

В. А. ОСТАФЬЕВ
В. С. АНТОНЮК
Г. С. ТЫМЧИК

ДИАГНОСТИКА ПРОЦЕССА МЕТАЛЛО- ОБРАБОТКИ

Киев
«Тэхніна»
1991

ББК 34.5
О-76
УДК 621.9008:620.179.17

Авторы: *В. А. Остафьев, В. С. Антонюк, Г. С. Тымчик*
Рецензент канд. техн. наук *В. Н. Торлин*

Редакция республиканских межведомственных научно-технических сборников
Зав. редакцией *Э. А. Вавилова*

Остафьев В. А. и др.
О-76 Диагностика процесса металлообработки
/ В. А. Остафьев, В. С. Антонюк, Г. С. Тымчик.—
К.: Техника, 1991.— 152 с.
ISBN 5-335-00209-3

Рассмотрены вопросы технической диагностики и контроля процессов металлообработки в условиях гибкого автоматизированного производства. Приведены методы диагностирования, показатели и критерии качества технологических процессов. Даны сведения о специальных методах и аппаратуре для технической диагностики и оптимального управления процессом металлообработки.

Рассчитана на научных работников, работающих в области создания автоматических систем управления технологическими процессами, может быть полезна инженерно-техническим работникам и студентам вузов соответствующих специальностей.

О $\frac{2704010000-023}{M202(04)-91}$ 84-91

ББК 34.5

ISBN 5-335-00209-3

© Остафьев В. А., Антонюк В. С., Тымчик Г. С., 1991

Безлюдная технология требует выполнения операций, обеспечивающих заданную точность изготовления деталей и надежность технологического процесса без участия человека, и может быть реализована в условиях гибкого автоматизированного производства. При этом эффективность использования гибких производственных систем (ГПС) обеспечивается за счет автоматизации производственного комплекса, многосменной эксплуатации станков и использования надежных отработанных технологических процессов. При разработке надежных технологических процессов применяют как технологические приемы повышения надежности операций, так и специальные средства контроля и диагностики состояния технологической системы.

Основой комплексной автоматизации технологических процессов металлообработки в этих условиях является применение оборудования, обеспечивающего автоматизированную загрузку и обработку заданной группы деталей, автоматическое изменение режимов обработки, контроль, замену инструмента, переналадку оборудования, связь с транспортными системами или накопителями. При этом необходимо обеспечить требуемую универсальность оборудования, гибкость и мобильность при высокой производительности и качестве обработки.

Вместе с тем высокая надежность и точность диагностических систем определяется как качеством датчиков и электронного оборудования, так и качеством созданного математического обеспечения. Причем качество математического обеспечения, в первую очередь, связано с информацией, получаемой от систем автоматического проектирования технологических процессов. Появление в производстве и непосредственно на рабочих местах микропроцессорной и вычислительной техники изменило возможности передачи и обработки информации, в результате чего появились сложные интеллектуальные системы управления и диагностики металлообработкой. Такие системы позволяют измерять энергетические, электро-

магнитные, тепловые, динамические и другие явления, происходящие при металлообработке.

Создание математических технологических моделей только на основе накопления эмпирических данных о режимах обработки очень несовершенно, так как они используются только в узких пределах изменения параметров процесса резания. Для расширения области применения этих моделей необходимо, чтобы диагностика непосредственно в процессе обработки обеспечивала их адаптацию или путем учета коэффициентов, или изменением структуры самой модели. Поэтому современные диагностические системы должны быть самообучающимися и использовать информацию датчиков, полученную в процессе обработки нескольких деталей. Построение таких систем требует изучения, глубокого анализа физических процессов, происходящих в зоне резания, и их точного математического описания.

Для широкого внедрения ГПС и особенно станков с ЧПУ необходимы новые методологические подходы к разработке, проектированию и компоновке систем диагностики технологических процессов. С учетом современных направлений развития автоматизированного производства авторы сформулировали некоторые принципы создания новых и модификаций существующих систем диагностики технологических процессов, которые можно легко адаптировать к любым условиям обработки.

В книге обобщен многолетний опыт авторов, рассмотрены специальные методы, а также новые системы диагностики и оптимального управления процессом металлообработки, защищенные авторскими свидетельствами и внедренные на промышленных предприятиях.

Отзывы о книге просим направлять по адресу: 252601 Киев, 1, ул. Крещатик, 5. Издательство «Тэхника».

СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ДИАГНОСТИКИ ПРОЦЕССА МЕТАЛЛООБРАБОТКИ

Создание автоматизированных систем диагностики связано с построением иерархической самовосстанавливаемой адаптивной системы управления, включающей высокопроизводительные ЭВМ и микропроцессоры, предназначенные для решения задач учета поступления материалов, наличия деталей, брака продукции, состояния и наличия инструмента, диспетчеризации, контроля резервирования, наладки, ремонта.

Создаваемые производственные модули, включающие технологическое оборудование, контрольные, диагностические, загрузочно-разгрузочные устройства, накопители и магазины для инструмента и заготовок, должны обладать возможностью подключения к многоуровневой системе управления производством. Увеличение числа встроенных датчиков и измерительных систем обеспечивает контроль качества обработки размеров изделий, состояния инструмента, оборудования и оснастки.

Для современного подхода к диагностике технологического процесса характерно применение системных методов, которые предполагают использование автоматизированных процедур диагностирования с помощью ЭВМ и микропроцессоров, а также ужесточения требований к оперативности, достоверности и глубине диагностирования.

К основным задачам технической диагностики в условиях автоматизированного производства [7] относятся: обеспечение заданных условий выполнения технологического процесса; предупреждение поломок или своевременная остановка оборудования в аварийных ситуациях; прогнозирование постепенно развивающихся дефектов с целью уточнения сроков ремонта и предупреждения аварий; контроль качества регулировки механизмов и выдачи информации (в цифровой или аналоговой форме) для обеспечения качественной их регулировки персоналом; проверка и поиск локализации мест дефектов, изменение режимов работы или оповещение персонала о месте отказа; определение критериев оценки качества выполнения технологического процесса; выбор

критериев оценки состояния процесса обработки; проверка качества регулировки всех механизмов и оценка оборудования; получение эталонных параметров и «эталонных» характеристик для контроля состояния и диагностики оборудования.

1. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Одним из перспективных направлений повышения надежности технологических процессов является разработка динамических методов технической диагностики, особенность которых заключается в сочетании методов диагностики технологических процессов и оборудования. При этом широкое применение должны получить методы количественной оценки качества технологических процессов, предусматривающие тесную взаимосвязь диагностирования с эксплуатационными исследованиями технологической надежности оборудования.

Целью технической диагностики является определение, в каком из заранее установленного множества состояний находится исследуемый процесс. Диагностика включает в себя совокупность операций контроля как всего процесса в целом, так и его отдельных операций, причем требуется определить, какие именно из этих операций следует осуществлять и в какой последовательности, как обрабатывать результаты этих операций.

В технической диагностике можно выделить три группы задач, связанных с построением моделей процесса, с разработкой методов диагноза, основанных на использовании построенной модели, и разработкой принципов и способов построения диагностических устройств и систем.

Первая группа задач предусматривает детальное изучение свойств процессов и включает в себя следующие задачи: изучение нормального функционирования технологического процесса; выделение возможных состояний процесса, т. е. возможных комбинаций отказов; анализ технических возможностей контроля признаков, характеризующих состояние процесса; сбор и обработку статистических данных о распределении вероятностей возможных состояний процесса, а также закономерностях проявления отказов отдельных его операций; выбор форм предоставления модели процесса и разработку методов ее построения.

Вторая группа задач, основанная на исследовании математических моделей контролируемых процессов, включает разработку методов построения диагностических тестов при анализе технологического процесса; построение оптимальных программ и процедур диагностики, позволяющих определить состояние процесса.

Третья группа задач решает следующие вопросы: разработку принципов построения диагностических систем и выбор способов их аппаратурной реализации; оценку диагностических устройств и систем по быстродействию и надежности, избыточности информации, полноте и достоверности диагноза технико-экономической эффективности и другим показателям; определение связей диагностической системы с технологическим процессом.

Структура и принцип действия диагностических систем во многом зависит от выбора метода диагностики и вида используемой при этом математической модели, которая служит основой для разработки алгоритма функционирования диагностической системы и ее технической реализации.

Рассмотренные задачи диагностики позволяют оценить состояние технологического процесса в некоторый момент времени. Оценка будущего состояния процесса является задачей технического прогнозирования, которая формулируется следующим образом: по наблюдению процесса изменения показателей качества или отдельных параметров объекта на определенном интервале времени предсказать их значение в некоторый будущий момент времени. Необходимые данные для решения задачи прогнозирования получают в результате контроля состояния технологического процесса. В зависимости от характера и конкретных задач, решаемых при прогнозировании, различают контроль с прогнозированием значений показателя качества объекта в будущие моменты времени или контроль с прогнозированием времени наступления отказа.

Под процессом контроля состояния технологического процесса понимаются проверка соответствия его характеристик установленным нормам обнаружения отказов и анализа причин их появления, получение необходимой информации для выявления возникающих отказов или для прогнозирования их появления в будущем с целью предотвращения аварийных ситуаций. Аварийные ситуации возникают вследствие появления таких изменений в технологическом процессе, которые приводят к частичному или полному срыву выполнения системой поставленной задачи.

Для решения основной задачи контроля, которая заключается в определении пригодности системы для выполнения своих функций, могут быть использованы различные формы контроля в зависимости от сложности технологического процесса и его функционального назначения. При контроле состояния технологического процесса выполняется большое число измерительных операций, по результатам которых выдается информация о состоянии его параметров.

Каждая технологическая система характеризуется как основными, так и вспомогательными параметрами. При диагностике и контроле учитываются основные параметры, т. е. такие показатели, которые характеризуют функциональное изменение процесса. По степени изменения контролируемых параметров судят об изменении состояния технологического процесса (например, режущего инструмента и детали).

Носителем информации о состоянии процесса является диагностический сигнал, получаемый посредством измерения контролируемых параметров в фиксированный момент времени. Диагностический сигнал может быть получен в результате измерения и одного параметра, но в различные моменты времени.

Таким образом, как контроль работоспособности, так и диагностика технологического процесса металлообработки заключается в определении его текущего состояния путем контроля параметров и характеристик или путем проверки степени выполнения им своих функций. При этом под параметром понимают физическую или математическую величину, характеризующую состояние отдельной операции или процесса в целом, а под характеристикой — зависимость одного параметра от другого или изменение параметра во времени. Получаемая диагностическая информация позволяет не только устанавливать значение контролируемого параметра, определять, превышает ли он наибольший допустимый предел или принимает значение ниже номинального, но и осуществлять целенаправленный поиск путей предсказания нормального функционирования технологического процесса.

