число разборок одноименных агрегатов (узлов или систем) наблюдаемой выборки за данный интервал наработки;

N — число одноименных агрегатов (узлов или систем) в выборке;

- 2) наработка T_z , при которой количество z , %, одноименных агрегатов (узлов) наблюдаемой выборки достигает одно-временного износа без разборки.

При оценке показателей неравнопрочности регистрируют как первые, так и повторные разборки, однако учитывать их следует отдельно, поскольку повторные разборки нередко вызываются низким качеством выполнения предыдущих ремонтов. При обсуждении показателей было выдвинуто предложение вообще не учитывать такие разборки, однако это предложение спорно: не понадобился бы первый ремонт, не было бы и второго. Что касается разборок, вызванных нарушением правил эксплуатации, то их при оценке свойств конструкции учитывать не следует.

При разработке технических заданий на создание новых моделей машин или агрегатов целесообразно использовать показатели группы А

для установления нормативных величин равнопрочности; в этом случае работы по конструированию и доводке изделия будут направлены на достижение конкретной цели. Величины показателей следует выбрать с учетом норм долговечности изделия, поскольку подавляющее большинство (85% и более) отказов изделий и практически все их разборки обусловлены недостаточным ресурсом каких-либо деталей.

Рассмотрим следующие варианты оценки равнопрочности (см. рис. 10.1):

1) за период наработки T_1 , ограниченный началом разрушений наименее долговечного элемента изделия;

2) за период наработки T_2 , соответствующий «назначенному ресурсу» (по достижении которого, согласно ГОСТ 13377—75, эксплуатация изделия должна быть прекращена независимо от его состояния);

3) за период наработки T_3 , соответствующий нормированному гамма-процентному ресурсу R_γ изделия;

4) за период наработки T_4 , соответствующий этическому среднему ресурсу $R_{\text{эср}}$ изделия;

5) то же, но с учетом остаточного ресурса деталей, определяемого при капитальном ремонте;

6) за период наработки до списания изделия.

Оценка равнопрочности по варианту 1 сводится к определению периода наработки, в течение которой неравнопрочность всех или почти всех изделий данного вида вообще не проявляется, т. е. вероятность выхода из строя какого-либо элемента конструкции чрезвычайно мала. Величина T_1 , связанная с величиной сдвига распределений ресурсов деталей, представляет большой практический интерес для агрегатов любых машин, в особенности таких, для которых особое значение имеет высокий коэффициент готовности на протяжении определенного периода.

Оценка по варианту 2 необходима в немногих случаях, когда продолжительность эксплуатации изделия ограничена из соображений безопасности эксплуатации или для обеспечения весьма высокой вероятности выполнения задания.

Оценка по варианту 3, т. е. в пределах нормированного гамма-процентного ресурса, весьма целесообразна, а по варианту 4 — необходима по крайней мере для машин и агрегатов — объектов массового или крупносерийного производства.

Оценка по варианту 5 отличается значительно большей полнотой, чем по вариантам 1-4, но имеет недостаток, обусловленный приближенностью и субъективностью оценок остаточного ресурса деталей.

Анализ по варианту 6 позволяет дать итоговую технико-экономическую оценку равнопрочности изделия от начала эксплуатации до списания, весьма целесообразен и рекомендуется во всех случаях, когда имеются необходимые данные.

Таким образом, на разных стадиях эксплуатации или испытании изделий можно применять различные варианты анализа равнопрочности, зависящие от требований к изделиям и накопленной к данному времени информации.

Переходя от показателей группы «а», позволяющих судить о неравнопрочности изделий по ее последствиям в эксплуатации, к показателям группы «б», непосредственно оценивающим неравнопрочность, отметим, что их применение основано на сравнении ресурсов деталей и агрегатов. В качестве основных показателей долговечности деталей, узлов и агрегатов приняты гамма-процентный ресурс (при величине $\gamma = 80\%$ и более), средний ресурс до первого капитального ремонта (или между капитальными ремонтами) и до списания.

Обширные сведения о неравнопрочности изделий дают экспериментальные кривые распределения ресурсов деталей, позволяющие оценить вероятность отказа любых деталей и, соответственно, вероятность разборки узла, агрегата, машины при любой выбранной наработке изделия. Величина этой наработки в общем случае определяется, во-первых, нормативной величиной гамма-процентного ресурса соответствующего узла или агрегата, во-вторых, продолжительностью периода, в течение которого проявления неравнопрочности не должны превышать нормативного уровня. В ряде случаев эти две величины совпадают, но иногда могут и не совпадать, если к равнопрочности агрегатов какой-либо машины предъявляются более жесткие требования на протяжении лишь части наработки до капитального ремонта.

Для решения сформулированных выше задач в области повышения равнопрочности изделий целесообразно использовать следующие основные **показатели группы Б**:

1. *Для машин в целом*: соотношения фактических средних ресурсов агрегатов (узлов) машины до их первого капитального

ремонта (или между капитальными ремонтами). Показатели могут быть определены в виде таблицы, гистограммы или в виде отношений средних ресурсов агрегатов к среднему ресурсу наиболее долговечного из них. В последнем случае для каждого агрегата соотношение средних ресурсов определяется по формуле

$$a_i = R_{a_{cp}} / R_{a_{max}} ,$$

где $R_{a_{cp}}$ и $R_{a_{max}}$ — средняя наработка до капитального ремонта (или между капитальными ремонтами) i -го агрегата и наиболее долговечного агрегата соответственно.

2. Для агрегатов: отношения фактических гамма-процентных ресурсов основных деталей к нормативному гамма-процентному ресурсу агрегата (при равных величинах γ) имеют вид:

$$Q_{\gamma_m} = R_{\gamma_{д_m}} / R_{\gamma_a} ,$$

где $R_{\gamma_{д_m}}$ и R_{γ_a} — гамма-процентный ресурс m -й детали и агрегата соответственно.

3. Соотношения фактических средних ресурсов основных деталей агрегата. Основной считается любая деталь, которая может стать причиной вынужденной разборки или капитального ремонта агрегата. Показатели могут быть представлены в виде таблицы средних ресурсов, в виде соответствующей гистограммы или в виде отношений средних ресурсов основных деталей к среднему ресурсу наиболее долговечной из них. В последнем случае для каждой детали отношение средних ресурсов равно

$$b_m = R_{д.ср_m} / R_{д.ср_{max}} ,$$

где $R_{д.ср_m}$ и $R_{д.ср_{max}}$ — средние ресурсы m -й детали и наиболее долговечной детали соответственно.

4. Отношения фактических средних ресурсов основных деталей агрегата к его суммарной наработке $T_{a_{сн}}$ до списания, определяемые соотношением

$$Q = R_{д.ср_m} / T_{a_{сн}} .$$

Суммарную наработку агрегата до списания при отсутствии других указаний следует принимать равной произведению среднегодовой наработки машины на нормативный срок ее службы до списания. При определении величины показателя в необходимых случаях должно быть учтено возможное уменьшение ресурсов деталей, устанавливаемых при замене, в сравнении с ресурсом деталей первого комплекта.

Приведенные выше показатели являются основными, но не исчерпывают возможных вариантов оценок неравнопрочности, которые могут быть применены при ее анализе с использованием дополнительных показателей. К их числу, во-первых, относятся хорошо известные показатели рассеивания долговечности изделий: среднее квадратическое отклонение, коэффициент вариации ресурсов, диапазон рассеивания ресурсов. Во-вторых, может быть назван ряд специфических показателей. К ним относится, например, число одноименных агрегатов, не разбивавшихся от начала эксплуатации, в процентах к числу таких агрегатов в выборке. В ряде случаев могут оказаться удобными такие показатели: средняя наработка машины на одну разборку и средняя наработка агрегата на одну разборку в сочетании с эквивалентными им показателями I и III группы А.

Полезные показатели — вероятность работы агрегата без разборки в течение заданной наработки; отношение числа разноименных основных агрегатов (в процентах), потребовавших ремонта с разборкой, к общему их числу в машинах наблюдаемой выборки и др. При углубленных исследованиях неравнопрочность может быть изучена всесторонне с применением комплекса как основных, так и дополнительных показателей.

Предложенная система показателей неравнопрочности уделяет преимущественное внимание сложным отказам, приводящим к разборкам агрегатов. Это, конечно, не означает, что сравнительно мелкие отказы вообще несущественны: причины таких отказов также необходимо изучать и устранять, но при разработке и планировании конструкторско-технологических мероприятий для повышения равнопрочности машины в первую очередь следует ставить задачи, решение которых даст значительный технико-экономический эффект.

11 СТАРЕНИЕ И РЕМОНТ МАШИН

11.1 Старение элементов машин

Старение машин, приводящее к снижению их надежности, обусловлено следующими процессами:

- 1) накоплением повреждений в материалах деталей;
- 2) изменением размеров и искажением геометрической формы, изменением состояния и свойств рабочих поверхностей деталей в результате различных видов износа, коррозии и деформаций.

Некоторые детали подвержены действию одного из этих процессов, во многих деталях они развиваются параллельно. На конечной стадии своего развития эти процессы приводят детали к предельному состоянию, вызывая постепенно учащающиеся отказы узлов и агрегатов.

Накопление повреждений в материале детали (процесс 1) обычно не отражается на работе сопряженных (или смежных) с ней деталей. Например, накопленное в сечении детали усталостное повреждение не проявляется до момента появления трещины, но даже на этой стадии оно может не оказать влияния на сопряженные элементы конструкции, пока развившаяся трещина не вызовет изменения жесткости детали. Старение изоляции электропроводов или обмотки электродвигателей не проявляется до ее пробоя. Под действием нагретых масел из пластмассовых маслопроводов постепенно вымываются пластификаторы, но процесс вымывания влияет только на свойства самих трубопроводов. Старение шланга высокого давления под действием циклических нагрузок, рабочих жидкостей, атмосферных воздействий, времени не отражается на работе машины до разрыва шланга.

Из этого правила имеются сравнительно немногие исключения, например, если в результате старения изменяется жесткость упругих элементов конструкции (пружин, прокладок, резиновых блоков) или ухудшаются свойства полимерной втулки.

Процессы 2, в отличие от большинства процессов 1, обычно влияют на взаимодействие деталей и изменяют условия их работы задолго до того, как происходит явное нарушение работоспособности узла или агрегата. Изменения условий оказывают огромное влияние на ресурсы элементов конструкции и относятся к числу важнейших факторов управления надежностью машин.

Качественную картину ряда типичных изменений можно представить следующим образом.

В первые часы работы в зонах контакта сопряженных деталей возникают концентрированные нагрузки, которые снижаются и выравниваются к концу процесса приработки. В дальнейшем, по мере износа увеличиваются зазоры в опорах валов, в шлицевых и шпоночных соединениях; возникают перекосы, биения, смещаются области контакта деталей, появляются или увеличиваются ударные нагрузки, а также нагрузки, вызванные неуравновешенными массами; иногда возникают дополнительные усилия, обусловленные искажением формы несущих поверхностей или увеличением погрешности зубчатых зацеплений. В подшипниках качения неблагоприятным образом перераспределяется давление на шарики или ролики. Контакт зубьев зубчатых колес по мере износа подшипников перемещается к кромкам зубьев, и напряжения возрастают; при искажении профиля зубьев из-за их износа увеличиваются контактные напряжения, и ускоряется выкрашивание поверхностей. Эффективность уплотнений по мере их износа понижается, к деталям проникает все большее количество инородных частиц, размеры этих частиц увеличиваются.

Расчетные условия работы деталей, положенные в основу конструирования узла, после некоторой наработки машины обычно нарушаются. Под влиянием нарушений, возрастающих во времени, снижаются ресурсы деталей. Однако эти детали часть срока своей службы работают в относительно благоприятных условиях, близких к начальным. Условия работы изменяются постепенно и во многих случаях в сочетании с продолжающейся приработкой. Детали, установленные вместо изношенных, с самого начала работают в условиях, отличающихся от расчетных. Причем, неблагоприятными оказываются также условия приработки, особенно при непарной замене сопряженных деталей. В таких случаях процесс приработки происходит при форсированном изнашивании деталей, но все же часто не обеспечиваются нормальные условия их контакта.

Количественные характеристики старения (деградации) конструкций по виду и информативности делятся на несколько групп.

К первой группе относятся характеристики изменения технических параметров деталей и сопряжений в зависимости от их наработки в данных условиях.

Параметры, определяющие безотказность и ресурс изделия, могут быть весьма разнообразными, например: износ деталей, зазоры в сопряжениях, биения, дисбалансы и т. п. Наиболее распространенный случай — изменение износа и зазора — показан на рисунках 11.1 и 11.2.

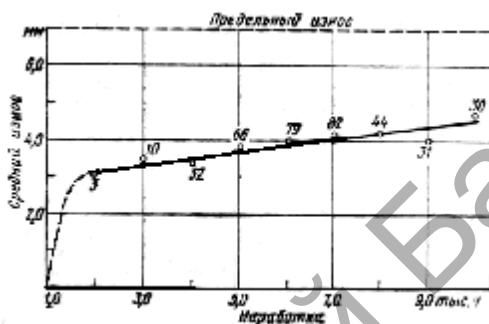


Рисунок 11.1 — Торцовый износ зубьев скользящего зубчатого колеса коробки передач в зависимости от его наработки (цифрами на кривой обозначено число измеренных деталей в интервале)

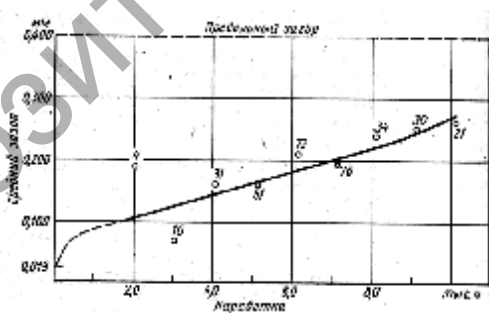


Рисунок 11.2 — Увеличение радиального зазора в шариковом подшипнике коробки передач в зависимости от его наработки (цифрами на кривой обозначено число измеренных подшипников в интервале)

Такие сведения дают основу для статистической оценки долговечности детали или сопряжения, прогноза их состояния при любой наработке и, соответственно, вероятности их безотказной работы.

Ко второй группе следует отнести характеристики зависимости между состоянием рассматриваемой детали, сопряжения или узла и условиями работы, ресурсами и уровнем безотказности сопряженных либо смежных элементов конструкции.

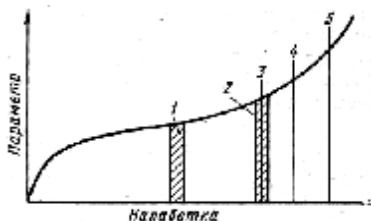
К третьей группе относятся любые статистические характеристики изменения показателей надежности изделия в зависимости от его наработки или длительности эксплуатации: плотность распределения ресурсов изделий, кривые убыли и вероятности безотказной работы, изменения наработок на отказ по мере увеличения наработки.

В четвертую группу входят экономические характеристики старения, показывающие изменения во времени затрат на обслуживание и ремонты изделия.

Характеристики последних двух групп применительно к узлам, агрегатам и машинам отражают суммарный результат старения совокупности компонентов изделия, необходимый для оценки и технико-экономических последствий старения и эффективности требуемых мероприятий. Однако эти характеристики обычно не содержат информации о том, что именно следует предпринять для замедления старения.

Исчерпывающей с точки зрения изучения старения детали является статистическая информация о пяти зонах развития процесса разрушения (рис. 11.3). Такая информация дает ясную картину поведения самой детали и ее влияния на сопряженные элементы конструкции.

Интенсивность процессов старения изделия изменяется под действием ремонтов: заменяются отдельные детали, изменяются условия контакта, происходит повторная приработка. Влияние ремонтов, ниже не рассматриваемое, отодвигает старение и осложняет его изучение.



1 — становится ощутимым отрицательное влияние детали на сопряженные элементы механизма; 2 — влияние достигает недопустимого уровня; 3 — целесообразна выбраковка детали в случае разборки агрегата для ремонта; 4 — вероятность отказа детали превышает допустимую; 5 — предельное состояние детали

Рисунок 11.3 — Необходимая информации о старении детали (или сопряжения)

Изучению старения благоприятствует развивающееся в последние годы применение безразборной диагностики технического состояния изделия на различных этапах его эксплуатации. При систематической регистрации параметров состояния изделия во время операций диагностики может быть накоплен обширный статистический материал для использования как при конструировании, так и эксплуатации машин.