Устройства для автоматического поиска неисправностей называются диагностическими системами. Диагностические системы при контроле состояния сложных объектов являются частью информационно-измерительных систем, осуществляющих обработку и анализ информации о функционировании технологического процесса.

Следовательно, задачи технической диагностики мо-

гут быть сформулированы следующим образом: определение технического состояния процесса и уровня его работоспособности; оценка качества функционирования процесса; определение места и причин неисправностей и их устранения; получение исходных данных для прогнозирования технологического состояния процесса; получение исходных данных для анализа степени совершенства конструкции и технологии производства; получение исходных данных для анализа влияния условий эксплуатации на качество функционирования процесса.

Для решения поставленных задач применяются следующие современные методы диагностирования состояния технологических процессов:

1. Корреляционный метод применяется для обнаружения отклонений параметров (взаимная корреляция) или изменения параметров во времени (автокорреляция). Этот метод не требует сложного математического оборудования и легко автоматизируется с помощью ЭВМ.

2. Спектральный или спектрально-корреляционный метод основан на выделении и измерении составляющих сложных сигналов. Он используется при виброакустических методах диагностирования, требует сложной аппаратуры и математического обеспечения.

3. Тестовый метод диагностирования основан на подаче стимулирующих воздействий в зону обработки, а также регистрации и анализе отклика на них. К тестовым методам относится метод проверки при обработке контрольной заготовки определенной формы (по предельной стружке, погрешностям обработки).

4. Метод временных интервалов применяется для анализа простоев, определения показателей надежности, контроля режимов работы и системы управления, расчета кинематических параметров, получения циклограмм для отдельных модулей. Этот метод позволяет осуществить первичную локализацию неисправности.

5. Метод эталонных (нормированных) модулей основан на сравнении экспериментально определенных и расчетных (полученных на математических моделях) численных значений параметров и показателей качества (мощности, усилений крутящих моментов, давлений, ускорений, подачи, амплитуд вибрации и т. п.) с их паспортными данными и техническими условиями. Преимуществом этого метода является возможность разностороннего использования полученной информации. С помощью эталонных модулей могут быть рассчитаны квазиметрические показатели кинематических и силовых параметров,

использованные для оценки качества процесса при его диагностировании. Реализация метода эталонных модулей, основанная на применении предельных значений одного или нескольких модулей и метода ветвей при диагностировании, не требует сложной аппаратуры программного обеспечения.

6. Метод эталонных (нормированных) зависимостей основан на сравнении экспериментально полученных функциональных зависимостей параметров с эталонными, найденными расчетным или экспериментальным путем. Этот метод не нашел широкого распространения, он требует применения сложной аппаратуры, но при этом позволяет повысить глубину и достоверность диагностирования.

7. Метод эталонных (типовых) осциллограмм является одним из наиболее простых и эффективных методов диагностирования и широко применяется для объектов, в которых характерны низкочастотные динамические процессы. При реализации этого метода расчетным и экспериментальным путем создается эталонная осциллограмма и формируется библиотека осциллограмм, характеризующих ее дефектное состояние.

8. Метод сопоставления и наложения осциллограмм основан на анализе одновременно записанных осциллограмм различных параметров или одного и того же параметра, но при различных условиях работы. Он представляет собой усложненный метод эталонных осциллограмм, с помощью которого анализируются динамические циклограммы модуля или устанавливаются место и время возникновения дефекта путем записи кинематических и силовых параметров в различных точках.

9. Метод определения предельных (аварийных) состояний основан на обнаружении факта выхода технологического процесса в недопустимые или несоответствующие заданной программе условия. Для систем, использующих этот метод, характерны активная ответная реакция, выключение и остановка движущихся частей оборудования или отдельных механизмов, включение резервного питания, световая или звуковая сигнализация станка, передача информации в другие подразделения.

Перечисленные методы позволяют проводить диагностирование по косвенным признакам, но многие из них требуют количественного определения и нормирования показателей качества оборудования и технологических процессов.

Применение этих методов начинается с построения моделей, разрабатываемых методов и устройств диагностики. При построении моделей формулируются условия функционирования технологического процесса и требования к его основным характеристикам, определяются признаки, по которым требуется различать конкретное его состояние и выбирается минимально необходимое для контроля число параметров.

Моделирование реального технологического процесса включает этапы построения и изучения моделей, а также этап экспериментального исследования. При моделировании обязательным условием является замещение исследуемого объекта материально-вещественным, либо «идеальным» объектом, являющимся абстрактным описанием реального процесса в виде формул, графиков, таблиц, т. е. представляющим собой нематериализованную модель исследуемого технологического процесса. Такие модели, называемые математическими моделями, позволяют производить исследования с помощью ЭВМ и наиболее широко использовать при исследовании сложных технологических процессов.

Математические модели можно объединить в две группы — детерминированные и статистические (или вероятностные) математические модели.

Детерминированная математическая модель — это такая модель, описание которой дается в виде функциональных зависимостей между входными и выходными параметрами процесса. Статистическая модель определяется набором статистических параметров и функций распределения вероятностей. Такая модель носит гораздо более формальный характер чем детерминированная, так как отображает процесс, не учитывающий конкретные физические свойства.

Таким образом, математическая модель представляет собой совокупность уравнений, отражающих функциональные зависимости между входными x_1, x_2, \dots, x_m и выходными Y_1, Y_2, \dots, Y_n параметрами процесса:

$$Y_1 = f(x_1, x_2, \dots, x_m);$$

$$Y_2 = f(x_1, x_2, \dots, x_m);$$

.....

$$Y_n = f(x_1, x_2, \dots, x_m).$$

Входными параметрами технологического процесса являются те, которые создают определенные условия

протекания процессов и на которые можно воздействовать непосредственно (скорость резания, подача и др.).

Выходные параметры технологической системы — это такие параметры, которые являются результатом работы объекта и протекающих в ней процессов (точность обработки, шероховатость поверхности детали и т. д.).

Технологический процесс характеризуется не только контролируемыми параметрами, которые обозначаются как x -параметры, но и параметрами, которые трудно поддаются контролю или вообще не контролируются. Конкретный выбор определенной математической структуры для построения модели технологического процесса производится с помощью определенного критерия.

Таким образом, основными этапами математических моделей исследуемого технологического процесса являются выбор математической структуры модели, оптимального критерия приближения модели к процессу (т. е. критерия соответствия между математической структурой и свойствами технологического процесса) и реализация полученной системы уравнений, связывающей параметры исследуемого процесса. Необходимым условием является то, что построенная модель должна содержать такое количество информации, которая отображала бы все разнообразные варианты состояния технологического процесса.

2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ИХ ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА

Прогресс в развитии машиностроения, частая смена конструкций станков и применение принципиально новых технологических процессов сделали неприемлемым развитие органолептических методов технической диагностики, основанных на многолетнем опыте освоения и эксплуатации оборудования. Это обусловило необходимость применения инструментальных методов диагностики, использующих совокупность проводимых измерений параметров механизмов оборудования, системы управления и технологического процесса [6].

Диагностирование технологического процесса является основным средством получения информации об его реальном уровне качества и функциональных возможностях. Внедрение методов автоматизированных испытаний, контроля и диагностирования, а также метрологических методов и средств, обеспечивающих подготовку

сбора данных, сбор и обработку экспериментальных данных с погрешностями, не превышающими допустимых, может успешно решаться только с использованием системного подхода как единой методической основы современных экспериментальных исследований [4].

Большое значение при автоматизации постановки диагноза имеет применение оптимальных статистических методов оценивания параметров состояния по ограниченному числу данных измерений. Для этого необходимо изучить опыт эксплуатации оборудования, отдельных систем и механизмов; подробно исследовать с помощью статистических и динамических методов взаимосвязь между параметрами и нормами параметров и характеристики, выявить наиболее информативные признаки; моделировать динамические процессы и изучать отклик на них; выбрать несколько наиболее перспективных для применения методов и сравнить достигаемую глубину и достоверность диагностирования.

На первом этапе диагностики производится исследование функционирования процесса и установление связей между его функциональными операциями. На основании полученных сведений составляется по определенным правилам формализованное описание наблюдаемых процессов, т. е. строится модель. Эта модель является абстрактным отображением реального или исследуемого процесса. Необходимость построения модели определяется не только стремлением упростить задачу путем отбрасывания из рассмотрения несущественных сторон диагностируемого процесса, но и стремлением охватить возможно большее число состояний, которые могут возникнуть в реальных условиях функционирования. Форма представления модели, ее глубина и степень детализации во многом определяют способы осуществления анализа.

Для диагностирования динамических систем применяются методы, при которых в качестве основного носителя диагностической информации используются сложные сигналы (например, сигнал шума механизма), переходная характеристика или импульсная переходная функция.

Математические модели процессов диагностики могут быть представлены в виде алгебраических дифференциальных и интегродифференциальных уравнений. Выбор той или иной формы определяется характером и сложностью диагностируемого процесса, объемом имеющейся априорной информации, требуемой глубиной диагноза и техническими возможностями получения информации.

Рассмотрим основные требования, которым должны отвечать модели и которые вытекают из особенностей диагностики технологических процессов.

1. Модель должна быть достаточно абстрактной, чтобы ее можно было применять для широкого класса технологических процессов. В то же время модель должна учитывать все существующие особенности конкретного процесса.

2. Модель должна охватывать возможно большее число состояний процесса и осуществлять его анализ на различных уровнях.

3. Модель должна быть представлена в форме, удобной для ее технической реализации, в том числе на ЭВМ.

4. Модель должна использовать для решения задач диагностики формальный аппарат современной математики.

5. Модель должна выделять наиболее информативные параметры, которые отражают существующие свойства диагностируемого технологического процесса и которые необходимо контролировать в процессе диагностики, т. е. должна определять оптимальную совокупность контролируемых параметров.

Математические модели, описывающие реальные процессы, можно классифицировать с различных точек зрения. В задаче технической диагностики основную роль играет способ реализации моделей и форма конкретного представления. Наиболее общей моделью любой технической системы является оператор.

Параметрические модели применяются для линейных линеаризованных систем в качестве линейных дифференциальных уравнений или передаточных функций.

В качестве диагностической модели можно рассматривать систему уравнений:

$$L_1 \{y_1\} = f_1 \{t\};$$

$$L_2 \{y_2\} = f_2 \{t\};$$

$$L_k \{y_k\} = f_k \{t\},$$

где $L_j \{y_i\}$ — линейный оператор порядка $n = [j = 1 \dots k]$; $L_j \{y_i\} = y_j^n(t) + a_{jn-1}(t)y_j^{n-1}(t) + \dots + a_{j0}(t)y_j(t)$; $y_j(t)$ — выходная функция; $f_i(t)$ — входная функция, соответствующая j -й выходной координате.