Изложенное позволяет сделать ряд выводов, которые следовало бы учитывать в практике управления надежностью машин.

Первый вывод. Физика процессов старения, свойственных данной машине, должна быть учтена при ее создании. Протекание процессов старения проектируемой конструкции и их последствия во многих случаях можно предвидеть или определить по аналогии с данными по таким же узлам других моделей. Это позволит в ряде случаев принять меры, замедляющие темп старения, отдаляющие или устраняющие некоторые его последствия.

Второй вывод. Общепринятая конструкторская оценка вероятности отказа агрегата путем перемножения вероятностей отказов его деталей, основанная на предположении о независимости этих отказов, в общем случае неправильна. Она дает условный и более чем приблизительный результат. Лишь тогда, когда взаимное влияние деталей отсутствует или оно незначительно, такая оценка близка к действительности.

К сожалению, взаимное влияние элементов конструкции редко может быть охарактеризовано количественно, величина погрешности при использовании допущения о независимости отказов остается неизвестной, рекомендовать более точный метод в настоящее время не представляется возможным; общепринятый метод, очевидно, будут использовать и в дальнейшем. Не должно быть, однако, иллюзий относительно точности получаемых результатов.

Допущение о независимости отказов деталей в агрегате (агрегатов в машине) надо применять в сочетании с анализом взаимосвязей процессов разрушения деталей в данной конструкции. При необходимости следует сделать оговорки об условности и приблизительности оценок вероятности безотказной работы. При этом надо учесть, что взаимное влияние деталей, узлов и агрегатов возрастает по мере ухудшения их состояния, поэтому допущение о независимости отказов в наибольшей мере приемлемо для начального

периода эксплуатации машин. Оно будет все менее приемлемым по мере приближения агрегата или машины к предельному состоянию и является весьма спорным, например, для агрегатов, прошедших капитальный ремонт по обезличенной системе с повторным использованием ряда частично изношенных, а также отремонтированных деталей.

Третий вывод. Необходимо учитывать взаимное влияние элементов конструкции при организации ресурсных испытаний и выборе их продолжительности, которая должна быть достаточной для выявления всех фаз разрушения, в том числе обусловленных старением конструкции.

Четвертый вывод. Следует пересмотреть существующий подход к оценке предельных состояний деталей, узлов и агрегатов. Очевидно, что при оценке предельного состояния изношенных или деформированных изделий необходимо учитывать не только состояние самого изделия, но и влияние степени его повреждения на другие элементы конструкции. При таком подходе в ряде случаев окажется целесообразной выбраковка частично изношенных изделий, способных еще долго выполнять свои функции, однако при ускоренном разрушении сопряженных элементов.

Пятый вывод. В качестве важнейших критериев оценки совершенства технологии капитального ремонта узла или агрегата следует принять степень восстановления нормальных условий контакта деталей и степень устранения в отремонтированном узле или агрегате дефектов, обуславливающих появление при работе дополнительных разрушающих факторов, которых не было в новом изделии (в частности, неуравновешенных масс, биения и других колебательных явлений). Скорректированная таким образом технология ремонта должна предусматривать ряд операций для контроля требований, обеспечивающих замедление процессов старения.

Шестой вывод. Нормы расхода запасных частей должны учитывать сокращение ресурсов деталей при заменах. При этом должна быть учтена целесообразность относительно ранней замены некоторых деталей во избежание ускоренного разрушения сопряженных элементов конструкции.

В заключение отметим, что замедление процессов старения и локализация их влияния — эффективный путь повышения надежности элементов машин. Необходимо изучать особенности

старения различных материалов и конструкций, выявлять физическую картину перехода от состояния высокой надежности к низкому ее уровню, динамику протекания процессов старения и определять количественные характеристики его последствий на различных стадиях развития.

11.2 Предельные состояния машин и их элементов

Технический ресурс объекта — его наработка до наступления предельного состояния, по достижении которого эксплуатация объекта должна быть прекращена. Признаки (критерии) предельного состояния (ПС) должны быть указаны в технической документации. К сожалению, это правило редко соблюдается: для многих изделий машиностроения критерии предельного состояния пока не установлены. В таких случаях важнейший показатель долговечности изделия — ресурс — становится неопределенным понятием, возникает нечеткость целей при создании конструкций, неясность в оценках достигнутого уровня долговечности, допускаются ошибки в выборе продолжительности ресурсных испытаний, видов ремонта конструкций и сроков их замены. Очевидна необходимость обоснованного выбора критериев ПС и их введения в практику конструирования, испытаний, эксплуатации, ремонта и управления надежностью машин. Частные задачи в этой области следует решать с учетом специфических особенностей конкретных изделий. Общие особенности проблемы кратко рассмотрены ниже.

Принципиальная основа выбора критериев ПС — трактовка ресурса и вероятности безотказной работы как запаса работоспособности изделия. Пока запас значителен, нет оснований считать состояние изделия предельным. Именно на этой основе отличают критерии отказов изделия от критериев его ПС. Причины и последствия большинства отказов могут быть устранены текущим ремонтом, между тем как причины и последствия ПС могут быть устранены лишь средним или капитальным ремонтом (в случае «промежуточного» ПС) либо приводят к списанию изделия («финальное» ПС), когда ремонт невозможен или нецелесообразен. Исключения составляют так называемые «ресурсные отказы», при которых потеря работоспособности изделия сочетается с израсходованием

всего ресурса или большей его части; лишь в таких случаях отказ вызывает капитальный ремонт или списание изделия.

Многообразие возможных признаков ПС обуславливает целесообразность их классификации (табл. 11.1) [45].

Критерии ПС деталей и сопряжений в таблице 11.1 (группа 1, а, б) — важнейшие по их влиянию на расход запасных частей, техническое состояние узлов, агрегатов, систем и машин в целом, на эффективность ремонтов и, следовательно, на экономику эксплуатации машин; выбор критериев должен быть тщательно обоснован. Большинство

Т а б л и ц а 11.1 — Классификация критериев предельного состояния (ПС)

Группа	Классификационный признак	Критерии ПС
1	Вид изделия	а — детали; б — сопряжения; в — узла, агрегата, систем; г — машины в целом
2	Характер развития повреждений	а — проявляющиеся в результате постепенно развивающегося повреждения; б — проявляющиеся в результате внезапного разрушения
3	Характер критериев ПС	а — косвенно характеризующие состояние изделия; б — непосредственно характеризующие степень повреждения изделия
4	Степень завершенности оценки	а — предварительные; б — окончательные
5	Вид критериев ПС	а — технические; б — экономические
6	Область использования критериев ПС	а — в эксплуатации; б — при испытаниях; в — при ремонте
7	Вид разрушения, приводящего к ПС	а — при изнашивании; б — при усталости; в — при коррозии и т. д.
8	Степень условности критериев ПС	а — безусловные; б — условные
9	Степень общности критериев ПС	а — общие; б — локальные

процессов разрушения, происходящих в узлах машин, вызывает постепенное накопление повреждений, которое должно быть ограничено критериями ПС группы 2, а. Реже происходят внезапные разрушения, характеризуемые критериями ПС группы 2, б.

Наряду с очевидными критериями (поломками, сколами, задирками, развившимися трещинами) встречается множество случаев, когда критерии ПС далеко не очевидны и для их обоснованного выбора необходимы специальные исследования.

Для выбора критерия ПС следует выявить влияние степени повреждения детали на эффективность эксплуатации соответствующего узла, агрегата или машины, на сопряженные с деталью и смежные с ней элементы конструкции, на возможность и рентабельность последующего ремонта детали или сопряженной пары. Такие исследования сложны и трудоемки, но весьма эффективны.

Во многих случаях, в частности при использовании методов безразборной диагностики состояния изделия, используют косвенные критерии ПС (см. табл. 11.1, группа 3, а), например, уровень вибраций или шума при работе узла, уровень рабочей температуры узла и др. В ряде таких случаев косвенный критерий ПС можно считать предварительным (группа 4, а), тогда окончательное суждение о состоянии изделия выносят после его разборки. Вместе с тем многие косвенные критерии ПС являются окончательными (группа 4, б). Так, стендовые ресурсные испытания подшипника прекращают, когда его температура повышается сверх обычной или возникает характерный шум, что свидетельствует о возникновении повреждения.

Узлы и агрегаты большинства машин (группа 1, в) в процессе эксплуатации подвергают ремонтам, при которых часть деталей заменяют. Чем больше таких замен, тем позже наступает ПС, т. е. возможно его отдаление путем увеличения объема и (или) частоты ремонтов. Для определения критериев ПС в этом случае должны быть решены следующие вопросы:

1. При каком состоянии изделия его ресурс считается исчерпанным независимо от ранее произведенных ремонтов?
2. Следует ли учитывать при оценке ресурса изделия ранее выполненные текущие ремонты?

Второй вопрос имеет особое значение для изделий, у которых базовые (корпусные) детали не изнашиваются, не ломаются и не деформируются, так как такие изделия можно неограниченное

время поддерживать в работоспособном состоянии путем периодических замен других деталей. При решении этого вопроса предполагается, что потребители ведут точный учет объема выполненных ремонтов, в противном случае этот вопрос отпадает при определении критериев ПС изделий в эксплуатации, но его можно рассматривать применительно к их ресурсным испытаниям.

Критерии ПС систем (например, смазки, охлаждения, подачи топлива, торможения, зажигания и др.) в большинстве случаев целесообразно рассматривать не в комплексе, а поэлементно, поскольку они обычно состоят из отдельно расположенных узлов, связанных электрическими, гидравлическими, пневматическими и другими коммуникациями.

Предельное состояние машины в целом (см. табл. 11.1, группа 1, г), как и ПС сложных агрегатов, можно намного отдалить путем ремонтов и замен узлов. Возникают, следовательно, те же два вопроса с теми же ограничениями в части учета ремонтов, причем второй вопрос особенно актуален для машин, у которых ПС может быть отодвинуто путем замены агрегатов за пределы нормативного или рационального срока службы машины до списания.

Критерии ПС агрегатов и машин могут быть весьма разнообразными (группы 2—5). Кроме того, по причинам, которые отмечены ниже, возможно варьирование критериев в зависимости от области их использования (группа 6). Далее следует различать общие критерии (группа 9, а), т. е. действующие в любой ситуации, и локальные (группа 9, б), т. е. варьируемые в зависимости от местных условий.

Приведем *примеры возможных критериев ПС сложного агрегата*:

1) повреждение корпусной детали, устранимое лишь с помощью точной механической обработки на станках или заварки с подогревом в печи либо с применением других сложных операций, требующих специального оборудования (группа 5, а);

2) необходимость в замене нескольких основных деталей, номенклатура которых установлена заранее (группа 5, а);

3) необходимость в замене ряда деталей, общая стоимость которых независимо от их номенклатуры превышает заранее установленную долю стоимости агрегата (группа 5, б);

4) учащение отказов агрегата, свидетельствующее о недопустимом ухудшении его технического состояния (группа 5, а);

5) совокупность специфических для данного изделия признаков, косвенно (группа 3, а) или непосредственно (группа 3, б) характеризующих состояние изделия;

6) трудоемкость или стоимость необходимого ремонта агрегата превышает заранее установленный предел (группы 5, а и б);

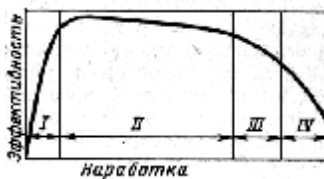
7) критерии 2 или 3 с учетом замен деталей, произведенных при текущих ремонтах;

8) накопленная стоимость ремонтов агрегата превышает установленную величину (группа 5, б).

Отметим, что критерии ПС можно разделить на две существенно различные *группы*: безусловные (группа 8, а) и условные (группа 8, б). К *первой* относятся критерии, которые диктуются особенностями изделия и по своей сути являются бесспорными; например, износ плунжерной пары гидронасоса, при превышении которого становится невозможной его нормальная работа. Критерии *второй* (весьма многочисленной) группы 8, б, вернее границы этих критериев, в той или иной мере условны, подобно границам многих характеристик, вносимых в Технические условия (ТУ) на изготовление изделия. Даже о приведенных выше критериях в примерах 1 и 5, казалось бы безусловных, возможны различные мнения; количественные характеристики остальных критериев могут варьироваться не только в зависимости от назначения и особенностей изделия, но также от условий и стоимости его эксплуатации, от организации и качества ремонтов, от наличия запасных частей, от цен на новые изделия того же назначения и возможности их покупки, от степени старения (морального износа) изделия и от других факторов. Условность вызвана, во-первых, локальным и конъюнктурным характером этих критериев, во-вторых, во многих случаях, расплывчатостью границ критериев вследствие колебаний, а нередко и субъективности в оценках факторов, влияющих на выбор критериев ПС.

Изделие обычно позже сдают в первый капитальный ремонт, если заведомо известно, что качество ремонта будет низким. Дорогой и длительный ремонт обычно проводят в более поздние сроки, чем недорогой и непродолжительный ремонт. При эксплуатации изделия без учета возможности его последующего восстановления допускают большую степень повреждения, чем в случае, когда деталь или агрегат подлежит ремонту. Возможность одновременного вывода агрегата в капитальный ремонт показана на рисунке 11.4. Протяженность

периодов III и IV может исчисляться сотнями часов работы, в пределах которых меняется ПС. Если изделие устарело и его эксплуатация менее эффективна, чем эксплуатация изделия новых моделей, критерии ПС пересматривают и при большом объеме необходимого ремонта изделие списывают. Если же приобрести новое изделие невозможно или затруднительно, требования к критериям ПС по необходимости снижают, капитальные ремонты и списание отодвигают.



I — приработка; II — максимальная эффективность; III — ремонт желателен; IV — ремонт необходим

Рисунок 11.4 — Схема изменения эффективности агрегата по мере износа в различные периоды наработки

Привлекает внимание возросшая за последнее десятилетие популярность экономических критериев ПС (группа 5, б) и постепенно расширяющееся их применение. Объяснение заключается в новых возможностях, возникших благодаря использованию электронно-вычислительной техники в практике эксплуатации ремонта машин. Оно дало возможность фиксировать и хранить в памяти ЭВМ огромную информацию, позволяющую иметь «персональное дело» на каждую эксплуатируемую машину, регистрировать все операции ее поддержания в работоспособном состоянии на протяжении всего срока службы и соответствующие затраты. Наличие такой информации является необходимой предпосылкой для оптимизации управления надежностью машин в эксплуатации: совокупность сведений по каждой из них становится основой наивыгоднейших решений.

Экономический подход к критериям ПС дает действительно эффективный результат, когда каждую машину рассматривают как отдельный объект со всеми его индивидуальными свойствами и отличительными особенностями его эксплуатации, когда сводка всех «болезней» машины от начала эксплуатации до рассматриваемого момента находится в руках инженера, принимающего решения.

При проектировании серийно-выпускаемых машин особо следует рассмотреть критерии состояния изделий при ресурсных испытаниях (см. табл. 11.1, группа б, б), поскольку они могут быть прекращены по усмотрению исследователя на любой стадии повреждения изделий. Наиболее точные оценки ресурса бесспорно дают испытания до ПС, причем такого же, как в эксплуатации.

В этом случае для прогноза эксплуатационного ресурса по результатам испытаний достаточно знать коэффициент их ускорения. Вместе с тем не исключено, хотя и нежелательно, прекращение испытаний на более ранних этапах развития повреждения при условии, что имеющийся опыт позволяет с приемлемой точностью оценить ресурс путем экстраполяции от фактической наработки изделия к моменту прекращения испытаний до предполагаемой его наработки, соответствующей возникновению ПС. В таком случае задача сводится к определению остаточной наработки изделия. Очевидно, что погрешность при этом будет тем больше, чем меньше достигнутая степень повреждения изделия по сравнению с повреждением при ПС. Чем раньше прекращены испытания, тем обычно ниже достоверность оценок.

Возможность сокращения продолжительности испытаний путем их прекращения при ранних стадиях повреждения изделия следует использовать осторожно и лишь при наличии достаточной априорной информации. Одна из распространенных ошибок заключается в выборе одинакового «раннего» критерия при сравнительных испытаниях разных моделей, различающихся по конструкции, материалу или технологии изготовления. Сопоставляя долговечность таких изделий по наработке до появления первых признаков повреждения, испытатель предполагает, что повреждения до ПС изделий будут развиваться с одинаковой скоростью, а это может привести к грубым просчетам. Ошибочным может оказаться также допущение об одинаковости критериев ПС для различных конструкций и материалов.

Критерии ПС при ремонте (группа б, в) отличаются от критериев ПС изделий при их эксплуатации (группа б, а). В эксплуатации любая деталь внутри агрегата может работать до предельного состояния и даже дольше, если при этом ее повреждению не произошел отказ агрегата. При ремонте агрегата такая же деталь подлежит замене даже в том случае, если ее ресурс использован, например, на 70—80%, поскольку повторное применение этой детали снижает вероятность безотказной работы отремонтированного агрегата.

Из сказанного очевидно, что определение рациональных критериев ПС машин и их элементов относится к числу важнейших задач управления надежностью машин. Для разработки таких критериев требуется проведение систематических исследований в сочетании с накоплением опыта эксплуатации и ремонта.

11.3 Ремонтпригодность и ремонт машин

Сложные машины, состоящие из сотен и тысяч деталей, на протяжении срока своей службы требуют обслуживания и неоднократных ремонтов. Выдвигаемые иногда предложения о создании неремонтируемых агрегатов и машин или о списании изношенных машин без ремонта, не выдерживают критики. Ремонт был, есть и будет. Необходимость в нем приводит к созданию тысяч ремонтных заводов и мастерских, крупных и мелких, а также ремонтных подразделений на эксплуатирующих предприятиях. Рядом с машиностроительной промышленностью неизбежно вырастает индустрия ремонта.

Технико-экономическое значение проблемы обслуживания и ремонта с течением времени увеличивается, растут и трудности в ее решении, что объясняется несколькими причинами.

Первая из них заключается в неуклонном увеличении парка разнообразных машин, насыщающих различные отрасли народного хозяйства, причем конструкции и оснащение многих машин с годами усложняются. Производительность труда на участках их применения повышается, но вместе с тем растет потребность в материальной базе обслуживания и ремонта, в запасных частях, в персонале высокой квалификации, повышаются сложность ремонтов и требования к ним. Во всех развитых странах возникает и быстро увеличивается диспропорция между необходимым в этой области объемом работ и числом квалифицированных рабочих.

Тем не менее списание изношенных машин замедляется, возникает тенденция к продлению сроков их службы, возрастает потребность в обслуживании, ремонтах и запасных частях.

Вторая причина заключается в недостатках существующей практики обслуживания и ремонтов, по-разному организованных в различных отраслях и для разных машин, но в большинстве случаев отличающихся низким уровнем.

Третья причина является следствием первых двух и заключается в том, что стоимость обслуживания и ремонтов для многих машин и агрегатов составляет чрезмерную долю затрат за срок службы до списания.

Очевидно, что практика обслуживания и ремонтов массовых машин далека от совершенства. Это влияет на уровень надежности многих машин парка, в особенности тех, которые подвергались

капитальным ремонтам. Очевидно также, что успехи в рассматриваемой области дадут в народном хозяйстве огромный технико-экономический эффект, причем возрастающий с увеличением парка. Этот эффект должен быть достигнут совокупностью мероприятий в трех направлениях:

- 1) повышение надежности выпускаемых машин;
- 2) повышение культуры технического обслуживания;
- 3) улучшение организации и повышение качества ремонтов.

Работы по первому направлению, осуществляемые в машиностроении при проектировании и доводке новых моделей, создают предпосылки будущих успехов. Выполнение этих работ может свести к минимуму трудности в обслуживании и ремонте машин данной модели. Задача заключается в обеспечении высоких показателей всего комплекса свойств, определяющих надежность изделия.

Основой обеспечения безотказности и долговечности агрегата являются ресурсы его деталей. Программа-максимум для конструктора — исключить необходимость в замене или ремонте детали на протяжении заданной наработки агрегата до списания. Нормативный ресурс детали должен быть обеспечен в процессе проектирования, испытаний и совершенствования конструкции. Если же замена детали на протяжении срока службы агрегата оказалась неизбежной, то ремонт необходимо упростить и удешевить.

При создании узла или агрегата необходим комплексный подход: чем выше безотказность и долговечность элементов изделия, тем ниже могут быть требования к его ремонтпригодности, и наоборот. Анализ безотказности, долговечности и ремонтпригодности с учетом взаимозависимости этих свойств должен стать правилом к практике создания машин. К сожалению, ремонтпригодности обычно уделяют гораздо меньше внимания, чем она заслуживает. Лишь отдельные заводы и конструкторские организации располагают достаточно полными экспериментальными оценками ремонтпригодности своих машин, лишь единичные работники заводов хорошо знают специфику ремонтов, лишь немногие конструкторы проектируют узлы, в должной мере учитывая требования ремонта и диагностики. Между тем машина А, созданная для получения максимального эффекта на единицу суммарных затрат, может во многом отличаться от машины Б, ориентированной на снижение себестоимости производства. Поскольку причины возможных различий не очевидны,

отметим некоторые особенности машин А, создаваемых по критерию максимума эффекта.

Корпусные детали и рамы машин не должны деформироваться, изнашиваться и терять прочность в течение всей или большей части нормативной наработки агрегата до списания. Отливки корпусных деталей медленно охлаждают или подвергают старению для устранения внутренних напряжений, приводящих к деформациям. Гнезда подшипников делают жесткими, чтобы исключить или свести к минимуму деформации под нагрузкой. Опорные поверхности гнезд защищают массивными стаканами или втулками, обеспечивая умеренные нагрузки на единицу поверхности; при больших нагрузках изнашиваемые поверхности корпусов подвергают упрочнению. Соблюдение этих требований совсем или надолго исключает необходимость в ремонте корпусов с применением сложной механической обработки. Часто это позволяет отказаться от капитальных ремонтов агрегата и ограничиться текущими ремонтами, сводящимися к замене некоторых деталей внутри корпуса.

В машинах Б перечисленные требования соблюдают не в полной мере, поверхность части гнезд в корпусе сминается даже под стаканами, происходят деформации корпуса под действием внутренних напряжений и нагрузок, его размеры искажаются, нарушается заданное взаимное расположение смонтированных в нем деталей, ускоряется их разрушение. При ремонте требуется восстановление начальных размеров корпуса с применением сложной механической обработки, ремонт превращается в капитальный. Если же для упрощения ремонта размеры корпуса не восстанавливают, собранные в нем детали оказываются в неправильном взаимном положении, и их предельное состояние наступает при гораздо меньшей наработке, чем деталей первого комплекта, отказы и ремонты учащаются, стоимость эксплуатации растет.

Для повышения ресурса деталей машин большое значение имеет повышение износостойкости поверхностных слоев. Оно достигается двумя путями. По первому из них используют разнообразные методы упрочнения и подбирают оптимальные сопряженные пары. По второму — применяют легкосменные втулки, вкладыши, сухари и т. п., обычно имеющие малые размеры и массу, что позволяет принять для них лучшие материалы и методы обработки. Эти два направления открывают широкие возможности повышения надежности,

сокращения объема и трудоемкости ремонтов. В машинах А эти возможности используют широко, в машинах Б — ограниченно.

В машинах Б преобладают привычные материалы и процессы обработки, хорошо освоенные, сравнительно простые и дешевые. Часто отвергают такие «нетехнологичные» процессы как, например, наплавка или хромирование, хотя известно, что те же процессы будут вынужденно применены при ремонте, причем это обойдется гораздо дороже, чем в массовом производстве. Нередко отказываются от втулок, поскольку они усложняют конструкцию и повышают ее стоимость; в результате втулки ставят во время ремонта при больших затратах. Кроме того, далеко не всегда конструкция предусматривает достаточный запас металла для установки втулки без нарушения прочности или жесткости детали. В итоге надежность машин Б снижается, увеличиваются объемы ремонтов и стоимость эксплуатации.

В составе массовых машин имеется ряд деталей, подверженных повреждениям от усталости. Детали машин А конструируют и изготавливают таким образом, чтобы и в неблагоприятных обстоятельствах они не теряли работоспособности ранее нормативной наработки, что может вызвать некоторое увеличение их стоимости. В машине Б это часто приводит к отказу от оптимальных вариантов, к снижению ресурсов деталей, увеличению объема ремонтов и расхода запасных частей.

При конструировании машин А большое внимание уделяют обеспечению легкосъемности узлов и агрегатов для ремонта или замены. В частности, применяют для этой цели модульные конструкции агрегатов, при необходимости быстро отделяемые от машины. В ряде конструкций, отсоединив несколько креплений, целиком снимают основные агрегаты. В результате резко уменьшается трудоемкость ремонтов, повышается их оперативность, сокращаются простои. Благодаря легкосъемности существенно облегчается применение агрегатного ремонта машин, а также выполнение текущего ремонта в нерабочие смены.

В машинах А принимают все меры для сокращения объема технического обслуживания. С этой целью число необходимых операций обслуживания сводят к минимуму путем применения узлов, не нуждающихся в добавлении смазки или регулировке. Интервалы между заменами или смазками удлиняют, увеличивая емкости масляных резервуаров, улучшая герметизацию узлов и сорта масел. Обеспечивают хорошую доступность узлов и агрегатов, требующих контроля

и обслуживания, предусматривают возможность подключения аппаратуры диагностического контроля. Операции обслуживания предельно упрощают. Совокупность этих мероприятий позволяет снизить трудоемкость обслуживания и его стоимость, а также предупредить возникновение ряда отказов. В машинах Б обычно реализуют лишь часть таких мероприятий, стоимость обслуживания соответственно выше. Но разница не только в стоимости. Чем больше заданный объем обслуживания машины, тем хуже в среднем его выполняют потребители, что влечет за собой снижение надежности машин Б и увеличение объема их ремонтов.

Итак, очевидно, что машины А могут быть сложнее по конструкции и технологии производства, чем машины Б, однако различия в себестоимости быстро окупятся. Преимущества конструкций А будут давать экономию в затратах, материалах и рабочей силе на протяжении многих лет эксплуатации массовой машины длительного пользования. Ежегодная экономия будет расти по мере увеличения парка и возраста машин.

При конструировании машин как А, так и Б необходимо обеспечить ремонтпригодность деталей, подлежащих восстановлению. К ним относятся материалоемкие и дорогие детали, а также любые детали, восстановление которых достаточно рентабельно. Номенклатура восстанавливаемых деталей зависит от конъюнктуры: при недостаточном объеме производства запасных частей или дефиците металлов номенклатура расширяется, в другой ситуации она может быть сокращена. Использование восстановленных деталей в качестве запасных частей или для сборки из них резервных агрегатов обменного фонда иллюстрирует возможность выбора нормативных ресурсов ряда деталей независимо от ресурса агрегата или наработки машины до списания.

При определении перечня восстанавливаемых деталей каждой позиции необходимо дать технико-экономическое обоснование, причем следует учесть необходимость расширения ремонтной базы, стоимость сбора и транспортировки деталей к месту ремонта, отвлечение рабочих из других отраслей. Технология восстановления детали должна быть отработана на стадии ее конструирования и согласована со специалистами по ремонту.

С улучшением культуры технического обслуживания машин повышается их надежность и снижается потребность в ремонтах.

Это может быть достигнуто, во-первых, упрощением обслуживания; во-вторых, повышением культуры и квалификации обслуживающего персонала; в-третьих, применением оборудования, уменьшающего трудоемкость обслуживания. Первое направление рассмотрено выше. По второму направлению необходима систематическая, из года в год подготовка новых работников и повышение квалификации старых кадров наряду с созданием системы поощрений, стимулирующих тщательное выполнение операций обслуживания.

В области ремонта машин проведено множество разнообразных исследований, однако они почти не коснулись некоторых главных проблем, к которым относятся экспериментальное обоснование рациональных норм дефектовки деталей при ремонтах, а также выбор вариантов сочетания повторно используемых и замененных деталей, обеспечивающих оптимальный коэффициент восстановления ресурса каждого агрегата. Именно оптимальный коэффициент, т. е. учитывающий особенности данной модели агрегата и ряд технико-экономических факторов, которых игнорируют при произвольно принятом в настоящее время коэффициенте восстановления 0,8, почему-то одинаковом для всех агрегатов, никак не обоснованном и экспериментально не подтвержденном.

Данный уровень надежности машины может быть обеспечен только стабильным, строго контролируемым процессом производства. На заводах машиностроения для этой цели действует развитая система технического контроля в сочетании с системой регулярных испытаний машин. В то же время отремонтированные изделия подвергаются лишь поверхностной проверке, хотя ремонтное производство действует в рамках гораздо более широких, чем производство новых машин. Из-за полной бесконтрольности изделий по надежности снижается качество ремонтов и теряется информация, требуемая для их совершенствования. Бесконтрольность ремонта особенно вредна в условиях, когда ремонтные и эксплуатирующие предприятия подчинены разным ведомствам.

Технологию капитальных ремонтов необходимо усовершенствовать и привести в соответствие с заданным послеремонтным ресурсом узлов и агрегатов. Этот ресурс должен быть выбран с учетом особенностей каждой модели изделия, статистических и нормативных данных о наработке до ремонта и до списания, а также технико-экономических соображений. Рациональные

коэффициенты восстановления ресурсов различных изделий, вероятно, будут лежать в пределах 0,5—1,0.

В первую очередь следует усовершенствовать технологию ремонта корпусных деталей; главное — обеспечить точность размером корпуса, от которых зависит правильное сопряжение смонтированных в нем деталей.

Основной принцип — восстановление нормальных условий контакта деталей и устранение дефектов, обуславливающих появление дополнительных разрушающих факторов, не свойственных новому изделию.

Эффективность капитальных ремонтов агрегатов и машин в целом целесообразно оценивать статистически по стоимости ремонта, отнесенной к единице средней наработки машин до следующего капитального ремонта (или до списания) с учетом затрат на их поддержание в работоспособном состоянии и межремонтный период.

Повышение надежности и, в частности, ремонтпригодности машин в сочетании с упорядочением технического обслуживания и ремонтов обеспечит резкое сокращение их объема, снижение затрат, улучшение технического состояния парка массовых машин и сокращение численности ремонтного персонала. Сотни тысяч работников, занятых в настоящее время ремонтом, станут источником рабочей силы для действующих и новых производств.

12 ДИАГНОСТИКА МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ С ЧПУ

12.1 Задачи и принцип действия системы диагностики

Работая в условиях безлюдного производства, гибкие производственные системы (ГПС) должны иметь высокие надежность и точность работы. Поэтому входящие в состав ГПС технологические машины и устройства должны включать системы надзора и диагностики, которые призваны обеспечивать длительную и надежную работы ГПС и требуемое качество обрабатываемых деталей.

Диагностика ГПС осуществляется в двух направлениях: 1) контроль за правильностью функционирования системы в целом во

время работы или холостых ходов и 2) контроль состояния узлов и механизмов. Выбор и состав системы диагностики определяется информацией о наиболее часто наблюдаемых аварийных ситуациях и их последствиях, времени простоев оборудования, стоимости запчастей и трудоемкости ремонтов, влиянии того или иного узла на качество продукции и безопасность работы персонала. Некоторые сведения о времени ремонтов и простоев гибкого производственного модуля (ГПМ) в зависимости от отказов различных его узлов и систем приведены в таблице 12.1.

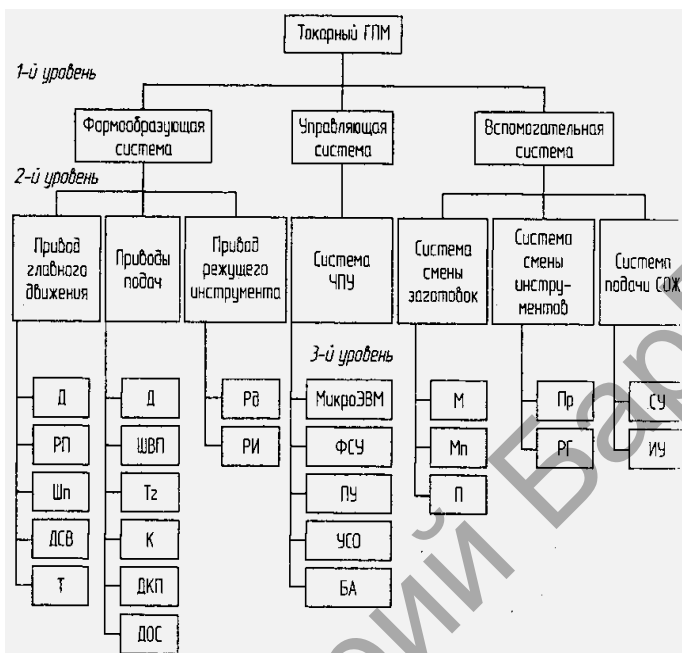
На основании таблицы можно сделать вывод о важности контролирования состояния шпиндельного узла, который требует значительного времени на ремонт и вызывает длительные простои оборудования. Следует добавить, что в общем времени простоя до 80% приходится на время выяснения причины неисправности и только 20% — на ее устранение [47; 48].