Эта модель позволит сформулировать условия работоспособности диагностируемого процесса и определить

допустимые изменения контролируемых параметров. Однако для построения самой модели необходимо знать большое число параметров. Поэтому на практике в качестве модели используют передаточную функцию выходных сигналов или только те ее характеристики, которые применяют при контроле работоспособности диагностируемого процесса.

Тогда в качестве диагностической модели рассматривают характеристическое уравнение $a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0 = 0$, где p_i ($i = 1, 2, \dots$) — параметр, определяющий характер изменения выходного сигнала во времени, а также собственных частот объекта.

Среди других моделей данного класса следует отметить также частотные характеристики, алгебраические, интегральные и интегродифференциальные уравнения. Существенным недостатком этих моделей является затрудненное применение их для нелинейных объектов, а также невозможность определять оптимальную совокупность контролируемых параметров.

Полиномиальные модели применяются для диагностирования процессов, для которых невозможно найти аналитические выражения их операторов. В этом случае связь между входными и выходными сигналами исследуемого процесса аппроксимируется различными рядами, ортогональными разложениями или уравнениями регрессии. Точность аппроксимации достигается за счет выбора вида полинома, его порядка и подбора коэффициентов.

Часто при описании процесса ограничиваются моделью, содержащей члены и взаимодействие не выше второго порядка:

$$M\{y\} = b_0 + \sum_i b_{i1} x_i + \sum_{i,j} b_{ij} x_i x_j + \sum_i b_{ii} x_i^2,$$

где y — параметр (выход) процесса, подлежащий изучению; $b_0, b_{i1}, b_{ij}, b_{ii}$ — координаты регрессии; x_i, x_j — переменные факторы исследуемого процесса, от которых зависит отклик.

Полиномиальные модели имеют более высокий уровень формализма и обладают большей универсальностью, чем параметрические. Однако связь параметров в них выражена неявно, что затрудняет возможность использования этих моделей для оценки работоспособности процесса. Они применяются для описания процесса в узком интервале переменных.

Непараметрические модели объединяют переходные функции, импульсные переходные функции и спектраль-

ные характеристики. К основным достоинствам этих моделей относится то, что исходные данные для исследования могут быть получены как расчетным, так и экспериментальным путем. Эти модели широко используются для контроля и диагностики механических объектов (например, при акустической диагностике), так как дают более точные результаты контроля по сравнению с параметрическими моделями.

По уровню адекватности модели можно приблизительно разбить на четыре группы.

К первой группе относятся самые простые, которые правильно описывают только установившиеся режимы работы. Эти модели слишком грубо отражают переходные процессы. Поэтому их использование ограничено, они служат главным образом для расчета коэффициентов более сложных моделей.

Вторая группа моделей оценивается по критериям, в первом приближении учитывающим и переходные процессы. К ним относятся модели, позволяющие приближенно оценить выходные кинематические параметры (быстродействие, динамические нагрузки и устойчивость движения).

К третьей группе относятся модели, учитывающие упругость и инерционность масс. Они позволяют добиться совпадения с экспериментальными данными по силовым параметрам переходных процессов. Модели такого типа используются непосредственно для оценки чувствительности рабочих характеристик к изменению внутренних параметров и выявлению выходных параметров. С помощью этих моделей можно рассчитывать нагрузки, действующие на диагностические параметры, выявлять наиболее нагруженные детали и выделять устройства, дефекты регулировки, которые оказывают влияние на надежность и работоспособность.

Модели четвертой группы, характеристики которых совпадают с экспериментальными данными по частоте и амплитуде первых гармоник, форме кривых в переходных процессах, еще более точно отражают динамику процесса. С их помощью можно рассчитывать и сравнивать различные варианты конструктивного обеспечения требуемых рабочих параметров, уточнять характеристики управляющих элементов. Эти модели можно упрощать путем неполного учета факторов, влияние которых рассмотрено на примере более простых моделей.

Таким образом, уровень адекватности модели определяет, какие характеристики устройства можно на ней

исследовать и какой глубины диагностирования может достичь построенный по этой модели алгоритм.

Известны восемь уровней абстрактного описания сложных систем [6; 7]: символический (лингвистический); теоретико-множественный; абстрактно-алгебраический; топологический; логико-математический; теоретико-информационный; динамический; эвристический.

Например, задачу вибродиагностики механической системы можно решать с помощью теоретико-множественной постановки задачи. На первом этапе разработки системы диагностики создается диагностическая модель, которая устанавливает связь между параметрами, отражающими состояние объекта диагностики с показателями его динамического качества:

$$D: R \times X \rightarrow S; B: S \rightarrow T; Z: T \rightarrow V; F: V \rightarrow A, (1)$$

где D — отображение прямого (декартова) произведения множества внешних испытательных воздействий и пространства состояний объекта на множество сигналов-откликов; R — внешнее испытательное воздействие (или реальные шумы в системе); X — пространство состояний диагностики; S — множество сигналов-откликов; B — отображение множества сигналов-откликов S на множество информативных признаков T ; Z — отображение множества информативных признаков на множество дефектов (нарушений процесса) оборудования; F — отображение множества дефектов V на множество показателей качества A .

Отображения D, B, Z, F могут задаваться в классе вероятностных, расплывчатых, небулерных и толератных множеств.

Диагностическая модель (1) как единое целое отображает всю совокупность причинно-следственных связей при протекании технологического процесса металлообработки.

Постановка задачи синтеза систем автоматизированной вибродиагностики технологического процесса связана с изучением вибрационных нагрузок и акустического излучения действующих при работе сигналов, а решение — с получением математических моделей сигналов и моделей динамических систем.

В общем случае задача синтеза может быть условно разделена на четыре класса задач:

1) измерение различных временных процессов, включая разработку и установку первичных преобразователей, разработку стратегии размещения датчиков и т. п.;

2) аналого-цифровое преобразование сигналов и их ввод в ЭВМ;

3) предварительная обработка реализаций (оценка стационарности, эргодичности, цифровая фильтрация и др.), расчет и графическое изображение характеристик;

4) выявление информативных диагностических признаков и идентификация параметров систем, а также разработка алгоритмов и процедур диагностирования механической системы.

Для решения перечисленных выше задач целесообразно использовать информационно-измерительную систему, которая представляет собой совокупность аппаратных, алгоритмических и программных средств, обеспечивающих автоматизацию проведения диагностических исследований, сбора и обработки экспериментальных данных.

Для повышения эффективности информационно-измерительной системы необходимо, чтобы она обладала возможностями многоканального и параллельного ввода исходных данных непосредственно в ЭВМ. В этом случае помимо существенного уменьшения времени на проведение испытаний и обработку результатов можно получить и оценить динамические характеристики объекта практически в реальном масштабе времени, т. е. непосредственно в ходе испытаний объекта; выявить особенности поведения сложной исследуемой системы при ограниченном или даже разовом эксперименте; обеспечить синхронность исходных реализаций и взаимно корреляционные и взаимно спектральные расчеты при неизменных свойствах окружающей среды.

Развитие динамических методов контроля и диагностики действующего технологического оборудования связано с использованием современных измерительных средств и прежде всего измерительных первичных преобразований. Это объясняется тем, что именно измерительные первичные преобразования, являясь дистанционно удаленными от оператора и вторичной аппаратуры, устанавливаются на объекте и обладают наиболее высокой конструктивной, функциональной и метрологической надежностью, так как потеря информации из-за несовершенства измерительных первичных преобразователей не может быть компенсирована впоследствии. Успешное внедрение разработанных диагностических методов в производственную практику чаще всего зависит от уровня разработки применяемых измерительных первичных преобразователей.

Тенденции развития техники измерительных первичных преобразователей строятся на концепции распределенных измерительных и вычислительных мощностей, т. е. создании преобразователей со встроенными электронными усилителями. Это измерительные первичные преобразователи соответствуют системам сбора данных, поскольку содержат в себе как аналоговые, так и цифровые узлы, обеспечивающие предварительную обработку собираемых данных. Основными достоинствами, так называемых, активных измерительных первичных преобразователей являются простота эксплуатации; возможность широкой унификации выходных сигналов, возможность работы в условиях сильных промышленных помех на длинные линии; универсальность, возможность встраивания в контролируемое оборудование; легкость постановки в системах автоматизации научного эксперимента.

Реализация изложенных выше принципов позволяет не только сохранять трудоемкость экспериментальных исследований, операций контроля и диагностики технологических процессов и повышать их точность, но и создавать встроенные средства контроля и диагностики автоматизированных систем.

3. ВЫБОР КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Одновременно с внедрением гибких автоматизированных производств (ГАП) возникает необходимость быстрого и эффективного решения задач автоматизации контроля на всех стадиях технологического процесса, автоматизации контроля инструмента, обрабатываемых деталей и заготовок. В ходе технологического цикла обработки детали она подвергается предварительному, текущему и выходному контролю [13].

Предварительный контроль должен обеспечивать условия для безотказного протекания технологического процесса. Контролю подвергаются заготовки (правильность формы, положения, материал и др.), инструмент (размеры инструмента, форма инструмента, износ состояния режущей кромки), состояние оборудования (наличие заготовки, инструмента, управляющих программ, работа системы охлаждения и смазки и т. д.).

Текущий автоматический контроль должен обеспечивать не только бесперебойную работу оборудования,

но и высокое качество обработки. При этом контролируются форма детали (исходная, промежуточная, окончательная), качество обработки, степень износа и целостность инструмента, режим резания и другие параметры, влияющие на конечный продукт.

Выходной контроль предназначен, главным образом, для обеспечения качества продукции. Контролируются параметры (размеры, шероховатость поверхности, допуски и т. д.), определяющие качество продукции.

При разработке отдельных диагностических процедур (тестового диагностирования, диагностирования по виброакустическим, кинематическим, силовым параметрам и др.) применяют следующие этапы технической диагностики [6].

Подготовительный этап включает систематизацию признаков дефектных состояний технологических процессов обработки детали и оборудования на основе обобщения опыта эксплуатации и испытаний. При этом разрабатываются способы выявления дефектов оборудования по данным анализа результатов контроля обрабатываемых деталей; анализируются хронографические записи протекания технологического процесса с целью оценки показателей производительности и надежности, выделения основных параметров, требующих периодического контроля в процессе эксплуатации оборудования. Основное внимание уделяется опробованию инструментальных методов контроля технологического процесса с проведением регулировки механизмов по кинематическим, динамическим и точностным параметрам и с накоплением признаков дефектных состояний. Таким образом, для подготовительного этапа характерны формализация органолептических методов диагностики и первичное внедрение инструментальных методов контроля производительности, кинематических и динамических параметров.

Основной этап характеризуется широким внедрением инструментальных методов контроля сложного технологического процесса. Накопленный на подготовительном этапе опыт используется для оснащения оборудования встроенными диагностическими системами. При модернизации оборудования предусматриваются места для установки датчиков систем внешнего периодического контроля, а в системах управления — возможность диагностирования технологического процесса по временным интервалам и наиболее важным технологическим параметрам.