Диагностирование станков с ЧПУ основано на теории системного анализа сложных систем управления. Первый этап анализа — разработка иерархической структуры станка. Такая структура для токарного ГПМ показана на рисунке 12.1.

На первом уровне иерархии выделены формообразующая, управляющая и вспомогательная подсистемы, на втором — приводы, подсистемы программного управления, системы смены заготовки и инструмента, подачи СОЖ и т. п. Подсистемы третьего уровня — это функциональные блоки. Далее разрабатываются математическая модель диагностирования объекта и алгоритмы принятия решений.

Т а б л и ц а 12.1 — Соотношение, % относительного времени ремонтов и простоев ГПМ и частоты отказов его узлов и систем [46]

Узел, система ГПМ	Частота отказов	Время	
		простоев	ремонтов
Микровыключатели	31	30	10
Шпиндельный узел	8	15	46
Система управления	13	34	20
Двигатель главного движения	7	8	20
Режущий инструмент	41	13	4



Д — двигатель; РП — ременная передача; Шп — шпиндель; ДСВ — датчик скорости вращения; Т — тормоз; ШВП — шарико-винтовая пара; Тz — тахогенератор; К — каретка суппорта; ДКП — датчик крайнего положения; ДОС — датчик обратной связи; Рв — резцедержатель; РИ — режущий инструмент; ФСУ — фотосчитывающее устройство; ПУ — пульт управления; УСО — устройство связи с объектом; БА — блок автоматики; М — магазин; Мп — манипулятор; П — патрон; Пр — привод револьверной головки; РГ — револьверная головка; СУ — схема управления; ИУ — исполнительные устройства

Рисунок 12.1 — Иерархическая структура токарного ГПМ

Системы надзора и диагностики правильности работы станка связаны с системами ЧПУ. Они обеспечивают проверку наличия обратных связей между системами станка (например, отсутствие непрерывной информации о положении узла станка вызывает быстрое неконтролируемое перемещение стола), а также взаимного расположения узлов станка во времени и в пространстве (соответствует ли расположение узлов и последовательность их работы заданному циклу).

При выполнении заданного цикла система контроля ожидает его окончания (сигнала от соответствующего микровыключателя о нахождении в требуемой позиции (сигнала от соответствующего микровыключателя о нахождении в требуемой позиции). Отсутствие сигнала вызывает реакцию системы. Если система ЧПУ не может скорректировать выявленное несоответствие, на мониторе появляется код ошибки либо текстовая информация о неисправности.

Для наиболее быстрого определения причин отказа широко используется так называемое граф-дерево ошибок (рис. 12.2). Для его построения необходимо составить перечень: основных элементов и узлов станка; действий, которые должны быть правильно выполнены; повреждений, в результате которых станок не может правильно выполнить то или иное действие; условий работы, вызывающих повреждение.

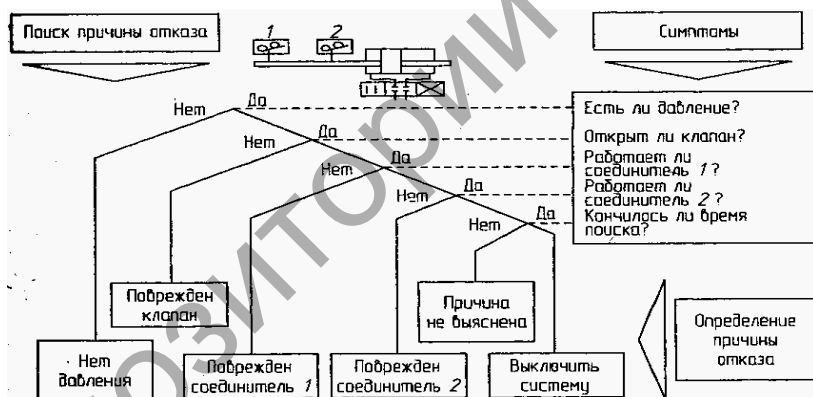


Рисунок 12.2 — Принцип построения графа-дерева ошибок [49]

Повреждения и их причины рассматриваются как происшествия. Они могут быть записаны в виде соответствующего графа, ветви которого описывают существующие причинно-следственные связи. На основе графа можно определить, какие причины вызвали наблюдаемую ошибку [49].

Для диагностики состояния элементов и узлов станка могут быть использованы так называемые экспертные системы.

12.2 Диагностика основных узлов и элементов станка

Диагностика привода главного движения. Для этого часто используется информация о потерях мощности холостого хода. Эти потери зависят от частоты вращения двигателя, пройденного расстояния, состояния подшипников, условий смазывания, температуры и т. д. Информация о потерях, измеренных в условиях стабильной работы станка, может храниться в памяти системы диагностики как эталонное значение. Увеличение потерь мощности в течение длительного времени позволяет сделать предположение об ухудшении состояния подшипников или коробки скоростей. Мгновенное и значительное возрастание потерь свидетельствует об аварийных ситуациях (поломках элементов привода, отсутствии охлаждения и т. п.).

Другой величиной, используемой для контроля привода, является частота вращения шпинделя. Ее контроль обеспечивает проверку правильности работы системы управления приводом механизмов переключения скоростей (муфт, блоков колес) и передач (зубчатых, ременных и т. п.) мощностей. Одновременное измерение частоты вращения и мгновенной мощности позволяет определить момент на шпинделе и предохранить привод от перегрузок. Предохранить привод от перегрузок можно также путем контроля сил и момента резания.

Диагностика привода подачи. Примером может служить диагностика сервоприводов подачи. Они состоят из электрических, механических и электронных подсистем. Структура системы для тестирования таких приводов приведена на рисунке 12.3. Тестирование основано на анализе ответа на посланный тестовый сигнал со

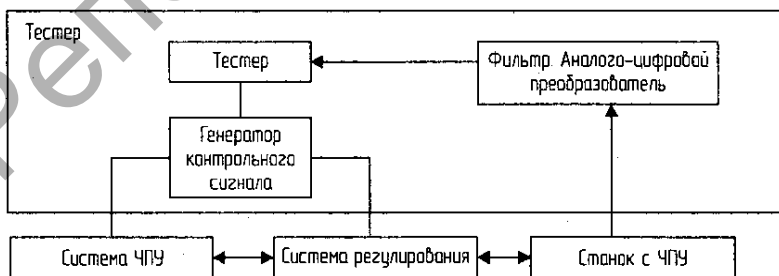


Рисунок 12.3 — Структура тестера для контроля сервоприводов подачи

стороны тех подсистем, которые могут регулировать параметры сервопривода (регулятор скорости, ограничитель динамических токов, механическую подсистему).

Диагностика состояния подшипников качения. Во многих случаях подшипники качения определяют условия работы станка. Выявление их дефектов в рамках сервисного обслуживания основано на анализе уровня температур, сопротивления движению, возникновения колебаний, уровня шума, загрязнения смазочных материалов, изменений интенсивности акустической эмиссии. Однако наиболее часто контролируются температура, колебания и шумы. В таблице 12.2 приведены параметры устройства различных фирм для виброакустической диагностики подшипников.

Температура подшипников должна быть не выше рекомендуемой. Увеличение ее на 10...20°C уже свидетельствует о нарушениях в работе (плохое смазывание или механическое повреждение). Сравнивая условия нагревания подшипников с типовыми, можно выявить неисправности соответствующего узла. Температура измеряется с помощью специальных устройств (пирометров, тепловизоров, закладных термодатчиков и т. д.).

Т а б л и ц а 12.2 — Параметры устройств для виброакустической диагностики подшипников качения

Модель	Частота вращения подшипника, об / мин	Диапазон частот, Гц	Нагрузка, Н	Измеряемый параметр колебаний	Габаритные размеры подшипников, мм
Bendi (США)	1 800	50—300 300—1 800 1 800—10 000	—	Скорость	$d > 3$ $8 < D < 15$ 0
NSK (Япония)	1 800	50—300 300—800 1 800—10 000	60—140	Скорость	$d > 4$ $D < 170$
МЕВ-17А, МVН-90В (Швеция)	1 800	50—300 300—800 1 800—10 000	0—250	Скорость	$D < 90$
SM-4, MGG-10, MGG-11 (Германия)	1 650	40—300 300—1 800 1 800—10 000	—	Скорость	$3 < d < 100$

В случае использования виброакустического метода измеряют и анализируют спектр механических или звуковых колебаний, генерированных системой при определенной частоте вращения. В случае работы сложных подшипниковых узлов (например, шпиндельных) за эталонный может быть принят спектр колебаний нового узла с амплитудами, увеличенными на 20%. При достижении этого уровня необходимо более тщательно проанализировать работу подшипников и либо заменить их, либо установить новый эталонный уровень колебаний.

12.3 Предотвращение аварийных ситуаций

Аварийные ситуации, приводящие к значительным потерям времени и финансовых средств, возникают по различным причинам. Согласно [48] ошибки в управляющей программе вызывают 13% аварий, ошибки в наладке и установке нулевых точек — 21, ошибки оператора — 20, ошибки в выборе режущих инструментов и введении информации о них — 17, отказы системы управления и электрической системы — 26, отклонения в размерах заготовок — 3%.

В случае разработки технологического процесса обработки детали с помощью компьютера, ошибки программирования и наладки станка можно исключить, а ошибки, связанные с режущими инструментами, — существенно ограничить, выводя на экран монитора «симуляцию» движений инструментов в ходе обработки. Для предотвращения аварий вследствие действий оператора (ручное перемещение узлов и т. п.) в кинематические цепи станка встраивают дополнительные предохранительные муфты либо используют системы диагностики режущих инструментов, основанные на контроле уровня сил резания.

13 ДИАГНОСТИКА РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ И ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ

13.1 Задачи системы диагностики

Ранее (см. табл. 12.1) отмечалось, что на долю, режущих инструментов приходится более 40% общего количества отказов ГПС. Это свидетельствует о необходимости контроля их состояния

(текущей работоспособности) с целью быстрого принятия решений. В общем случае могут быть приняты следующие решения:

- выключить станок (наиболее простой и радикальный способ);
- изменить соответствующие кадры управляющей программы станков с ЧПУ;
- выполнить коррекционные перемещения инструментов;
- изменить подачу или частоту вращения шпинделя станка с адаптивным управлением;
- заменить инструмент;
- заменить заготовку, не пригодную для обработки.

Наиболее приемлемым направлением в контроле режущих инструментов является *мониторинг* (непрерывный контроль). Все методы диагностики текущей работоспособности режущих инструментов можно условно разделить на четыре группы (табл. 13.1), а их, в свою очередь, — на методы *прямого контроля*, основанные

Т а б л и ц а 13.1 — Классификация способов контроля состояния режущих инструментов

Объект контроля	Контролируемый параметр
Режущий инструмент	1. Ширина площадки износа. 2. Вибрации. 3. Температура. 4. Остаточная радиоактивность. 5. Расстояние от вершины или режущей кромки до постоянной базы
Обрабатываемая деталь	1. Размеры. 2. Шероховатость обработанной поверхности. 3. Температура на поверхности
Стружка	1. Форма. 2. Направление схода. 3. Температура. 4. Радиоактивность
Процесс резания	1. Длительность цикла обработки. 2. Мощность резания. 3. Силы резания. 4. Вибрации. 5. Акустическая эмиссия. 6. ЭДС в зоне резания. 7. Электрическое сопротивление зоны контакта инструмент—деталь

на регистрации износа инструмента, и *косвенного контроля*, использующие физические явления, которые сопровождают процессы резания и изнашивания инструмента.

При прямом контроле параметры износа (характеристики лунок и ленточек износа) на контактных площадках инструмента измеряются непосредственно в процессе обработки. Прямые измерения износа инструмента вызывают некоторые затруднения, что связано в основном со сложностью конструкции датчиков износа. При выполнении прямых измерений используют вспомогательные или холостые ходы инструмента, выход инструмента или режущих кромок (зубьев) из процесса обработки.

Аппаратура для контроля износа режущих инструментов после окончания процесса резания может быть размещена таким образом, что на нее не будут оказывать вредное влияние различные факторы, присущие процессу металлообработки. Такие измерения обладают повышенной надежностью. Однако измерения осуществляются периодически, что не позволяет своевременно обнаружить отказы режущего инструмента. Необходимая периодичность контроля может быть определена на основании опыта использования соответствующего режущего инструмента на данных технологических операциях и на основании вероятностных расчетов с учетом предполагаемого периода стойкости режущего инструмента.

Косвенные методы используются все в больших масштабах. При этих методах контролируются различные характеристики процесса резания, которые имеют определенные корреляционные связи с величиной износа и интенсивностью изнашивания режущих кромок инструмента. Принципы и техника измерения при косвенных методах сравнительно просты. Они позволяют непрерывно получать в процессе обработки информацию об износе режущей кромки. Пригодны они также для регистрации резких или скачкообразных изменений износа или разрушения режущих кромок инструмента в течение коротких интервалов времени.

Основной недостаток косвенных методов состоит в том, что корреляционная связь между измеренным фактором и износом инструмента должна быть определена экспериментальным путем для каждого конкретного случая обработки с тем, чтобы на ее основе можно было контролировать с помощью соответствующего датчика износ инструмента в процессе обработки.

13.2 Прямые методы диагностики

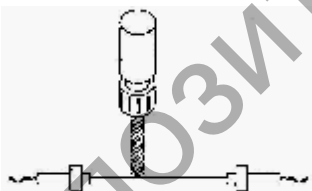
Устройства для прямого контроля обеспечивают более высокую достоверность измерений и получили достаточно широкое распространение. Рассмотрим принципиальные схемы некоторых из этих устройств.

Оптические устройства. Для оценки длины стержневых режущих инструментов (сверл, метчиков) могут использоваться сравнительно простые конструкции со встроенными фотоэлементами (рис. 13.1). Если инструмент находится между источником излучения и датчиком и перекрывает зону излучения, то это сигнализирует о его исправности. Контроль осуществляется либо после каждого рабочего хода, либо в перерывах между обработкой деталей.

Развитие оптических систем позволило создать устройства для измерения износа инструмента в тот момент, когда он не находится в контакте с заготовкой.

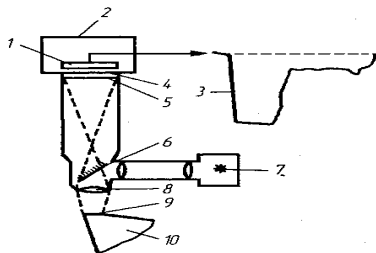
Действие этих устройств основано на том, что площадка износа лучше, чем остальные поверхности инструмента, отражает световые лучи.

Принципиальная схема опико-электронного устройства приведена на рисунке 13.2. В таких устройствах используются фотодиоды, вырабатывающие сигналы в зависимости от ширины ленточки



1 — источник света; 2 — датчик;
3 — инструмент

Рисунок 13.1 — Принципиальная схема контроля длины стержневых инструментов с помощью фотоэлементов



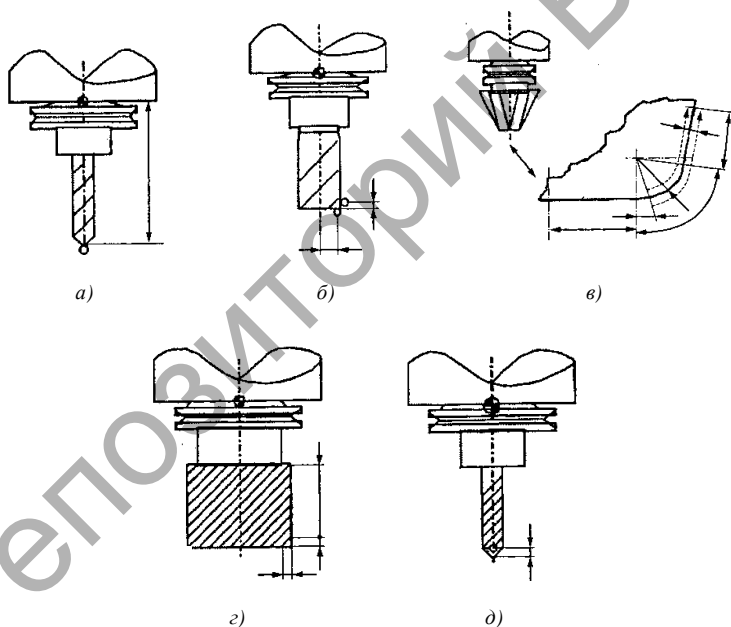
1 — катод; 2 — фотоусилитель;
3 — выходной сигнал; 4 — щель;
5 — увеличенное изображение площадки износа; 6 — полупрозрачное зеркало;
7 — источник света; 8 — объектив;
9 — площадка износа;
10 — режущий инструмент

Рисунок 13.2 — Опико-электронный преобразователь для контроля износа режущего инструмента

износа. Точность измерения $\pm 0,01$ мм, диапазон измерения 0,1...0,8 мм. Отраженный луч света передается через телекамеру на телеэкран или на приемное устройство ЭВМ.

Значительно более высокой точностью измерения (до 1 мкм) и большими технологическими возможностями обладают лазерные устройства. Они позволяют не только обнаружить поломки инструмента (либо его полное отсутствие на станке), но и измерить геометрию режущей кромки (рис. 13.3). Лазерные устройства могут использоваться также для одновременного контроля нескольких инструментов (например, в многшпиндельных сверлильных головках).

Разновидностью оптических устройств являются также телевизионные камеры с устройствами распознавания образов. С их помощью можно оценивать как износ, так и сколы режущих кромок.



a — измерение вылета стержневых инструментов; *б* — измерение вылета и радиуса расточных резцов и головок; *в* — измерение геометрии режущей кромки; *г* — измерение отклонений режущей кромки от прямолинейности; *д* — диагностирование поломок

Рисунок 13.3 — Технологические возможности лазерных устройств фирмы “Blum”

Контактные устройства. Такие устройства обеспечивают непосредственный контроль инструментов в процессе работы с помощью датчиков касания (рис. 13.4).

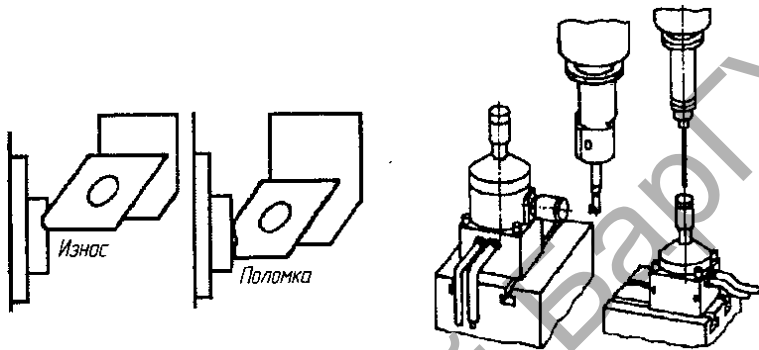


Рисунок 13.4 — Контактные датчики и зонды

Головка, показанная на рисунке 13.5, обеспечивает контроль инструмента в разных угловых положениях измерительного наконечника. Положения, в которых «ожидается» контакт, рассчитывает микропроцессор станка. Работа такого датчика аналогична работе устройств, используемых на автоматических линиях, где вращающийся наконечник замыкает электрическую цепь, что служит сигналом о целостности инструмента.

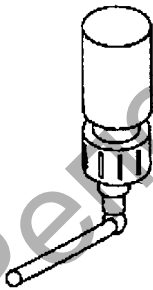


Рисунок 13.5 — Датчик касания с поворачивающимся наконечником

В схеме, приведенной на рисунке 13.6, при отведенном положении сверлильной головки ступица 1 с радиально расположенными гибкими пластинами 2 поворачивается, и, если инструмент цел, замыкаются контакты 3, 4.

При поломке сверла контакты замкнуты, реле 6 остается под током, и срабатывает выключатель 5 в цепи управления станком.

Схема контроля целостности сверла по касанию обрабатываемой детали приведена на рисунке 13.7. Если

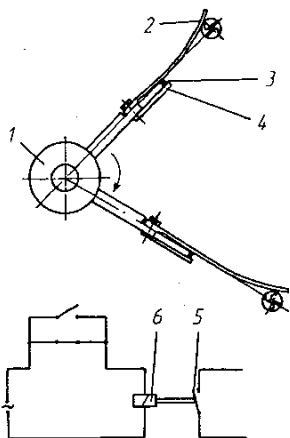


Рисунок 13.6 — Схема устройства контроля целостности сверла по контакту с наконечником

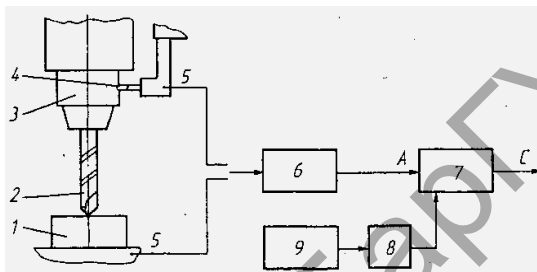
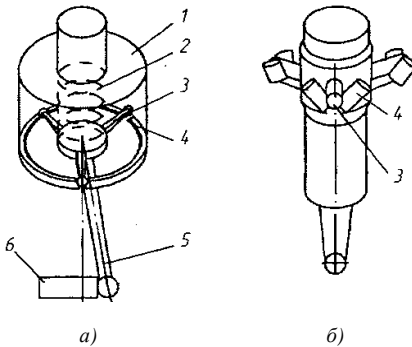


Рисунок 13.7 — Схема устройства для контроля целостности сверла по касанию детали

сверло 2 производит резание, то между его патроном 3 и обрабатываемым изделием 1 имеется замкнутая цепь, по которой проходит ток, вызванный термоэлектрическим эффектом. Этот ток снимается скользящей угольной щеткой 4. По проводам 5 ток от щетки и изделия подводится к усилителю 6, выходной сигнал А которого подается на вход логической схемы 7.

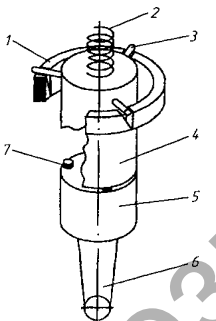
К другому входу логической схемы подается постоянное напряжение от источника через выключатель 8. Если сверло цело, то по проводам проходит ток и на оба входа логической схемы поступает напряжение. В этом случае она не вырабатывает выходного сигнала С. Если сверло поломалось, то на один из входов логической схемы не поступает сигнал А и на ее выходе появляется сигнал С, который используется для сигнализации и остановки станка.

В настоящее время при контроле износа инструментов используются также измерительные зонды. Они могут генерировать прерывистые (импульсные) и постоянные сигналы о контакте. На рисунке 13.8 приведена схема импульсного зонда с электроконтактным преобразователем [51].



a — принципиальная схема; *б* — пример конструкции электроконтактов; 1 — корпус; 2 — пружина; 3 — рычаги; 4 — призмы; 5 — наконечник; 6 — измеряемая деталь

Рисунок 13.8 — Схема импульсного зонда с электроконтактным преобразователем



1 — призма; 2 — пружина; 3 — рычаг; 4 — верхняя часть подвижной конструкции; 5 — нижняя часть подвижной конструкции; 6 — наконечник; 7 — пьезоэлектрический сенсор

Рисунок 13.9 — Схема импульсного зонда с контактным пьезоэлектрическим преобразователем

В корпусе находятся три равноотстоящие призмы, электрически изолированные от него. Измерительный наконечник соединен с тремя рычагами со сферическими концами. Под действием пружины рычаги входят в призмы и замыкают электрическую цепь.

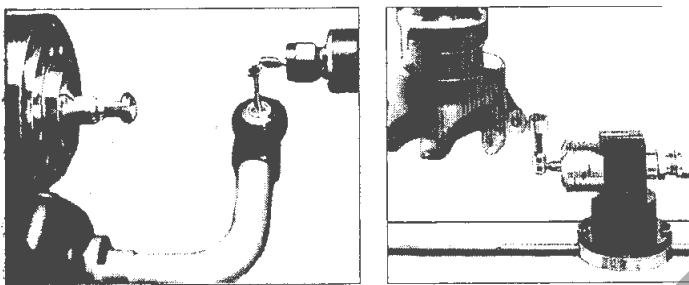
В момент контакта с измеряемым объектом наконечник изменяет положение, рычаг отклоняется и электрическая цепь разрывается (возникает импульс). По мере движения зонда генерируется система таких импульсов, что позволяет после обработки сигналов определить координаты точек.

Погрешность измерения координат при использовании электроконтактных преобразователей колеблется в пределах 0,35...1,0 мкм.

Более высокой точностью обладают зонды с контактным пьезоэлектрическим преобразователем (рис. 13.9). В таком зонде три равноотстоящих пьезоэлектрических сенсора располагаются между верхней и нижней частями подвижной конструкции, оканчивающейся измерительным наконечником. В момент контакта наконечника с измеряемой поверхностью происходит деформация пьезоэлементов и генерируется одиночный импульс. При дальнейшем движении наконечника генерируется подтверждающий сигнал, что обеспечивает погрешность измерений не более 0,5 мкм [51].

Примеры использования измерительных зондов для контроля инструментов на ГПМ показаны на рисунке 13.10.

Контактные устройства могут использоваться как для контроля положения вершины



a)

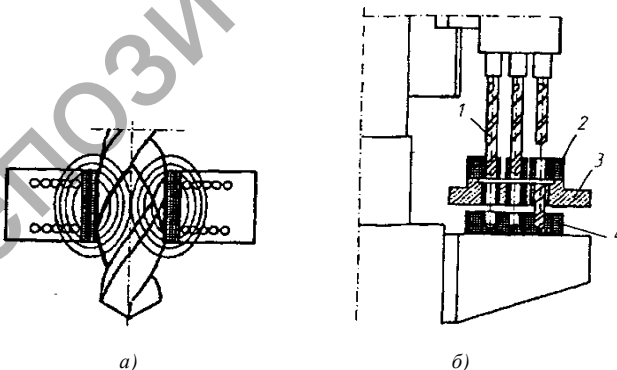
б)

a — на токарном станке; *б* — на фрезерно-расточном станке

Рисунок 13.10 — Использование измерительных зондов фирмы “Renishow” для контроля инструментов на ГПМ

инструмента в начале его работы, так и для измерения сколов, выкрашивания и износа режущих лезвий в ходе работы. В последнем случае эффективность действия датчиков не слишком высока, поскольку контролируется в основном область вершины инструмента, а она не всегда характеризует потенциальный отказ инструмента.

Индукционные устройства. Работа таких устройств основана на принципе взаимодействия сердечника и магнитной катушки (рис. 13.11, *a*); они достаточно дешевы и универсальны. В простейшем



a)

б)

a — принцип действия; *б* — положение на станке

Рисунок 13.11 — Схема контроля поломок сверл на автоматической линии

случае эти датчики используются для проверки наличия (есть либо нет) и подсчета инструментов. Например, на рисунке 13.11, б, приведена схема контроля поломок сверл на автоматической линии [46]. В кондукторной плите 3 установлены индукционные катушки 2, которые в начале рабочего хода проверяют наличие комплекта сверл (поломка в ходе обработки предыдущей детали), а при выходе сверла 1 контролируют, не осталось ли оно в детали 4 (поломка).

Пневматические устройства. В таких устройствах для контроля используются перепады давления в сети сжатого воздуха. Например, в стенках кондукторной втулки 5 (рис. 13.12) друг против друга располагают каналы 6 и 7, к которым под-

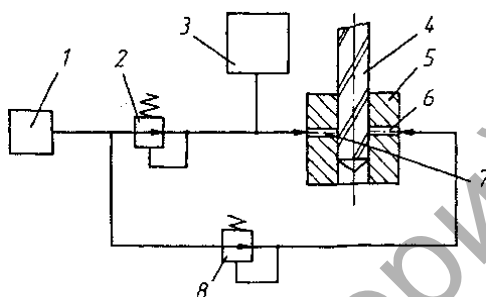


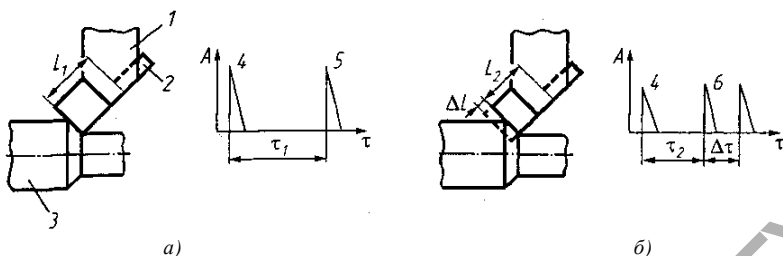
Рисунок 13.12 — Схема устройства для контроля целостности сверла с помощью сжатого воздуха

друга располагают каналы 6 и 7, к которым подводится сжатый воздух от источника 1.

В канале 7 давление устанавливается регулятором 2, а в канале 6 — регулятором 8; при этом в канале 6 давление выше, чем в канале 7. Если сверло 4 цело, то каналы 6 и 7 разобщены и давление в трубопроводе к каналу 7 недостаточно для сра-

батывания датчика 3. При сломанном сверле каналы 6 и 7 сообщаются, давление в них выравнивается, давление в канале 7 повышается и срабатывает датчик.

Устройства, основанные на контроле времени прохождения ультразвуковых волн через твердое тело. Для контроля используется время прохождения расстояния от измерительной головки через новый и изношенный инструменты до поверхности детали и обратно. При неизношенном инструменте (рис. 13.13, а) ультразвук проходит расстояние L_1 за время τ_1 . При образовании площадки износа (см. рис. 13.13, б) путь сокращается на $\Delta L = L_1 - L_2$, а время прохождения сигнала меньше на $\Delta t = \tau_1 - \tau_2$, что регистрируется электронной аппаратурой и позволяет определять величину износа.



1 — резец; 2 — генератор ультразвуковых импульсов; 3 — деталь;
 4 — передаваемый импульс; 5 — отраженный импульс (без износа);
 6 — отраженный импульс (с износом)

Рисунок 13.13 — Схема контроля инструмента по времени прохождения ультразвуковых волн

13.3 Косвенные методы диагностики

Косвенные методы диагностики режущих инструментов основаны на контроле изменения сил резания, мощности, температуры и других физических характеристик процесса резания в результате износа или поломки инструмента. Рассмотрим некоторые из таких устройств.

Устройства контроля времени работы инструмента. Принцип действия таких устройств достаточно прост. Перед началом очередного цикла обработки система управления сравнивает реальное время, обработанное инструментом, с постоянным значением, занесенным в память компьютера, и определяет, имеется ли запас стойкости для обработки еще одной детали. Если нет, то подается команда на замену инструмента новым, находящимся во вспомогательном магазине инструментов.

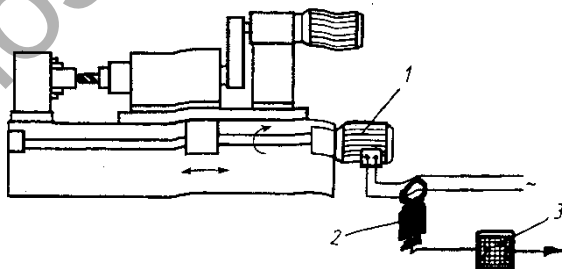
Длительность работы инструмента, определяемая количеством обработанных деталей, также является до некоторой степени характеристикой его износа. О числе обработанных деталей информирует счетчик циклов работы оборудования. По этой информации, устанавливающей период режущей или размерной стойкости, производят принудительную смену инструмента. Для уменьшения количества преждевременных выходов инструментов из строя период стойкости назначают с некоторым гарантийным запасом.

При каждом рабочем цикле автоматической линии или станка соленоид, встроенный в счетчик, получает электрический импульс и через храповой механизм и систему зубчатых колес поворачивает стрелки, отсчитывающие количество циклов. После обработки установленного количества деталей, соответствующего периоду стойкости, контакты счетчика, настроенные на определенное положение, замыкаются.