Для этого этапа характерна разработка рекомендаций

по инструментальным методам контроля. Оборудование оснащается датчиками и приборами контроля. В результате значительно улучшается качество технологического процесса, снижаются непредвиденные выходы из строя узлов, повышаются производительность и долговечность оборудования, уменьшается брак.

Заключительный этап включает создание в условиях комплексной автоматизации производства многоуровневой системы технической диагностики. На данном этапе проводятся комплексные динамические испытания технологических процессов, включающие испытания на надежность и отработку комплексных критериев качества. Систематизация информации о динамических характеристиках оборудования способствует не только улучшению условий его эксплуатации, но и позволяет получить данные, необходимые для совершенствования конструкций оборудования. Комплексный подход к диагностированию технологического процесса дает возможность повысить эффективность технической диагностики на всех стадиях создания, эксплуатации и модернизации этого оборудования. При этом возрастают требования к надежности и соответственно к глубине диагностирования, которые позволяют повысить точность, достоверность сбора измерительной информации, точность и оперативность обработки результатов измерений, повысить эффективность и снизить затраты. Эти требования обеспечиваются при совместном решении методических, организационных и производственных задач [4].

Методические задачи заключаются в системно-информационном анализе объектов исследования и выявлении их особенностей, выделении квалитетических и диагностических параметров, разработке метрологического и информационного обеспечения, методов и средств для проведения экспериментальных исследований.

Организационные задачи состоят в проведении экспериментов по единому плану, информационном обмене данными и результатами исследований однотипных технологических процессов, сборе информации об условиях и особенностях его протекания и данных об отказах оборудования.

Производственные задачи заключаются в подготовке необходимых условий и проведении экспериментальных исследований на различных стадиях производства с целью улучшения качества выпускаемой продукции, повышения производительности и долговечности оборудования.

Решение этих задач возможно на основе системного подхода, который рассматривает все виды экспериментальных исследований как единое целое, а их составные части тесно связаны между собой. Структура исследуемой системы может быть представлена определенной иерархией целей, подцелей и задач различных уровней (рис. 1).

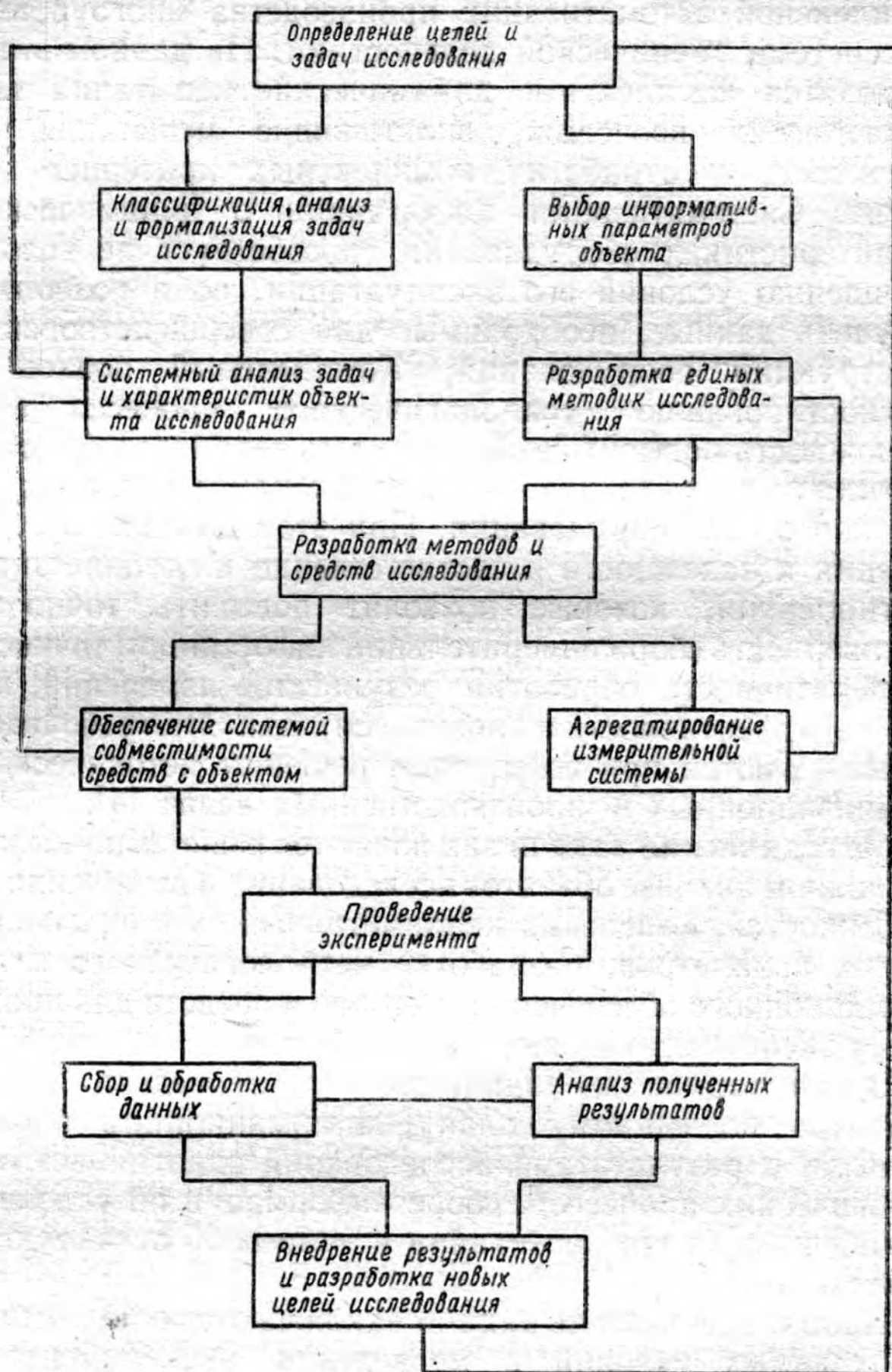


Рис. 1. Системная структура и связи экспериментальных исследований

Рассматриваемый подход позволяет по мере его формализации и развития соответствующего математического

аппарата переходить к машинно-ориентированным методам системного анализа на ЭВМ.

Первоочередными задачами, подлежащими решению при использовании системного подхода к экспериментальным исследованиям, являются сбор, обработка и статистический анализ численных данных об основных информативных параметрах технологического процесса.

Экспериментальные методы, используемые при оценке качества оборудования и технологического процесса, включают следующие этапы измерения [7]:

1) определение временных интервалов циклограммы работы технологического и вспомогательного оборудования, этапов движения и обработки деталей, простоев оборудования, наработки на отказ;

2) определение частоты вращения шпинделей и распределительных валов; числа импульсов, подаваемых в систему управления и т. п.;

3) регистрацию электрических сигналов, поступающих от элементов системы управления в процессе функционирования и при тестовых воздействиях, с целью обнаружения и учета отказа системы управления и механизмов контроля формы сигналов;

4) определение кинематических характеристик выходных звеньев механизмов и двигателей для контроля заданных длин или углов перемещения, объема обслуживаемого пространства, быстродействия закона движения, инерционных усилий, кинетической энергии, т. е. технического состояния оборудования;

5) регистрацию силовых параметров и энергетических характеристик: усилий, моментов, давлений, напряжений и мощности с целью контроля условий обработки нагрузочной способности и возможных деформаций;

6) определение точностных, размерных параметров и качества поверхности заготовок, инструмента, обработанных деталей, месторасположения заготовок относительно приспособлений, а также уточнение программ обработки, и осуществление своевременной подналадки оборудования;

7) регистрацию виброакустических характеристик (виброперемещений, виброскоростей, виброускорений, амплитудно-фазовых смещений), выявления дисбалансов, биений зазоров, неравномерности шага элементов передач, а также определение жесткости системы, источников шума и вибраций, износа и повреждений рабочих поверхностей инструмента;

8) определение температуры и перепадов температур в различных точках станка в зоне резания для контроля технологических режимов;

9) осуществление экспресс-анализа химического и физико-механического свойств и структуры заготовок и готовой продукции, рабочих жидкостей, смазки, отходов для контроля условий протекания технологических процессов, локализации мест его нарушения;

10) регистрацию электрических параметров: токов, напряжений, сопротивлений с целью контроля технологических процессов, состояние оборудования, инструмента и параметров подаваемой электроэнергии;

11) определение износа поверхностей, деталей оборудования, инструмента и оснастки, зазоров и статистических деформаций.

При диагностике или контроле измеряемые параметры относятся либо к структурным параметрам оборудования, прямо определяющим техническое состояние его деталей, или инструмента, либо к косвенным, отражающим влияние износа, деформаций изменения физико-химических свойств материалов по отклонению выходных параметров оборудования.

Основной особенностью диагностики технологических процессов является то, что нельзя ограничиваться каким-либо одним методом диагностики. Это определяется требованиями, предъявляемыми как к оборудованию, так и к технологическому процессу. Таким образом, необходима разработка комплексных методов диагностирования. Кроме того, необходимо объединить автоматические диагностические системы с системами управления технологическими процессами адаптации, подналадки и регулировки оборудования и системами сбора статистической информации о производительности, наличии брака и др. Схема применения диагностической информации в условиях ГАП показана на рис. 2.

Основным техническим базисом для проведения испытаний, контроля и диагностирования технологического процесса являются измерительно-информационные системы, представляющие совокупность средств сбора и обработки данных, объединенных на основе единого метрологического информационного и программного обеспечения.

Возможность диагностирования условий обработки резанием в целом представляется информативностью того или иного регистрируемого параметра, т. е. изменением его значения при изменении контролируемого параметра

резания [20]:

$$k = \Delta P_p / \Delta P_k,$$

или

$$k = dP_p / dP_k, \quad (2)$$

где k — коэффициент информативности; $\Delta P_p = P_{p(i-1)} - P_{p(i)}$ — приращение регистрируемого параметра при изменении контролируемого; $\Delta P_k = P_{k(i+1)} - P_{k(i)}$.