Соответствующий участок автоматической линии останавливается, зажигается сигнальная лампа, указывающая, какие инструменты нужно заменить. После смены инструмента наладчик устанавливает стрелки счетчика в начальное положение. Обычно счетчик настраивают так, чтобы предварительный сигнал подавался после обработки примерно 90% общего количества деталей, определяющего период стойкости инструмента.

Устройства, основанные на контроле уровня сил и мощности резания. Известно, что с возрастанием износа инструмента увеличивается уровень сил и мощности, потребной на резание. Поэтому как непосредственно силы резания, так производные от них (мощность, крутящий момент на шпинделе, сила тока двигателей главного движения или движения подачи) можно использовать в качестве источника диагностического сигнала.

Действие устройств контроля мощности резания основано на измерениях силы тока и напряжения в двигателе главного движения или движения подачи (рис. 13.14). Такие устройства весьма просты, дешевы, не требуют изменений в конструкции станка. Однако



1 — двигатель; 2 — датчик тока; 3 — регистратор сигнала

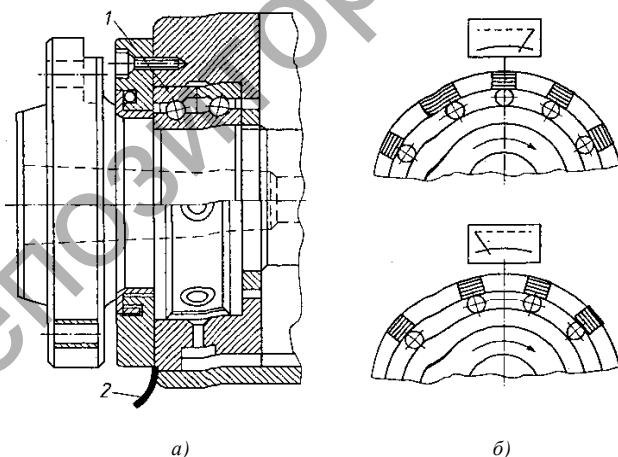
Рисунок 13.14 — Схема измерения мощности привода подачи [46]

надежность их работы зависит от соотношения мощности резания и номинальной мощности двигателя. Если оно невелико, достоверность диагностики резко снижается. Кроме того, эти устройства реагируют на изменения сил, связанные с возрастанием износа инструмента, со значительным опозданием во времени, что не позволяет вовремя среагировать на катастрофический износ и поломки инструмента. Это привело к практически полному отказу от использования таких устройств [46].

В настоящее время измерение сил осуществляют, используя тензометрические подшипники или оправки, датчики напряжений и деформаций, а также динамометры, встроенные в инструментальную оправку, резцедержатель либо револьверную головку.

Во всех случаях важную роль играет место размещения датчиков. Чем ближе оно к зоне резания, тем точнее измерения, выше надежность системы контроля.

Широкое распространение получили подшипники с тензометрическими датчиками, наклеенными в канавке на их наружном кольце (рис. 13.15). Прохождение шарика (ролика) под датчиком вызывает локальные деформации кольца.



a — конструкция; *б* — принцип действия;
 1 — тензометрический датчик; 2 — кабель

Рисунок 13.15 — Тензометрический подшипник
 фирмы “Promess”

Датчик подключен к тензометрическому мосту и генерирует сигналы переменной частоты, зависящей от частоты вращения вала и количества шариков в обойме подшипника. Амплитуда сигналов пропорциональна действию внешних и внутренних (возникших в результате предварительного нагружения) сил. Схемы установки таких датчиков в шпиндельных узлах приведены на рисунке 13.16.

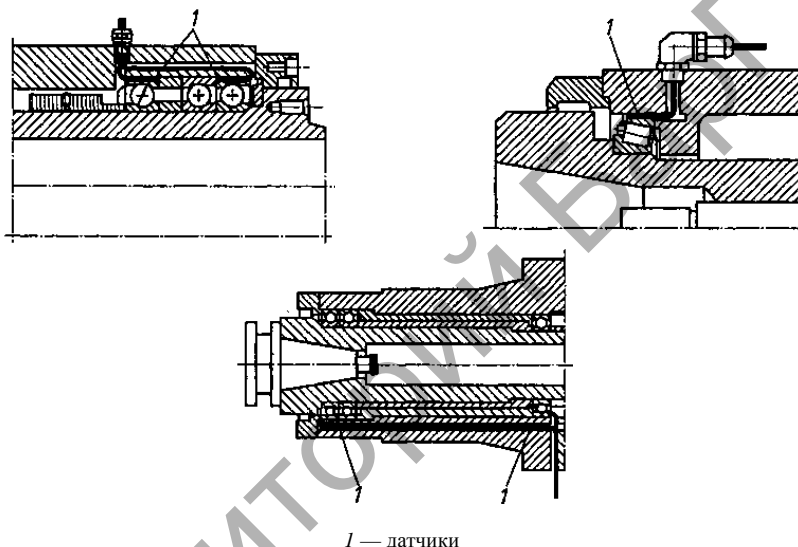
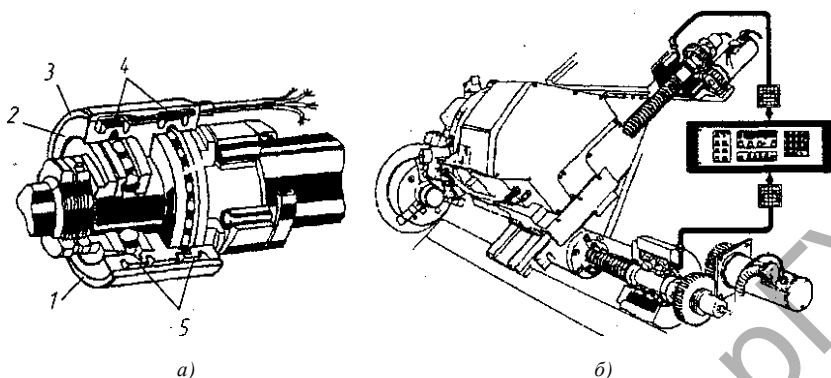


Рисунок 13.16 — Схемы установки тензометрических датчиков на подшипник в шпиндельных узлах

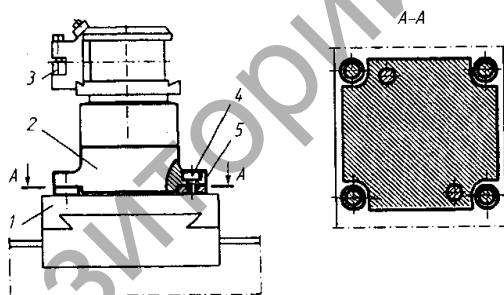
Для измерения осевой силы (силы подачи) можно использовать тензометрический датчик, представляющий собой обойму для опорных подшипников (рис. 13.17). Тензометрические элементы, наклеенные на внутреннее кольцо обоймы, защищены от действия СОЖ, масла и т. д. [52].

Пружинящие кольца с наклеенными на них тензометрическими датчиками можно использовать для измерения главной силы резания, монтируя их под основанием револьверной головки (рис. 13.18) [46].



a — принципиальная схема; *б* — расположение на ходовом винте токарного станка с ЧПУ;
 1 — зона соединения колец; 2 — внутреннее упругое кольцо; 3 — наружное упругое кольцо;
 4 — тензометрические датчики; 5 — области измерения силы

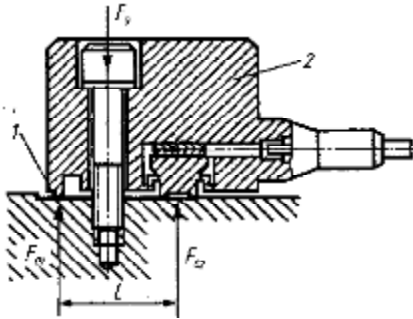
Рисунок 13.17 — Тензометрический датчик фирмы “Sandvik Coromant” для измерения осевой силы



1 — салазки; 2 — основание револьверной головки;
 3 — резец; 4 — винт; 5 — разрезное кольцо с наклеенными тензометрическими датчиками

Рисунок 13.18 — Схема измерения сил резания с помощью тензометрических датчиков, установленных под револьверной головкой

Весьма перспективно использование для контроля сил резания пьезоэлектрических датчиков. Принцип их действия основан на известном физическом явлении, когда на поверхности некоторых диэлектриков (например, кристаллов кварца) в результате механической деформации генерируется электрический заряд.

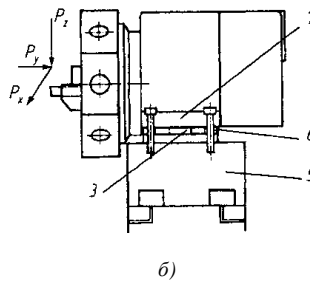


- 1 — базовая точка;
2 — пьезоэлектрический элемент

Рисунок 13.19 — Схема пьезоэлектрического датчика для измерения сил резания

Датчик крепится к деформируемой поверхности винтом с силой F_0 и измеряет силу F_{02} в месте контакта поверхности с пьезоэлектрическим элементом. Сила F_{01} приложена в базовой точке датчика. Расстояние между точками равно L .

Наряду с одиночными пьезоэлектрическими датчиками используются также плиты (рис. 13.20), в которые может быть встроено



- а) — продольный разрез; б) — схема установки; 1 — соединительный кабель; 2 — каналы для кабеля; 3 — пьезоэлектрические элементы; 4 — отверстия под крепежные винты; 5 — поперечный суппорт; 6 — измерительная плита; 7 — основание револьверной головки

Рисунок 13.20 — Измерительная плита фирмы “Promotec” на основе комплекта пьезоэлектрических элементов

от одного до четырех датчиков. Наиболее часто такие устройства устанавливаются между основанием револьверной головки и поперечным суппортом станка [53].

Некоторые характеристики пьезоэлектрических плит приведены в таблицах 13.2 и 13.3.

Т а б л и ц а 13.2 — Размеры пьезоэлектрических плит FS-4000 фирмы “Sandvik Coromant” для использования в токарных станках

Тип датчика	Длина, мм	Ширина, мм	Толщина, мм	Число единичных элементов в плите
FS-4001	185	130	12	4
FS-4002	210	138	15	4
FS-4003	250	150	18	4
FS-4004	310	190	24	4
FS-4005	390	220	30	4
FS-4006	470	285	36	4

Т а б л и ц а 13.3 — Размеры пьезоэлектрических плит типа FS-4100 фирмы “Sandvik Coromant” для использования в сверлильных станках

Тип датчика	Площадь, см ² , не более	Толщина, мм	Число единичных элементов в плите
FS-4101	200	15	1
FS-4102	300	15	1
FS-4103	400	18	1
FS-4104	600	18	1
FS-4105	900	18	1
FS-4106	1300	24	1

Пьезоэлектрические датчики могут располагаться не только снаружи, но и между деталями, имея форму колец (рис. 13.21).

Технические характеристики таких датчиков приведены в таблице 13.4 [52].

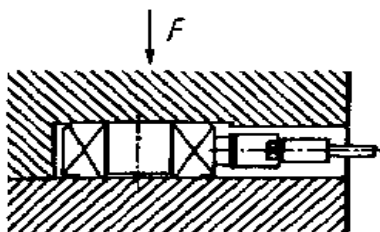


Рисунок 13.21 — Схема установки кольцевого пьезоэлектрического датчика

Т а б л и ц а 13.4 — Характеристики пьезоэлектрических датчиков типа 9000 (кольцо) фирмы “Kistler” [52]

Тип датчика	Максимальное измеряемое усилие, кН	Жесткость, кН / мм	Размеры, мм		
			Внутренний диаметр	Наружный диаметр	Высота
9001	7,5	1	4,1	10	6,5
9011A	15	1,8	6,5	14,5	8
9021A	35	3,5	10,5	22,5	10
9031A	60	6	13	28,5	11
9041A	90	7,5	17	34,5	12
9051A	120	9	21	40,5	13
9061A	200	14	26,5	52,5	15
9071A	400	26	40,5	75,5	17
9081A	650	30	40,5	100	22
9091A	1 200	65	66	145	27

Пьезоэлектрические датчики типа штифта могут использоваться для контроля сил резания и деформаций путем установки как снаружи, так и внутри контролируемых деталей (рис. 13.22). Такие датчики имеют весьма малые габариты (диаметр 9...10 мм) и достаточно высокую чувствительность (минимальное поперечное сечение стружки до 0,3 мм²).

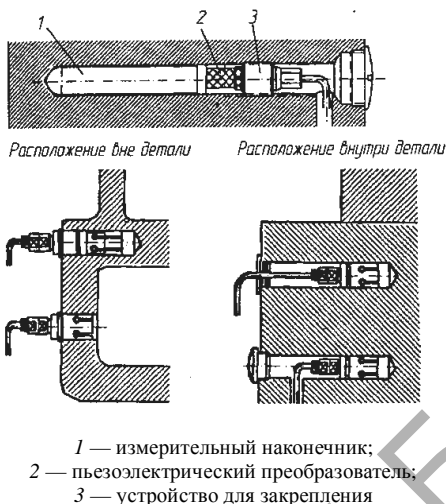
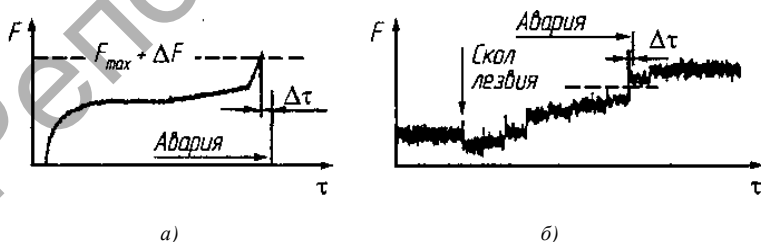


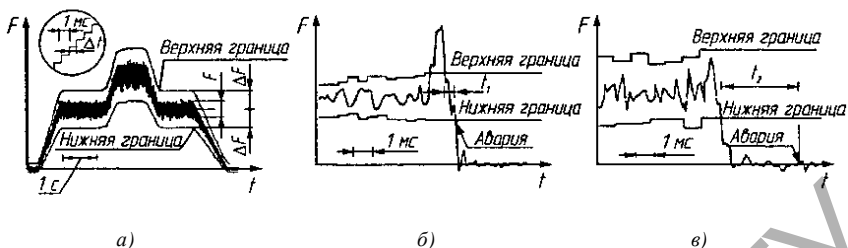
Рисунок 13.22 — Принципиальные схемы пьезоэлектрического датчика фирмы “Prometec” типа штифта и его установки

В большинстве случаев устройства для контроля сил резания и крутящих моментов сориентированы на выявление момента катастрофического износа. В зависимости от уровня электронной поддержки можно контролировать как статическую составляющую силы (рис. 13.23), так и совместно статическую и динамическую, возникающие в результате колебательных процессов в зоне резания (рис. 13.24).



a — изменение уровня сил по мере изнашивания режущего лезвия; *б* — изменение уровня сил после скола режущего лезвия

Рисунок 13.23 — Выявление катастрофического износа [46]



а — принципиальная схема; б — случай превышения верхней границы (малое дополнительное время на срабатывание); в — случай резкого уменьшения силы (большое дополнительное время на срабатывание)

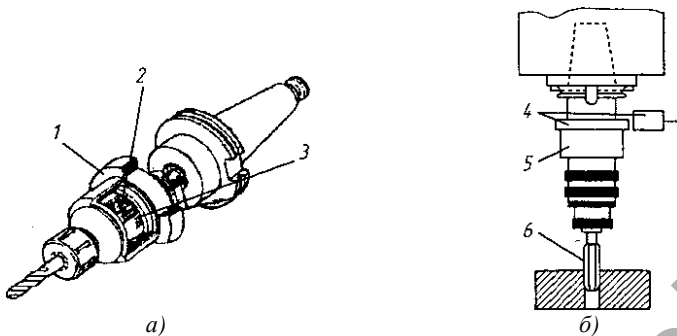
Рисунок 13.24 — Выявление катастрофического износа с учетом динамической составляющей силы резания [46]

Новейшие тенденции в развитии устройств контроля сил резания — появление так называемых «интеллектуальных» датчиков, передача первичных сигналов без проводов, использование новых методов измерения, создание датчиков для регистрации наряду с силой резания других характеристик процесса резания.

На рисунке 13.25 показан пример конструкции «интеллектуального» датчика, встроенного в инструментальную оправку для крепления сверл и метчиков. Она включает комплект тензометрических датчиков, первичный усилитель сигнала, аналого-цифровой преобразователь и микропроцессор, которые размещены в корпусе оправки. В комплект входят также радиопередатчик и приемник сигналов. Такое устройство может контролировать крутящий момент или осевую силу [54].

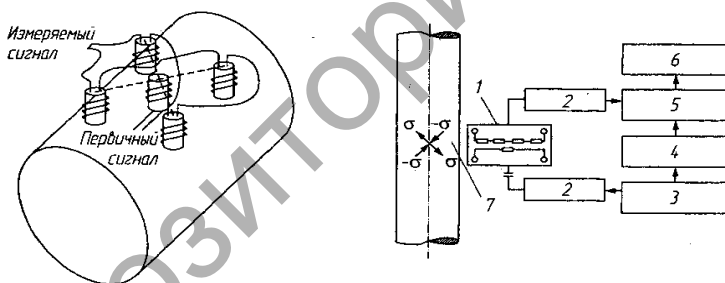
На рисунке 13.26 показан датчик для контроля крутящего момента при сверлении, принцип действия которого основан на использовании вихревых токов [54]. Датчик расположен вне инструментальной оправки и не снижает ее жесткости.

Магнитострикционный датчик для измерения крутящего момента (рис. 13.27) также не изменяет жесткости исследуемой конструкции. Длинные и тонкие металлические пленки, обладающие хорошими ферромагнитными свойствами, располагаются слоями в противоположных направлениях на периферии цилиндрической поверхности инструментальной оправки под углом 45° . Наружные индукционные катушки наводят в пленках магнитное поле. Деформации оправки под действием крутящего момента приводят к изменениям



- 1, 4 — устройство для передачи первичных сигналов без проводов;
 2 — устройство с аналого-цифровым преобразователем для первичной обработки сигнала; 3 — тензометрический элемент; 5 — оправка;
 6 — режущий инструмент

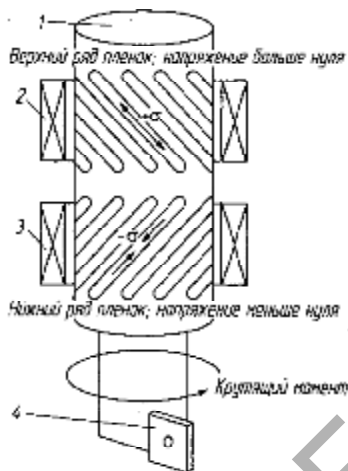
Рисунок 13.25 — Схемы датчика, вмонтированного в инструментальную оправку (а) фирмы “Sandvik Coromant” и «интеллектуального датчика» (б)



- а — расположение катушек; б — функциональная блок-схема; 1 — датчик;
 2 — усилитель; 3 — генератор первичных сигналов; 4 — задачик фазового смещения; 5 — блок сравнения фазовых смещений; 6 — блок управления;
 7 — воздушный зазор

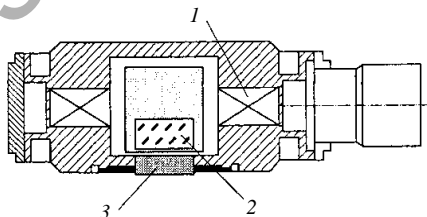
Рисунок 13.26 — Схема датчика крутящего момента для диагностики сверл [54]

магнитной проницаемости пленок, что, в свою очередь, изменяет силу тока индуктивности в катушках. Такие датчики могут использоваться во вращающихся инструментах типа торцовых фрез, а также встраиваться в шпиндельные узлы станков [55].



1 — хвостовик инструмента;
 2, 3 — катушки; 4 — режущее лезвие
 Рисунок 13.27 — Принципиальная
 схема магнитострикционного
 датчика для измерения крутящего
 момента [55]

Комбинированные датчики имеют более широкие технологические возможности и характеризуются надежностью работы. Так, датчик, показанный на рисунке 13.28, позволяет одновременно контролировать уровень сил резания и акустическую эмиссию [56].



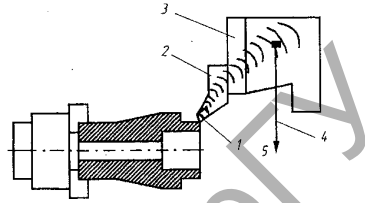
1 — пьезоэлемент для измерения сил;
 2 — пьезоэлемент для измерения
 акустической эмиссии; 3 — мембрана

Рисунок 13.28 — Схема датчика для
 одновременного измерения силы резания
 и акустической эмиссии [56]

Устройства, основанные на контроле уровня колебаний.

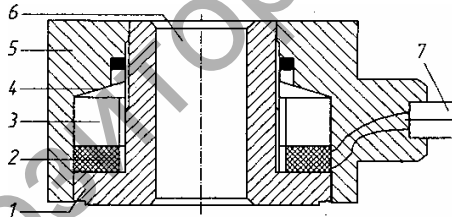
Известно, что в процессе резания генерируются колебания различных частот и амплитуд (рис. 13.29), которые в значительной степени зависят от состояния режущих лезвий [49].

Колебания в диапазоне звуковых и околозвуковых частот регистрируются с помощью датчиков ускорения (как правило, пьезоэлектрических). Пример конструктивного исполнения такого датчика показан на рисунке 13.30 [56]. Исследования показывают, что по мере затупления инструмента возрастает энергия (амплитуда) высокочастотных колебаний (рис. 13.31). Объектом контроля в этом случае служит соотношение энергий высоко- и низкочастотных колебаний, определяемое путем измерения интенсивности колебаний или звукового давления в определенном диапазоне частот [46].



- 1 — режущее лезвие инструмента;
- 2 — корпус инструмента;
- 3 — револьверная головка;
- 4 — система передачи сигнала от датчика; 5 — сигнал датчика

Рисунок 13.29 —
Распространение звуковых волн в ходе обработки детали



- 1 — корпус; 2 — кольцо из пьезокерамики;
- 3 — гравитационная масса; 4 — плоская пружина;
- 5 — пластиковая защитная оболочка;
- 6 — отверстие для крепления; 7 — кабель

Рисунок 13.30 — Схема пьезоэлектрического датчика для контроля колебаний

При принятии решения об использовании колебаний для контроля работоспособности инструмента следует учитывать, что в ряде случаев на изменения спектра звуковых и прочих видов колебаний существенное влияние оказывают непосредственно изменения режимов резания.

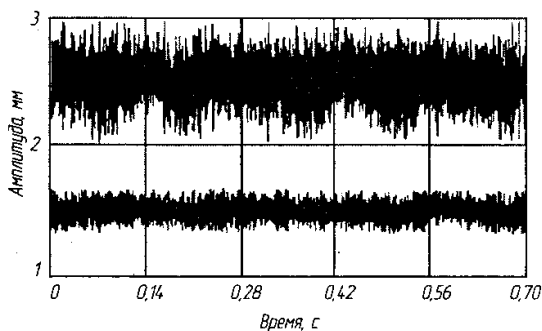
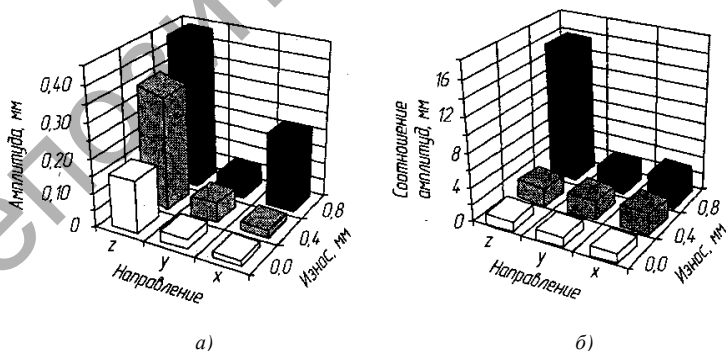


Рисунок 13.31 — Характер колебаний при точении острым (внизу) и затупленным (вверху) резцом

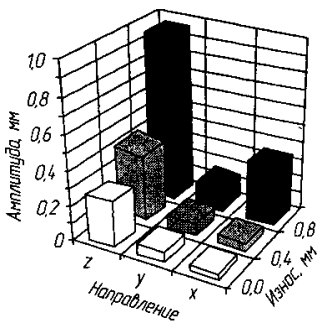
В этом случае необходимо сначала выделить составляющую амплитуды, генерируемую в результате изменения режима резания, а затем идентифицировать оставшуюся часть сигнала.

Практика показывает, что более достоверную информацию обеспечивает измерение не непосредственно амплитуд колебаний, а соотношений амплитуд в том или ином направлении действия сил по мере изнашивания инструмента. Установлено, что такие соотношения в значительной степени зависят от направления действия сил резания (рис. 13.32) [52].

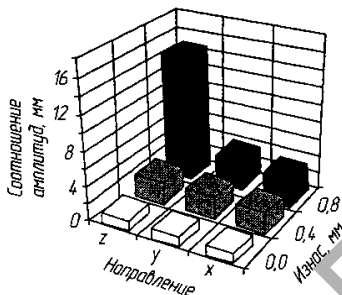


а, б — $V = 90$ м / мин; в, г — $V = 120$ м / мин; $l = 7$ 200 Гц

Рисунок 13.32 — Соотношения абсолютных (а, б) и относительных (в, г) значений амплитуды колебаний в различных направлениях в зависимости от износа резца



а)



б)

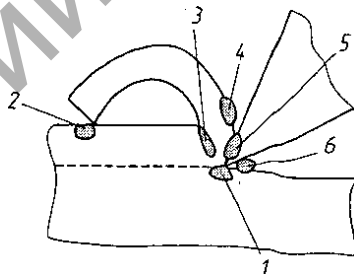
Рисунок 13.32 — Окончание

Устройства, основанные на измерении акустической эмиссии.

Процесс расхождения волн, возникающих в результате освобождения энергии упругости материала при его деформации, разрушении или структурно-фазовых превращениях называется акустической эмиссией. На рисунке 13.33 схематично показаны источники акустической эмиссии, действующие в процессе резания [57]. К ним следует добавить зоны износа инструмента, образования выкрашиваний и сколов, а также все прочие зоны, в которых возможно выделение механической (коробки скоростей подач, ходовые винты) или электромагнитной (реле, контакторы) энергии.

Акустическая эмиссия расходитя в материале аналогично ультразвуковым волнам, подвергаясь отражениям и всевозможным изменениям. Поэтому для использования такого сигнала необходима тщательная электронная поддержка, фильтрации и т. д. Встречаются два основных типа сигналов:

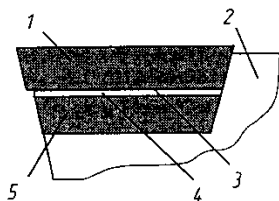
1) *постоянный с малой амплитудой*, генерированный в результате пластических деформаций материала и трения на контактных площадках;



1 — микротрещины в обрабатываемом материале; 2, 3, 6 — трение; 3, 4 — пластические деформации и разрушение; 5, 6 — ломание стружки и ее контактирование с другими поверхностями

Рисунок 13.33 — Источники возникновения акустической эмиссии в процессе резания

2) импульсный значительной амплитуды, связанный с образованием микротрещин в инструменте, стружке и поверхностном слое детали.



- 1 — режущая пластина;
- 2 — оправка; 3 — изоляция;
- 4 — пленочный датчик;
- 5 — опорная пластина

Рисунок 13.34 — Схема пленочного датчика для контроля акустической эмиссии

Сигналы первого типа характерны для обработки материалов, дающих сливную стружку; их амплитуда возрастает при возрастании износа задней поверхности инструмента и скорости резания. Сигналы второго типа характерны для обработки хрупких материалов; в этом случае импульс, возникший в результате скола элемента стружки, накладывается на сигнал первого типа, генерируемый в результате процессов трения и изнашивания.

Для регистрации сигналов могут использоваться пьезоэлектрические датчики (см. рис. 13.28), пленочные датчики (рис. 13.34) и др.

Устройства, основанные на измерении температуры и термоЭДС. В качестве контролируемых параметров можно использовать:

- температуру сходящей стружки, измеряемую с помощью оптико-электронного устройства, которое сфокусировано на зону струж-кообразования;
- смещение верхней границы скоростей наростообразования; в данном случае используется явление резкого изменения полной ЭДС резания при исчезновении нароста (рис. 13.35);
- термоЭДС, которая регистрируется с помощью термопары;
- изменение электрического сопротивления цепи, в которую входит режущий инструмент.

Принципиальная схема устройства для контроля электрического сопротивления цепи в зоне резания приведена на рисунке 13.36. На резец 2 между слоями диэлектрика 4 наносится тонкая пленка проводника 3, имеющая заданные параметры электрического сопротивления. При обработке детали 1 на резце появляется площадка износа h_3 по задней поверхности инструмента и уменьшается сопротивление пленки. Фиксируя изменения силы тока, можно определить износ [58].

Устройства, основанные на контроле формы стружки. Такие устройства позволяют регистрировать изменения формы стружки по мере износа инструмента (как правило, токарного резца). Такой

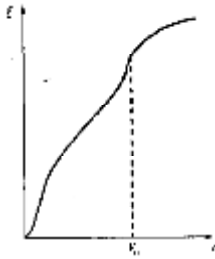


Рисунок 13.35 —
Зависимость термо-
ЭДС от скорости
резания (v_n — верхняя
граница зоны
наростообразования)

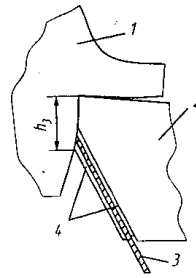


Рисунок 13.36 —
Схема контроля
износа
по изменению
сопротивления
электрической цепи

контроль можно обеспечить, фиксируя инфракрасное излучение из зоны обработки. Его интенсивность будет зависеть от количества находящейся там разогретой стружки. Аналогичным образом действуют и камеры тепловизоров. Изображение с камеры делится компьютером на участки с одинаковой интенсивностью теплового излучения, что позволяет определить характер образующейся в данный момент стружки (рис. 13.37) [59].

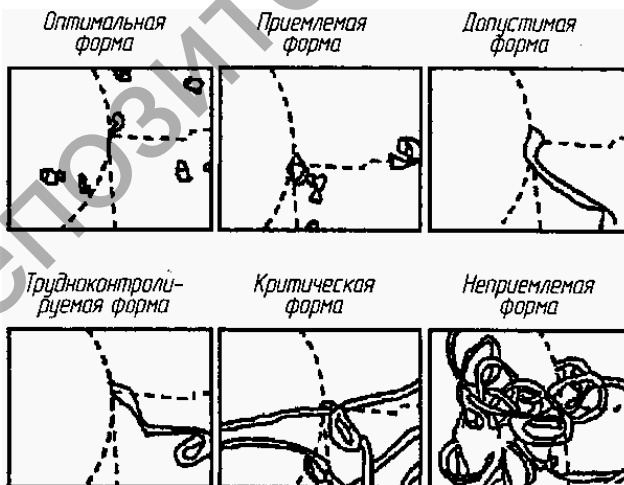


Рисунок 13.37 — Изображение стружки на экране тепловизора

Для контроля образующейся стружки можно использовать также контактные датчики. Они устанавливаются на передней поверхности инструмента и позволяют регистрировать изменения условий стружкообразования по мере износа резца (изменения радиуса кривизны стружки, направления ее схода и т. д.).

13.4 Измерения в рабочей зоне станка

Измерения в рабочей зоне позволяют уточнять наиболее важные размеры детали, выполнять в случае необходимости коррекцию управляющей программы, выявлять бракованные детали с целью исключения их из дальнейшей обработки, регулировать или заменять изношенный режущий инструмент.

В большинстве контрольных систем используются измерительные зонды (их конструкции описаны в подразделе 13.2). В зондах могут использоваться датчики касания (контактные) либо лазерный луч (бесконтактные). С их помощью идентифицируют детали, определяют правильность их расположения на столе станка (с целью компенсации ошибок закрепления заготовки на палете и палеты на столе), выполняют коррекцию ошибок положения стола при обработке соосных отверстий в противоположных стенках корпуса, измерение наиболее ответственных размеров и т. д.

При соприкосновении шупа зонда и измеряемой поверхности (рис. 13.38) в нем генерируется электрический сигнал, который считывается аналого-цифровым преобразователем и преобразуется в координаты измеряемой точки.