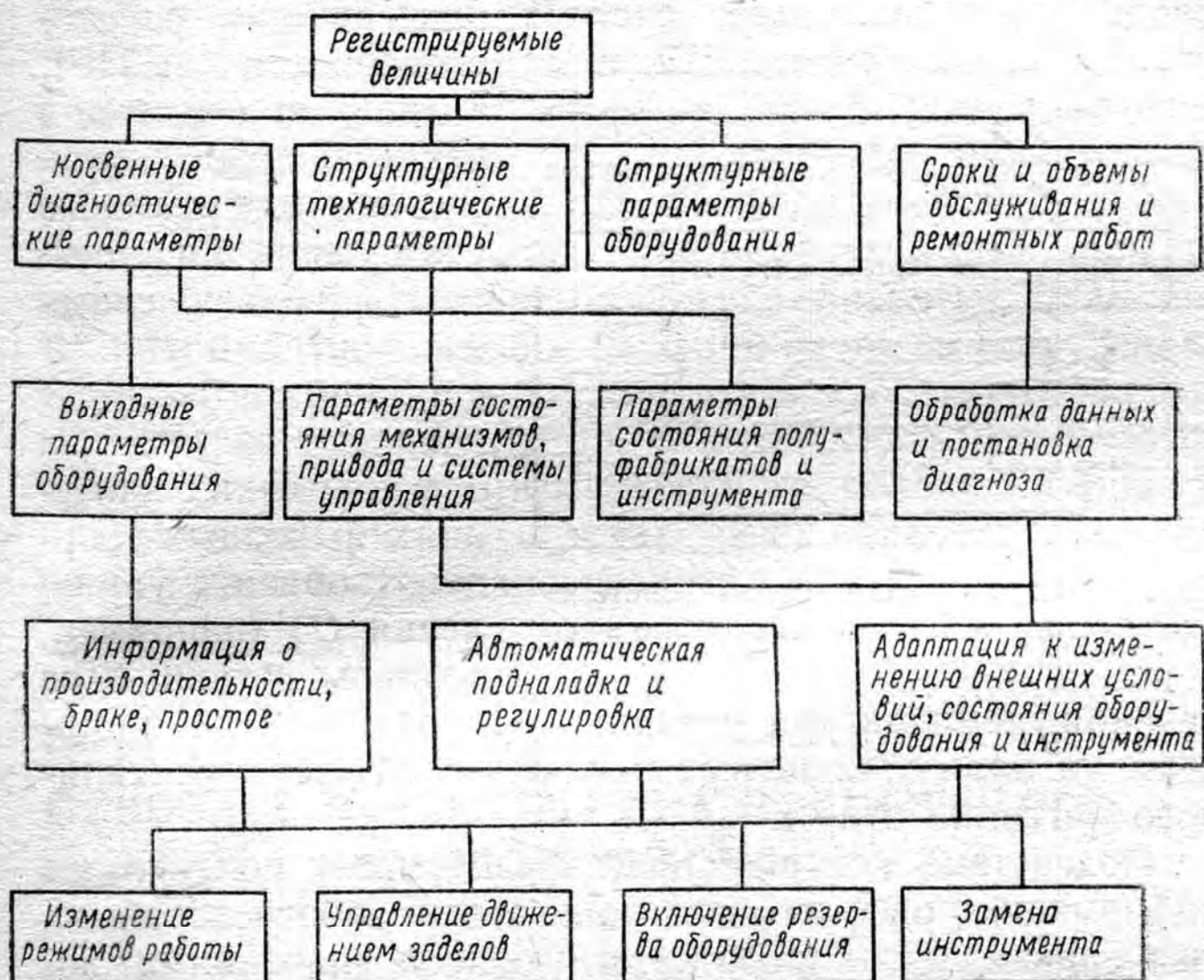


Рис. 2. Схема применения диагностической информации в ГАП

Под ΔP_p понимается некоторая характеристика (например, амплитуда, активность сигнала и др.), включающая технологические характеристики резания, а под ΔP_k — изменение некоторого технологического параметра обработки: времени, скорости обработки, износа инструмента и др.

Используя в формулах (2) вместо приращений параметров их относительное изменение $\Delta P = (P_{i-1} - P_{(i)}) / P_{(i)}$, получим безразмерные зависимости.

При разработке специализированных измерительно-информационных систем средства вторичного преобразования и предварительной обработки, а также регистрации могут конструктивно объединяться, образуя подсистему сбора и регистрации данных.

Рассмотрим структурную схему системы диагностики технологического процесса (рис. 3), реализуемого в условиях ГАП. В состав гибкого производственного модуля входят: металлорежущий станок, устройство для установки и снятия деталей, накопитель установок и обрабатываемых деталей, устройство для смены инструмента, контрольно-измерительное средство для контроля размеров детали и других параметров работы и состояния оборудования. В системе управления модулем функцию наблюдателя выполняет система поддержания работоспособности (СПР),

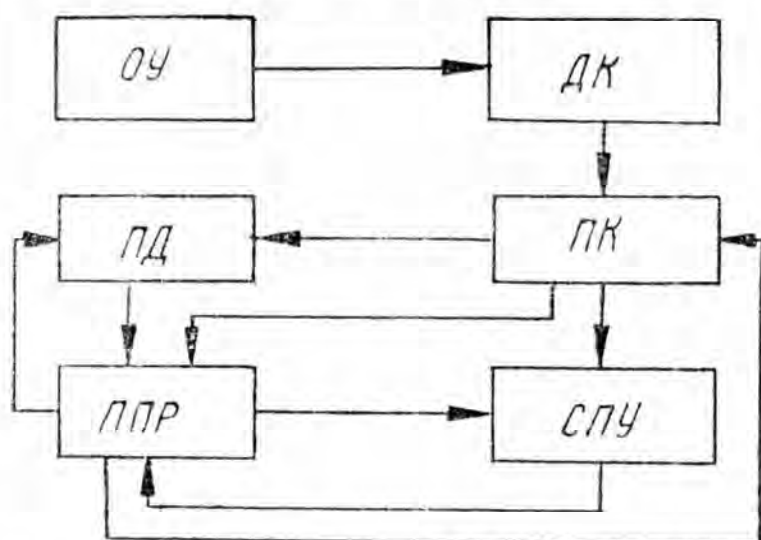


Рис. 3. Структурная схема системы диагностики технологического процесса

которая включается в цепь обратной связи системы программного управления объектом.

На вход подсистемы контроля *ПК* от датчиков контроля *ДК* поступает информация о фактических значениях выходных координат объекта управления *ОУ* (например, размеры детали, сила

резания, температура резания или подшипников шпинделя, сигналы от концевых выключателей инструментального магазина и др.).

Подсистема контроля *ПК* обрабатывает полученную информацию, рассчитывает показатели работоспособности и сравнивает их с соответствующими значениями, которые могут быть рассчитаны самой подсистемой или вводятся в ее память в ходе обучения.

При сравнении показателей технологического процесса *ПК* формирует сигнал об отклонении его параметров, который в зависимости от степени аварийности ситуации подается непосредственно в систему программного управления *СПУ* или в подсистему принятия решений *ППР*. По требованию *ППР* запрос может передаваться подсистеме диагностики *ПД* для выяснения причин отказа.

При проведении диагностических проверок *ПК* может производить дополнительный опрос датчиков. После сбора всей информации *ППР* вырабатывает соответствующие корректирующие воздействия, передаваемые в *СПУ* для реализации.

Структурная схема *СПР* может иметь различные аппаратную и программную реализации. Так, задачи

контроля и диагностики могут решаться в отдельном блоке, который не входит в состав СПУ станков.

Отдельные подсистемы СПР выполняют следующие задачи [13].

Подсистема контроля *ПК* контролирует работу механизмов станка и другого оборудования модуля, процесс резания и состояния инструмента, размеры детали и качество обработанной поверхности, размеры заготовки и точность ее базирования на станке, работу системы управления.

Подсистема диагностики *ПД* предназначена для определения причины и места отказа. В зависимости от выявленной причины подсистема *ППР* обеспечивает соответствующий режим работы. Например, при поломках или предельном износе инструмента, а также при невозможности продолжать начатую обработку *ППР* может выбрать оптимальное решение из числа следующих: сменить инструмент и продолжить обработку той же заготовки, забраковать деталь и потребовать новую заготовку, отложить начатую деталь до появления нового инструмента, «рискнуть» и закончить обработку, несмотря на сигнал о предельном износе и т. п.

Глава 2

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДИАГНОСТИРУЕМОГО ПРОЦЕССА МЕТАЛЛООБРАБОТКИ

Диагностику процесса металлообработки можно вести только на основании глубокого понимания физических явлений, ее сопровождающих. Значение этих явлений в процессе резания определяется целой гаммой различных параметров, измерение которых и является основной целью диагностики. Сложность диагностики процесса металлообработки заключается в том, что все эти параметры взаимосвязаны, причем изменение одного из параметров может быть незначительным, в то время как целый ряд других параметров существенно изменяют свое значение. Поэтому в зависимости от цели диагностики необходимо ориентироваться на измерение именно тех параметров процесса резания, которые наиболее тесно связаны с достижением данной цели. В связи с этим требуется детальное рассмотрение физических основ процесса резания, позволяющих раскрыть и промоделировать возникающие явления для обоснования принципов

построения диагностических систем. Создание же достаточно надежных диагностических систем возможно на основе анализа процесса металлообработки с помощью математического моделирования. Разработка таких моделей и анализ с их помощью измеряемых параметров позволяют наиболее точно не только вести процесс диагностики, но и управлять металлообработкой.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕ ПРОЦЕСС МЕТАЛЛООБРАБОТКИ

Процесс резания металлов представляет собой деформацию и отделение верхнего слоя металла (припуска) под действием режущего инструмента. Режущая часть всех видов режущего инструмента (резцы, сверла, зенкеры, развертки, фрезы, метчики, протяжки) — это клин различной формы, параметры и материал которого подбираются в зависимости от свойств обрабатываемого материала. Поэтому в процессе диагностики процесса металлообработки необходимо все время следить за условиями эксплуатации инструмента, чтобы они не привели к резкому падению его режущих свойств. Эти свойства прежде всего определяются твердостью режущего инструмента, которая должна быть минимум в два раза выше твердости обрабатываемого материала. Появление в настоящее время новых высокопрочных сплавов и композиционных материалов требует внедрения новых, сверхтвердых инструментальных материалов, способных сохранять это соотношение твердости.

Прямое изменение твердости режущей кромки инструмента невозможно, поэтому приходится прибегать к измерению косвенных параметров, характеризующих эту величину. Вместе с тем высокая твердость режущего инструмента свойственна весьма хрупким материалам, применение которых в условиях динамического нагружения приводит к выкрашиванию и поломке режущей части. С учетом этого для металлообработки применяется большое количество инструментальных материалов, различные свойства которых должна воспринимать диагностическая система. Наиболее прочные инструментальные материалы имеют предел прочности на растяжение и изгиб в 1,5—2 раза ниже, чем на сжатие, а у сверхтвердых материалов это соотношение уменьшается до 3—4 раз. Для предотвращения поломки режущего инструмента необходимо тщательно выбирать геометрические параметры и режимы резания, чтобы возникающие в режу-

щей части напряжения не превысили максимально доступные.

Особенно важно при диагностике учитывать тот факт, что практически вся энергия, необходимая для процесса металлообработки, преобразуется в тепловую в необходимой контактной зоне режущей кромки. В связи с этим инструментальные материалы должны обладать высокой теплоемкостью. Каждый инструментальный материал имеет максимальную температуру, выше которой он теряет твердость, прочность и практически не может срезать обрабатываемый материал. Поэтому при диагностике следует следить, чтобы в процессе резания температуры инструментальных материалов изменились от 8 000 до 200—220 °С.

Зная теплопроводность инструментальных материалов, по данным диагностики можно создать условия для отвода теплоты от мест ее концентрации в глубь режущей части инструмента. В связи с тем, что сама теплопроводность изменяется по сложным зависимостям от температуры, отвод теплоты достигается или оптимизацией режимов резания, или применением смазочных охлаждающих технологических сред (СОТС) позволяющих уменьшить температуру благодаря охлаждению зоны обработки и снижению коэффициента трения на контактных поверхностях инструмента. Этот коэффициент имеет очень большое значение для диагностики и зависит от свойств контактирующих материалов, их химического родства и контактных нагрузок, определяемых условиями обработки. Высокие значения коэффициентов трения (0,8—0,9) вызывают интенсивный износ контактных поверхностей инструмента, поэтому одним из основных требований к инструментальным материалам является их высокая износостойкость. Диагностика износа режущего инструмента имеет решающее значение для металлообработки. Диагностируя интенсивность изнашивания, т. е. скорость износа, следует помнить, что она имеет экстремальный характер изменений в условиях металлообработки. Поэтому, варьируя условиями реализации процессов резания, можно обеспечить различную износостойкость инструмента.

Если с помощью режимов резания нельзя достигнуть заданной скорости износа, то следует заменить материал режущего инструмента, который изготавливают из инструментальных сталей, металлокерамики (твердые сплавы), минералокерамики и сверхтвердых материалов. Диагностику процесса металлообработки режущим

инструментом из углеродистых и низколегированных сталей (метчики, плашки и др.), которые имеют твердость HRC 62...65 и температуростойкость 220—240 °С, следует проводить, если скорость резания равна 10—20 м/мин. Из инструментальных сталей наиболее широкое применение нашли быстрорежущие стали, из которых изготавливается инструмент сложной формы и профиля. При металлообработке со скоростями 50—60 м/мин диагностике подлежат быстрорежущие стали, легированные вольфрамом, ванадием, кобальтом и работающие при температуре 620—640 °С. В последнее время быстрорежущие материалы, изготавливаемые порошковой металлургией, имеют износостойкость в 1,5—2 раза выше благодаря дополнительному легированию.

При повышении скорости резания температура режущей кромки достигает 950—1250 °С и твердость HRA 87...91. В этих условиях применяются твердые сплавы, основу которых составляют карбиды вольфрама и титана, а в ряде случаев — и тантала кобальта.

Для металлокерамики проводится диагностика выкрашивания и поломок пластин резцов, фрез, протяжек и т. д. Гораздо реже изготавливают цельнотвердосплавный мелкогабаритный инструмент. Диагностика минералокерамики и сверхтвердых инструментальных материалов сводится к контролю прочности режущей кромки, так как основой минералокерамики является корунд, который для повышения износостойкости добавляют в тугоплавкие соединения. Минералокерамика нашла применение при высоких скоростях резания 40—60 м/мин при чистовых видах обработки, где низкие динамические нагрузки.

К сверхтвердым материалам относятся синтетические композиты из нитрида бора и алмаза, а также естественные алмазы, которые являются рекордсменами твердости. Нитрид бора несколько уступает по твердости алмазу, но почти в 3 раза превосходит его по температуростойкости, достигая 1800 °С. Эти инструментальные материалы позволяют вести сверхскоростную обработку металлов при скоростях, составляющих несколько километров, в минуту. В этих условиях диагностика режущего инструмента имеет решающее значение.

В процессе металлообработки происходит интенсивный процесс деформирования срезаемого металла вплоть до разрушения у режущей кромки и образования двух новых поверхностей: одной — на обрабатываемой детали, другой — на внутренней поверхности стружки. При деформировании металла основная часть энергии затрачива-

ется на пластическое деформирование, характер протекания которого зависит от вида деформированного состояния (сжатия и сдвига). Всестороннее сжатие (или растяжение) не может произвести деформирование или разрушение металла до тех пор, пока не возникнет напряжение сдвига. Однако в зоне стружкообразования при трехстороннем деформировании напряжения неравномерны и всегда возникает напряжение сдвига, которое определяет деформацию, несущую основную информацию для диагностики стружкообразования. Энергетические затраты на деформирование металла определяются строением кристаллической решетки, достигающей 32 видов. Широко применяемые металлы и сплавы имеют три вида кристаллической решетки: гранецентрированная, гексогональная и объемноцентрированная. Пластическая деформация в кристаллической решетке проходит скольжением или двойникованием. При скольжении атомы кристалла, достигнув определенного напряжения, дискретно смещаются вдоль плоскости скольжения, а при двойниковании — первая часть кристалла смещается таким образом, что образует зеркальное отражение второй части.

Границу между деформированной и недеформированной зонами определяет линия прохождения дислокаций. По характеру прохождения дислокации разделяют на винтовые и краевые. Краевая дислокация может распространяться только в плоскости, в которой она находится, а винтовая — в любой плоскости. Реальная картина деформирования материалов включает возникновение и распространение дислокаций под действием напряжений. Этот процесс, проходящий одновременно в нескольких плоскостях, интенсифицируется микротрещинами, включениями и другими дефектами кристаллической решетки. Таким образом, при деформировании металла количество дислокаций резко возрастает и дальнейшее деформирование затрудняется, что вызывает упрочнение металла. Прохождение дислокаций зависит от вида напряженного состояния и распространение их вызывает физические явления, по которым можно вести диагностику процесса металлообработки.

Широко применяется исследование деформаций с помощью делительной сетки размерами 0,05—0,15 мм, наносимой на боковую поверхность обрабатываемого образца. Искажение сетки изучают на корнях стружки, получаемых при мгновенной остановке процесса резания. Распределение деформации также определяется измерением микротвердости металлографическим, рентгено-

графическим и поляризационно-оптическим методами. В зависимости от условий процесса резания и свойств обрабатываемого материала процесс деформирования происходит по-разному, что приводит к возникновению стружек скалывания (рис. 4, а), сливной (рис. 4, б) и надлома (рис. 4, в). В результате касания детали вершиной резца развивается пластическая деформация через весь срезаемый слой. В зоне перед передней гранью OB развивается сжимающее напряжение, а за ней — растягивающее. Зона пластической деформации разделяется на первичную, возникающую перед резцом, и вторичную, лежащую на передней поверхности режущей части.

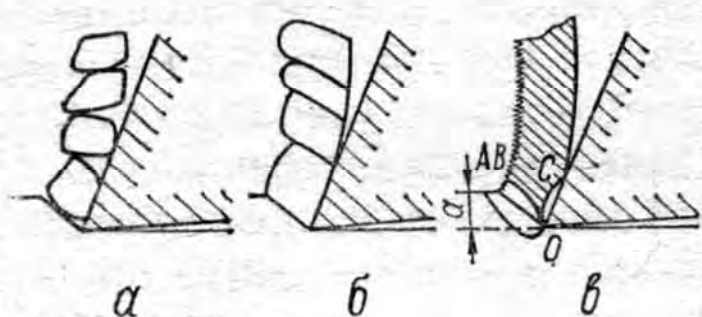


Рис. 4. Схема процесса стружкообразования

Первичная зона деформации имеет клинообразную форму с нижней вогнутой стороной и верхней выпуклой. Металл, проходя через зону деформации с высокой скоростью, достигает высоких скоростей деформирования $10\,000\text{--}20\,000\text{ с}^{-1}$, что приводит к возникновению физических явлений, регистрация которых является основой диагностики металлообработки.

Практически металл не расширяется, что приводит к деформированию сдвига в первичной зоне. Вся зона состоит из поверхностей сдвига, напряжение которых равно пределу текучести металла на сдвиг. Заканчивается деформирование у верхней выпуклой границы, где металл упрочняется и уходит в стружку.

Вследствие высоких контактных напряжений на поверхностях инструмента образуется вторичная зона деформаций. Протяженность этой зоны в среднем распространяется до середины длины контакта, а толщина ее составляет не более 10% глубины снимаемого слоя. Размеры вторичной зоны определяются с учетом трения на контактных поверхностях. В этой зоне степень деформации материала более, чем на порядок превышает деформацию в первичной зоне.

В определенных условиях резания вторичная зона начинает интенсивно развиваться, образуя нарост на вершине режущей кромки. Нарост представляет собой сильно деформированную часть срезаемого материала клиновидной формы, плотно адгезионно соединенного с режущей кромкой, но периодически срывающегося стружкой.

Нарост при этом плотно прикрывает режущую кромку и режет металл. В этом случае пластическая деформация металла определяется соотношением геометрических размеров срезаемого слоя со стружкой, которое принято называть усадкой стружки. В инженерных расчетах применяется коэффициент усадки стружки, рассчитываемый как отношение длины срезаемого слоя l_1 к длине стружки l_2 : $K = l_1/l_2$. Этот коэффициент может определяться весовым методом.

Процесс резания металлов требует больших энергетических затрат, которые вызывают интенсивные динамические нагрузки, тепловые и электромагнитные явления, совокупность которых определяет износ инструмента, эффективность обработки и качество деталей.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТ ПРИ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ

Общие затраты энергии при резании металлов в 8—10 раз превосходят затраты на полезную работу формирования новой поверхности. Эти затраты энергии в первую очередь связаны со значительными силами резания, необходимыми для срезания припуска.

Силы резания складываются из усилий преодоления сопротивления пластическому деформированию, разрушения металла у режущей кромки, трения режущих кромок о стружку и обрабатываемую поверхность, дополнительного изгиба и ломания стружки.

При свободном резании на переднюю поверхность резца со стороны срезаемого слоя действует сила R (рис. 5), которая может быть разложена на две составляющие: нормальную к передней поверхности N и касательную F . Сила F является силой трения, возникающего при движении стружки по передней поверхности, и может быть выражена как $F = N\mu_T$, где μ_T — коэффициент трения.