На рисунке 13.39 показана схема для измерения детали с помощью зонда и фрагмент управляющей программы [49] (N010 G80 G90 G00; N020 T0101; N030 T0101 X100 Z60 M9; N040 G65 P9010 X0 Z10 F1000; N050 G65 P9019 D50 Z-5 T5; N060 G65 P9010 Z-10; N070 G65 P9015 X40 T7; N080 G65 P9010 Z5; N090 G65 P9010 X45; N100 G65 P9018 Z0 M9 E1; N110 G65 P9010 X70; N120 Z65 P9010 Z-15; N130 G65 P9015 X65 T10 M1; N140 G65 P9010 X100 Z60; N150 G28 U0 W0; N160 M30).

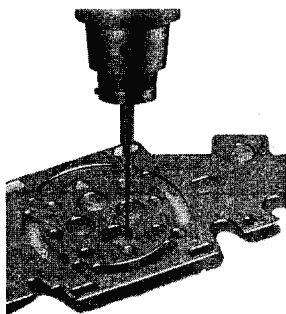
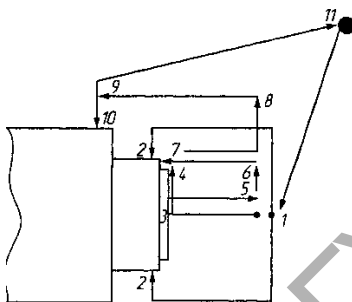


Рисунок 13.38 — Контроль точности обработки с помощью измерительного зонда фирмы “Renishow”



2, 3, 4, 7 — точки, которые служат для измерения диаметральных размеров,
10 — базовая точка

Рисунок 13.39 — Схема измерения детали с помощью зонда

13.5 Измерения вне станка

Измерения детали вне станка позволяют освободить его от функций измерения. Это целесообразно в следующих случаях: время измерения значительно превышает время обработки; необходимо измерять значительное количество деталей; не предусматривается повторная обработка детали на станке после выявления погрешностей обработки.

Для измерений на контрольном рабочем месте применяются:

- 1) универсальные измерительные устройства;
- 2) специальные измерительные устройства, предназначенные для измерения определенных деталей;
- 3) координатные измерительные машины;
- 4) измеряющие роботы.

Измерительные устройства первых двух групп используются преимущественно для контроля определенных размеров. Устройства располагаются в непосредственной близости от станка, детали устанавливаются для измерения промышленным роботом.

Координатные измерительные машины характеризуются высокой точностью и универсальностью измерений. Они состоят из комплекта измерительных устройств, устройств для управления и переработки

информации, а также компьютера, который может функционировать самостоятельно либо подключаться к главному компьютеру ГПС.

В результате измерений можно создать пространственный образ детали без необходимости ее точного расположения в измерительном пространстве.

Измеряющие роботы представляют собой измерительные машины, которые могут быстро перемещаться в нужную область пространства. Они объединяют в себе достоинства как измерительных машин, так и роботов: с одной стороны, это точность измерений, с другой — быстрота перемещений, возможность использования одновременно нескольких «рук» робота с соответствующими измерительными насадками, возможность установки на системе транспортирования деталей, работы в загрязненном пространстве цеха и т. д.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Алехнович, В. Н.* Электронно-лучевая обработка материалов / В. Н. Алехнович, А. В. Алифанов, А. И. Гордиенко, И. Л. Поболь — Минск : Беларус. наука, 2006. — 319 с.
2. *Поболь, И. Л.* Лезвийная обработка керамических материалов / И. Л. Поболь, Г. П. Куликов // Актуальные проблемы прочности : материалы XIII Междунар. конф. — Витебск, 2004. — Ч. 2. — С. 311—317.
3. *Френкель, Я. Е.* Вязкое течение в кристаллических телах / Я. Е. Френкель // Эксперименты технической физики. — 1946. — Вып. 1, № 16. — С. 29—38.
4. *Пинес, Б. Я.* О вязком разрыве / Б. Я. Пинес // Эксперименты технической физики. — 1946. — Вып. 8, № 16 — С. 744—754.
5. *Пинес, Б. Я.* Спекание, крип, отдых, рекристаллизация и другие явления, обусловленные самодиффузией в кристаллических телах / Б. Я. Пинес // Успехи физических наук. — 1954. — Вып. 4, № 52 — С. 501—559.
6. *Пинес, Б. Я.* О спекании неоднородных тел / Б. Я. Пинес // Эксперименты технической физики. — 1956. — Вып. 9, № 26 — С. 2086—2107.
7. *Ивсенен, В. А.* Кинетика уплотнения металлических порошков при спекании / В. А. Ивсенен. — М. : Металлургия, 1971. — 269 с.
8. *Гегузин, Я. Е.* Физика спекания / Я. Е. Гегузин — М. : Наука, 1967. — 360 с.
9. *Гегузин, Я. Е.* Микроскопические дефекты в металлах / Я. Е. Гегузин — М. : Металлургия, 1962. — 252 с.
10. *Гегузин, Я. Е.* Об эффекте расширения локализационной пористой области в кристаллическом теле / Я. Е. Гегузин, Л. И. Парицкая // Доклады АН СССР. — 1961. — Т. 141, №4, — С. 833—835.
11. *Гегузин, Я. Е.* О диффузионной коалиценции пор в кристаллических телах с сеткой границ / Я. Е. Гегузин, Л. И. Парицкая // Порошковая металлургия. — 1962. — №5. — С. 20—25.
12. *Гегузин, Я. Е.* Самодиффузия и вязкое течение (спекание и крип) у спрессованных металлических порошков / Я. Е. Гегузин, Л. О. Маркой, Б. Я. Пинес // Доклады АН СССР. — 1952. — Т. 87, № 4. — С. 577—580.
13. *Скорород, В. В.* Исследование спекания порошков никеля, полученных различными методами / В. В. Скорород, Г. О. Раннева // Порошковая металлургия. — 1963. — №3. — С. 25—29.
14. *Скорород, В. В.* Реологические основы теории спекания / В. В. Скорород. — Киев : Наукова думка, 1972. — 148 с. 15. Исследование влияния физических свойств порошков на их усадку в процессе спекания : сб. науч. тр. / Куйбышевский авиационный институт, науч. ред. Г. И. Аксенов — 1963. — Вып. 16. — С. 123—130.
16. Исследование влияния физических свойств порошков на их усадку в процессе спекания : сб. науч. тр. / Куйбышевский авиационный институт, науч. ред. Г. И. Аксенов — 1963. — Вып. 16. — С. 60—67, 83—88.
17. *Федорченко, И. М.* Теория и практика спекания / И. М. Федорченко, В. В. Скорород // Порошковая металлургия. — 1967. — №10. — С. 29—50.
18. *Кислый, П. И.* Повышение активности порошков к спеканию / П. И. Кислый, М. А. Кузенкова // Порошковая металлургия. — 1969. — № 11. — С. 21—25.

19. Райченко, А. И. Химические методы активации спекания порошковых материалов / А. И. Райченко, Л. П. Хандрос, Н. А. Муравский // Порошковая металлургия. — 1970. — №1. — С. 26—29.

20. Федорченко, И. М. Исследование концентрационной зависимости усадки при спекании двухфазных систем / И. М. Федорченко, И. И. Иванова // Сб. науч. ст. / Теория и технология спекания. — Киев : Наукова думка, 1974. — С.105—115.

21. Энциклопедия неорганических материалов : в 2т./ под ред. И. М. Федорченко [и др.]. — Киев : Укр. сов. энциклопедия, 1977. — Т. 2 : Материаловедение — 1977. — С. 565—571.

22. Тонкая техническая керамика / под ред. Х. Янагида. — М. : Металлургия, 1986. — 276 с.

23. Шведков, Е. Л. «Вязкая» керамика за рубежом (теоретические предпосылки) / Е. Л. Шведков // Институт проблем материаловедения АН УССР. — Киев, 1987. — № 7. — 21 с.

24. Шведков, Е. Л. «Вязкая» керамика за рубежом (практическая реализация)/ Е. Л. Шведков// Институт проблем материаловедения АН УССР. — Киев,1987. — № 8. — 23 с.

25. Аллюминотермия / Н. П. Лякишев, Ю. Л. Плинер, Г. Ф. Игнатенко, СИ. Лапко ; под ред. Н.П. Лякишева.— М. :Металлургия, 1978. — 423 с.

26. Каталог керамических режущих сменных многогранных пластинок. — М : Препринт / ВНИИТИС, 1992 — 11 с.

27. Алифанов, А.В. Получение высокопрочных оксидно-субсидных керамик методом горячего статического прессования и перспективы их применения в режущем инструменте / А. В. Алифанов, Н. В. Бурносос, А. М. Милукова, О. А. Толкачева // Перспективные материалы и технологии : материалы Междунар. науч. конф., посвященной 75-летию дня рождения академика НАН Беларуси Клубовича В. В. — Витебск, 27—28 марта 2008 г. — С. 185—190.

28. Алифанов, А. В. Перспективы применения белых хромованадиевых чугунов для изготовления деревообрабатывающего инструмента / А. В. Алифанов, В. А. Тиманюк, Н. В. Бурносос // Труды БГТУ, серия II «Лесная и деревообрабатывающая промышленность». Выпуск IX. — Минск, 2001. — С. 112—115.

29. Хренов, К. К. Сварка, резка и пайка металлов / К. К. Хренов. — М. : Машиностроение, 1973. — 408 с.

30. Лашко, С. В. Пайка металлов / С. В. Лашко, Н. Ф. Лашко. — М. : Машиностроение, 1988. — 376 с.

31. Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. — М. : Высш. шк., 1963 — 423 с.

32. Алифанов, А. В. Ресурсосберегающая, упрочняющая технология изготовления концевого режущего инструмента горячим выдавливанием / А. В. Алифанов, А. М. Милукова // Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки : материалы 11-ой Междунар. науч.-практич. конф., СПб., 14—17 апр. 2009 г., ч. I. — СПб : изд-во Политехн. Института, 2009. — С. 10—15.

33. Гонялин, С. И. Экспорт и импорт МОО России в 2005 г. и в первом полугодии 2006 г. / И. С. Гонялин // КТО Новости. — 2007. — №1. — С. 3—7.

34. Корниенко, А. Г. Тенденции рынка электро- физико-химических станков / А. Г. Корниенко // Комплект : ИТО. — 2005. — № 2. — С. 20—23.
35. Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories. 21- Century Technologies. Editor Dashchenko Anatoly, Springer, 2006,800 p.
36. Manufacturing Technologies for Machines of the Future. 21- Century Technologies. Editor Dashchenko Anatoly, Springer, 2006,792 p.
37. Нахопетян, Е. Г. Техническая диагностика машин и безопасность / Е. Г. Нахопетян //Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2000. — № 4. — С. 105—108.
38. Босинзом, М. А. Оценка качества поворотных столов с мехатронным приводом по квалиметрическим данным / М. А. Босинзом, Е. Г Нахопетян // Приводная техника. — 2004. — № 6. — С. 24—28.
39. Нахопетян, Е. Г. Применение квалиметрии механизмов в экспертных методах определения качества машин / Е. Г. Нахопетян, А. Л. Феофанов // Технология машиностроения. — 2006. — № 4. — С. 63—66.
40. Нахопетян, Е. Г. Перспективы и пути развития науки в станкостроении России / Е. Г. Нахопетян, А. Л. Феофанов, Б. И. Черпаков // СПИН. — 2006. — № 3. — С. 2—9.
41. Демьянюк, Ф. С. Технологические основы поточного автоматизированного производства / Ф. С. Демьянюк. — М. : Высш. шк., 1965. — 690 с.
42. Феофанов, А. Л. Гибкие автоматические линии в машиностроении / А. Л. Феофанов. — М. : Янус-К, 2002. — 192 с.
43. Точность и надежность автоматизированных прецизионных металлорежущих станков / Б. М. Бржозовский [и др.] ; под общ. ред. А. А. Игнатъева. — 4.2. — Саратов : СГТХ, 1994. — 456 с.
44. Игнатъев, А. А. Методология динамических испытаний станков на параметрическую надежность/ А. А. Игнатъев, В. А. Добряков, Е. А. Сигитов // Материалы VII МНТК «Динамика технологических систем». — Саратов, 2004 — С. 39—45.
45. Кугель, Р. В. Надежность машин массового производства / Р. В. Кугель. — М. : Машиностроение, 1981. — 244 с.
46. Kosmol, J. Automatyzacja obrabiarek I obrobki skrawaniaem / J. Kosmol. — Warszawa WNT, 2000. — 444 s.
47. Контроль и диагностирование автоматизированных металлорежущих станков / Б. М. Бржозовский [и др.] ; под общ. ред. Б. М. Бржозовского. — М. : ВНИИТЭМР, 1991. — 76 с.
48. Steuerungintegrierte Überwachung von Fertigungspressen / M. Weck [und and.] // VDI. —Z., 1998. — № 6. — S. 53—57.
49. Honcharenko, J. Elastyczna automatyzacja wytwarzania Obrabiarki I systemy obrobkowe/ J. Honcharenko. — Warszawa : WNT, 2000. — 486 s.
50. Honcharenko, J. Tester serwonapedow posuwu obrabiarek sterwanych numerycznie / J. Honcharenko, R. Torczyski // Mechanik. — 1992. — № 8—9. — S. 255—257.
51. Ratajczyk, E. Sondy stykowe w maszynach I robotach pomiarowych / E. Ratajczyk // Mechanic. — 1994. — № 8—9. — S. 297—301.
52. Adamczyk, Z. Monitorowanie ostrza skrawajacego. Metody konwencjonalne I sieci neuronowe / Z. Adamczyk, K. Jemielniak, J. Kosmol, Sokolowski; pod red. J. Kosmol. — Warszawa : WNT, 1996. — 244 s.

53. *Schneider, H. P.* Ausfälle und Störungen minimieren / H.P. Schneider // Industrie Anzeiger Extra. — NC — Technic, 1989. — S. 11.

54. *Tonshoff, H. K.* Berührungslose Messung des dynamischen Bearbeitungsmomentz zur Überwachung chlanken rotierender Werkzeuge / H. K. Tonshoff, E. Brinksmeier, H. Husen // Elektrotechnik und Informationstechnik. — 1991. — № 6. — P. 252—257.

55. *Aoyama, H.* Cutting Force Sensing in Milling Process / H. Aoyama, H. Ohzeki, A. Mashine, J. Takashita // Conf. Monitoring of Machining and Forming Processes. — 1995. — P. 319—333.

56. *Byrne, G.* Tool Condition Monitoring (NCM) — The status of research and Industrial Application / G. Byrne, D. Dornfeld, I. Inasaki, G. Ketteler, R. Teti // CIRP Annals. — № 2. — P. 541—568.

57. *Masumura, T.* Automouse turning operation planning with prediction tool wear and surface roughness / T. Masumura, T. Obikawa, T. Shirakashi, E. Usui // Trans. Of the ASME. — 1993. V.XXI. — S. 359—366.

58. *Konig, W.* Research of Tool Condition Monitoring in Europe — State of the Art and Future Prospects / W. Konig, G. Kettle // Proc. Third Meeting of the CIRP Working Group on TCM. — Paris, 1994. — P. 8—29.

59. *Widota, A.* Diagnostyka obrabiarek I pceru obrobki oraz jej zastosowanie w ASO / A. Widota // Mechanik. — 1988. — № 4. — S. 171—182.

Учебное издание

Алифанов Александр Викторович
Калугин Юрий Константинович

**ПРОБЛЕМЫ
СТАНКОСТРОЕНИЯ**

Курс лекций
для студентов инженерных специальностей

Технический редактор *М. Л. Потапчик*

Корректор *И. И. Ананько*

Компьютерная верстка *В. В. Кукреши*

Ответственный за выпуск *Е. Г. Хохол*

Подписано в печать 17.12.2010.

Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная.

Гарнитура Таймс. Отпечатано на ризографе.

Усл. печ. л. 13,72. Уч.-изд. л. 10,92.

Заказ 187. Тираж 80 экз.

ЛИ 02330/0552803 от 09.02.2010

Издатель и полиграфическое исполнение:

учреждения образования

«Барановичский государственный университет»,

225404, г. Барановичи, ул. Войкова, 21.

Репозиторий БарГУ

Репозиторий БарГУ

Репозиторий БарГУ