На заднюю поверхность резца действует сила R_1 , вызываемая, в основном, упругим восстановлением

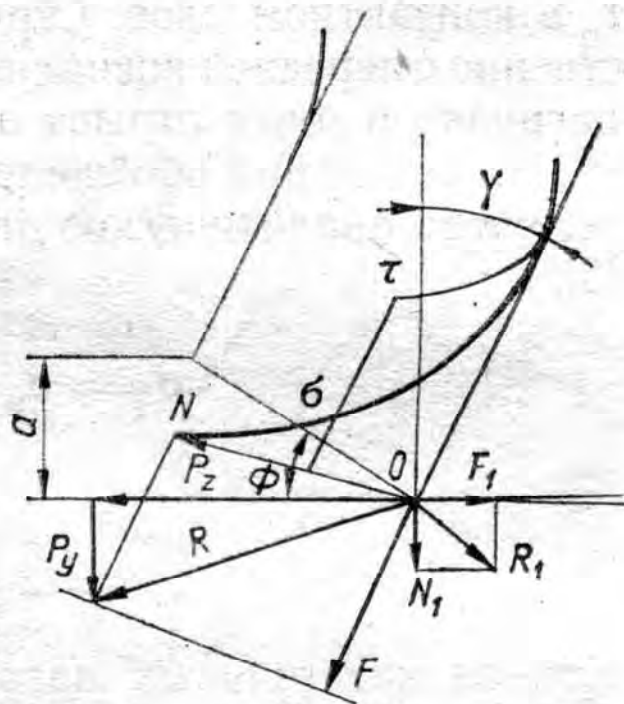


Рис. 5. Схема распределения контактных нагрузок

металла, которая, в свою очередь, может быть разложена на две составляющие N_1 и F_1 . Силы, действующие на передней грани инструмента, во много раз больше, чем на задней, и поэтому они определяют его прочность. В то же время износ задней грани является главной причиной затупления инструмента. Силы, действующие на ее поверхности, влияют на интенсивность процесса износа. Для указанных явлений большое значение имеет распределение сил резания в виде контактных нагрузок инструмента. Экспериментальные исследования, проведенные с помощью голографических, поляризационно-оптических устройств, а также разрезных резцов, показали большую неравномерность распределения нагрузки вдоль контактных поверхностей. Нормальные контактные нагрузки в точке срыва стружки от инструмента равны нулю, а по мере приближения к режущей кромке нарастают сначала медленно, затем быстро достигают максимума у режущей кромки. Касательные контактные нагрузки вблизи режущей кромки постоянны, так как движение металла идет не по передней грани, а по заторможенному слою и сопротивление движению стружки определяется внутренним трением, которое равно сопротивлению сдвига τ_s в контактном слое. Стружка, контактируя непосредственно с передней поверхностью, уменьшает касательные нагрузки в точке отрыва от нуля.

На основании обобщения экспериментальных данных получено аналитическое описание нормальных нагрузок [3]:

$$\sigma_N = \sigma_m \left(\frac{l_0 - x}{l_0} \right)^n,$$

где

$$\sigma_m = q_N (n + 1); \quad n = 2 \left\{ \frac{l_0}{ak [\mu_T + \operatorname{tg}(\Phi - \gamma)]} - 1 \right\}.$$

Кривая касательных нагрузок, имеющая два участка, описывается на первом участке равенством $\tau_F = \tau_s$, а на втором — выражением

$$\tau_F = \tau_s x^n (l_0 - l_n)^{-1}.$$

Контактные нагрузки на задней грани в несколько раз меньше, чем на передней и имеют максимум на одной трети длины контакта. На характер распределения контактных нагрузок слабо влияют СОТС. Значение контактных нагрузок и их распределение определяют размер и направление результирующей силы резания.

Для удобства расчета сила резания рассматривается состоящей из трех составляющих в декартовой системе координат (рис. 6): $R = \sqrt{P_z^2 + P_y^2 + P_x^2}$. Соотношение между этими составляющими неравномерно и зависит от геометрических параметров режущей части: наибольшей является P_z , наименьшей — P_x . В процессе износа инструмента все составляющие силы резания возрастают, но более интенсивно растут P_y и P_x . Для решения задач прогнозирования процесса металлообработки с достаточной точностью можно производить расчет силы резания P_z по зависимости [3]: $P_z = e\tau_s f_n$, где

$$e = \frac{(1 + f_1) \cos \gamma + 2f_1 \sin \gamma}{\sin \Phi [(1 - f_1 f_2) \cos (\gamma - \Phi) + (f_1 + f_2) \sin (\gamma - \Phi)]};$$

f_n — площадь поперечного сечения срезаемого слоя; f_1 и f_2 — коэффициенты внешнего и внутреннего трения; γ — передний угол; Φ — угол сдвига.

Более точно рассчитываются силы резания при использовании эмпирических формул:

$$P_z = C_{Pz} S^{yP} t^{xP} v^{mP} \text{HB}^{zP};$$

$$P_y = C_{Py} S^{yP} t^{xP} v^{mP} \text{HB}^{zP};$$

$$P_x = C_{Px} S^{yP} t^{xP} v^{mP} \text{HB}^{zP},$$

где S — подача; t — глубина резания; v — скорость резания; HB — твердость материала; C_{Pz} , C_{Py} , C_{Px} — коэффициенты, определяемые условиями обработки; x_P , y_P , z_P , m_P — показатели степени.

Анализ полученных формул показывает, что глубина резания и ширина срезаемого слоя больше влияют на силу резания, чем подача и толщина срезаемого слоя, так как с ростом ширины среза деформация не меняется, а с ростом толщины среза — меняется.

Увеличение скорости резания изменяет коэффициент усадки стружки и снижает силу резания. У металлов, склонных к наростообразованию, возникает значительное уменьшение сил резания в зоне скоростей интенсивного наростообразования. Это связано с тем, что при росте нароста увеличивается передний угол, что уменьшает

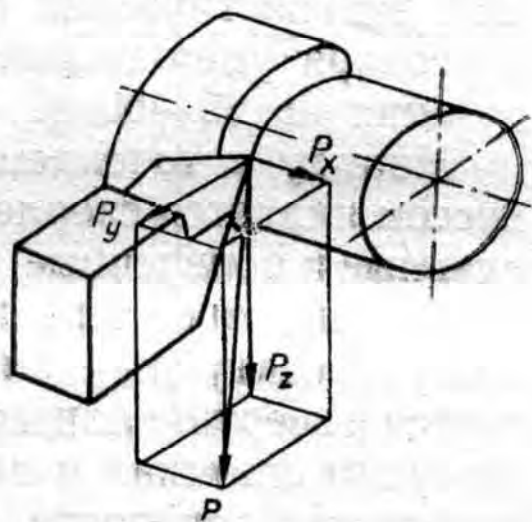


Рис. 6. Составляющие сил резания

деформацию. Из геометрических параметров режущего инструмента наибольшее влияние оказывает передний угол γ , сильно изменяющий P_z . Задний угол α значительно меньше влияет на силу резания, так как задняя поверхность не участвует в стружкообразовании. Угол $\alpha \approx 8...10^\circ$ практически не влияет на силу резания. Рост угла наклона режущей части поворачивает переднюю поверхность режущего инструмента, увеличивая ее длину, и тем самым вызывает рост составляющих P_z и P_y и снижение P_x .

Аналогично главный угол в плане ϕ поворачивает режущую кромку, изменяя при этом толщину и ширину среза. При этом сильно зависят от ϕ составляющие P_y и P_x : с ростом ϕ составляющая P_y уменьшается, а P_x увеличивается.

При резании стали 20Х, имеющей предел прочности 51 кг/мм², сила резания P_z выше, чем при обработке титанового сплава ВТ3, имеющего предел прочности 103 кг/мм², а титановый сплав ВТ2, имеющий предел прочности 61 кг/мм², имеет при резании равные силы P_z со сплавом ВТ3. С ростом механических свойств уменьшается пластическая деформация, но при этом растут напряжения, необходимые для ее протекания. Поэтому в зависимости от конкретных условий обработки с ростом механических свойств обрабатываемого материала усилия резания могут возрастать или уменьшаться, что требует значительного расширения функциональных возможностей диагностических систем. При использовании СОТС благодаря уменьшению сил трения снижаются усилия резания на 25—50 %.

Наряду с точением широко распространенным процессом является сверление. Спиральное сверло имеет две главные и поперечные режущие кромки, которые, срезая материал в отверстии, приводят к осевой силе P_o , крутящему моменту $M_{кр}$ (рис. 7). Осевая сила сверла складывается из вертикальных составляющих усилий на главных режущих кромках и перемычке, а крутящий момент определяется горизонтальными составляющими и точками их приложения. Момент $M_{кр}$ увеличивается за счет трения ленточек сверла и стружки о стенки обрабатываемого отверстия. Осевая сила в равной степени зависит от усилий на главных и поперечной режущих кромках, а крутящий момент в основном определяется силами главных режущих кромок. В связи с тем что передний угол сверла главных режущих кромок определяется углом наклона винтовых ω канавок, то при уменьшении угла увеличи-

вается как осевая сила, так и крутящий момент. Изменение угла 2φ приводит к изменению толщины и ширины среза, в результате с ростом 2φ момент $M_{кр}$ уменьшается, а P_o увеличивается. При изменении угла наклона перемычки сверла ψ_n уменьшается длина поперечной режущей кромки и главных режущих кромок. В результате этого сила P_o непрерывно увеличивается с ростом ψ_n , а крутящий момент имеет минимальное значение при $\psi_n = 50...55^\circ$. Расчетные значения сил резания при сверлении могут быть представлены в виде

$$P_o = C_{p_o} D S^{0,75}; \quad M_{кр} = C_M D^2 S^{0,8},$$

где C_{p_o} и C_M — коэффициенты, учитывающие условия обработки.

Особенно важна диагностика процесса нарезания резьб метчиками вследствие понижения прочности металла продольными канавками. Крутящий момент растет непрерывно по параболическому закону с момента врезания метчика, достигая максимума тогда, когда

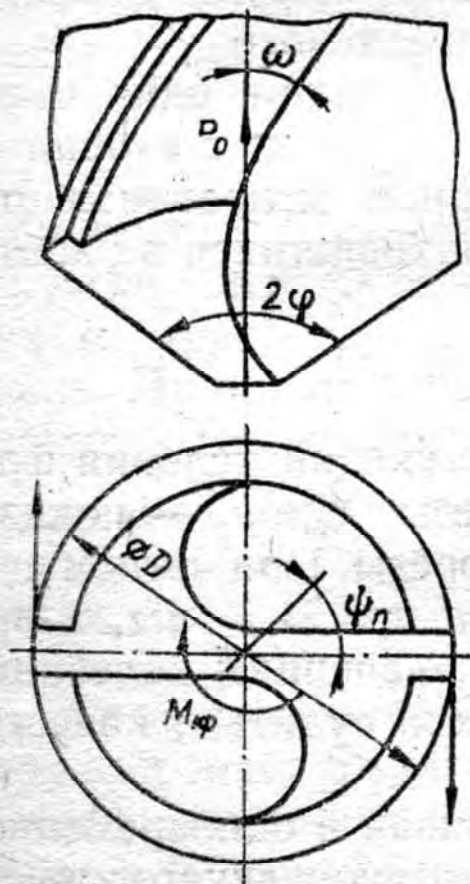


Рис. 7. Силы резания при сверлении

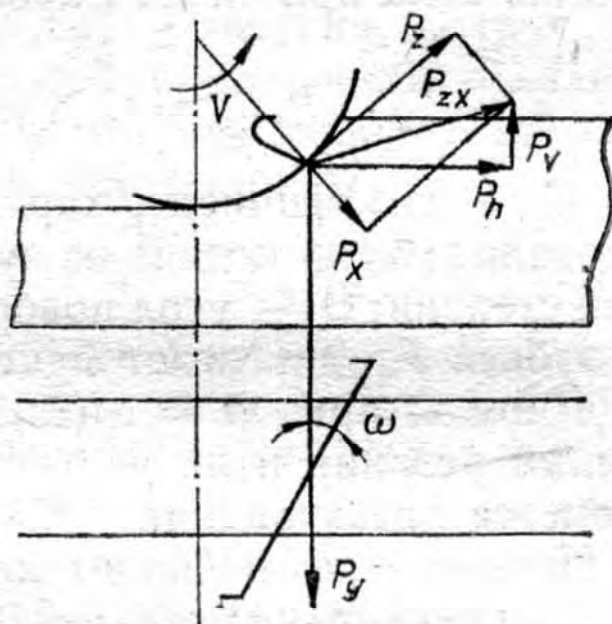


Рис. 8. Силы резания при фрезеровании

вся режущая часть входит в отверстие. Крутящий момент при нарезании резьбы метчиками различных типов определяется по формулам, аналогичным сверлению. При цилиндрическом фрезеровании из-за переменной толщины среза и угла поворота фрезы усилие резания изменяется как по величине, так и по направлению. Зуб фрезы может работать с нулевой до максимальной глубины резания при встречном или попутном фрезеровании (рис. 8). Суммарная сила P , действующая на фрезу и ее

оправу, раскладывается на радиальную P_y и касательную P_z , составляющие, а в случае наклона зубьев фрезы возникает и осевая сила P_x . Наклон зубьев создается для уменьшения колебаний усилий резания, вызванных периодичностью работы зубьев фрезы. Равномерность работы достигается при одновременной работе нескольких зубьев, обеспечивающих постоянство срезаемого слоя независимо от угла поворота фрезы. Это условие может быть записано в виде $\text{ctg } \omega = z t_o / (\pi D)$, где ω — угол наклона зуба фрезы; z — число зубьев фрезы; t_o — осевой шаг фрезы; D — диаметр фрезы.

Компенсация осевой силы достигается установкой на оправку двух фрез, имеющих противоположный наклон зубьев.

При невыполнении условия неравномерности возникают периодические динамические нагрузки на станок и фрезу, диагностика которых позволяет выявить отклонение процесса фрезерования от оптимального.

Аналогично при торцевом фрезеровании одна половина фрезы работает в условиях попутного, а вторая — встречного фрезерования. Суммарная мгновенная окружная сила при числе z зубьев, находящихся в работе,

$$P_{z\text{сум}} = C_p S_z^x p t^y p \sum_1^z \sin^{x_p} \Theta,$$

где C_p — коэффициент, характеризующий условия фрезерования; S_z — подача на зуб фрезы; x_p и y_p — показатели степени; Θ — угол поворота фрезы. При четном числе зубьев P_z достигает максимума при $\Theta = \pi/z$, а при нечетном — при $\Theta = \pi/(2z)$. По значениям колебания усилий резания и их частоты можно судить о качестве процесса фрезерования.

Процесс протягивания тоже связан с одновременной работой нескольких зубьев. Для протяжек двустороннего резания или имеющих зубья, расположенные друг против друга (для обработки отверстий), нормальные силы действуют симметрично и уравниваются. Главные энергетические затраты при протягивании приходятся на силу, противоположную движению протяжки. Наличие стружкоотделительных канавок на режущей части протяжек практически не изменяет усилия протягивания, так как условия деформирования сохраняются постоянными.

Суммарная сила резания при протягивании

$$P_{z\text{сум}} = C_p S_z^x p b_m,$$

где C_p — коэффициент, зависящий от условий протягивания; S_2 — подача на зуб; b — рабочая длина режущей кромки; x_p — показатель степени; m — число одновременно работающих зубьев.

Изменения режимов резания и геометрических параметров режущего инструмента создает различное распределение энергии в зоне резания. С помощью поэлементного анализа энергетических затрат в конкретных условиях обработки намечаются пути диагностики и управления этим процессом. Общее количество энергии, затрачиваемой при резании, определяется из выражения

$$E = E_0 + E_{ин} + E_{п} + E_{из},$$

где E_0 — энергия, затрачиваемая на деформацию металла, включая работу трения на гранях инструмента; $E_{ин}$ — энергия, эквивалентная работе инерционных сил; $E_{п}$ — потенциальная энергия, определяемая положением массы металла; $E_{из}$ — энергия излучения в окружающую среду. Энергия деформации металла

$$E_0 = E_{п.д} + E_{т.п} + E_{т.з}, \quad (3)$$

где $E_{п.д}$ — энергия, затрачиваемая на пластическую деформацию; $E_{т.п}$ — энергия, затрачиваемая на трение стружки о переднюю грань; $E_{т.з}$ — энергия, затрачиваемая на трение обрабатываемой поверхности о заднюю грань. Принимая во внимание только энергию, затрачиваемую на пластическую деформацию, записываем

$E_{п.д} = \iiint_V \sigma_i \epsilon_i dV$, где σ_i и ϵ_i — интенсивность напряжений и деформаций; V — объем деформированного металла.

Эта энергия распределяется неравномерно по толщине стружки (рис. 9). Чем ближе к прирезцовой поверхности слой снимаемого металла, тем больше затраты энергии на его деформирование. Неравномерно распределением энергии и по ширине зоны деформации. Хотя максимум энергии деформирования находится посередине зоны, у ее границы, энергетические затраты весьма малы. Удельная энергия, эквивалентная работе сил трения на передней грани, зависит от пластической и упругой составляющих:

$$E_{т.п} = \left[\int_0^{l_n} \tau_s b v_c dl + \int_{l_n}^{l_{yn}} \tau_s b \frac{1}{n+1} v_c dl \right] l / (abu), \text{ или}$$

$$E_{т.п} = \frac{(l_n + n l_{yn}) \tau_s b v_c}{(n+1) abu}. \quad (4)$$

При изменении скорости резания v (4) несмотря на более интенсивное увеличение длины l контакта пластической зоны $E_{п.д}$ растет медленнее $E_{т.п}$. Это можно объяснить увеличением скорости движения стружки v_c . При уменьшении переднего угла сильно возрастает энергия $E_{п.д}$, но выделяемая при этом тепловая энергия снижает энергетические затраты на трение и удельную нагрузку передней грани $E_{т.п}$. Поэтому для обработки хрупких материалов подбираются инструменты, передние

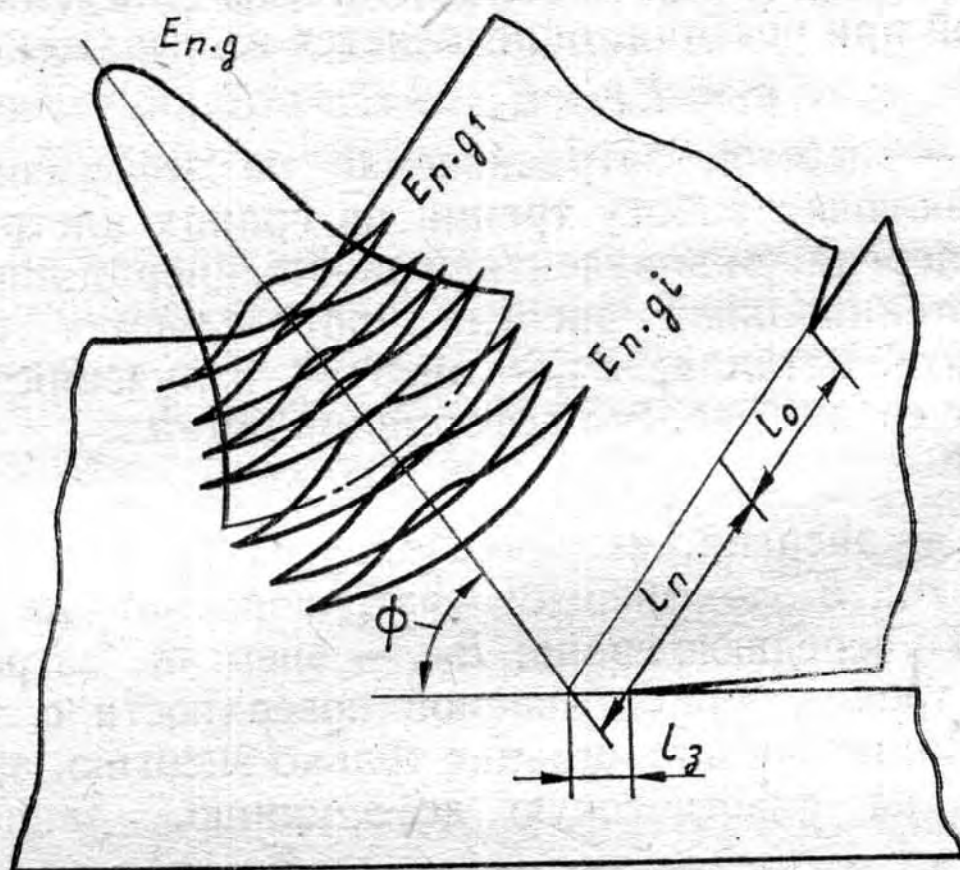


Рис. 9. Схема распределения энергии пластической деформации в зоне стружкообразования

углы которых меньше, чем для обработки пластических материалов.

Энергия, эквивалентная работе сил трения на задней грани, намного меньше, чем на передней, но концентрация ее на небольшом участке задней грани приводит к значительному износу инструмента. Исследования показывают, что на задней грани в основном наблюдается упругий

контакт, поэтому $E_{т.з} = \left[\int_0^{l_3} \tau_3 b v d l \right] 1 / (a b v)$, где τ_3 — касательное

напряжение на задней грани, закон распределения которого можно принять таким же, как и на участке упругого контакта передней грани. Энергия определяется инерционными усилиями $E = \iiint_V \omega \rho dV$, где ω — ус-

корение металла в зоне резания; ρ — плотность материа-

ла. Если рассматривать резание как процесс деформирования в единой плоскости сдвига ω и соответственно $E_{ин}$ становится бесконечно большими. Однако в условиях обычного резания ($v < 500$ м/мин) $E_{ин}$ составляет не более 1 % общих затрат энергии, так как деформация происходит в зоне, ширина которой соизмерима с глубиной. Расчеты показывают, что не всегда $E_{ин}$ является пренебрежимо малой. В условиях сверхскоростного резания, получившего все более широкое применение благодаря появлению станков с частотой вращения шпинделя $n = 20\ 000 \dots 70\ 000$ мин⁻¹, $E_{ин}$ может превышать в несколько раз энергию деформирования. Такой рост $E_{ин}$ объясняется не только высокими динамическими параметрами процесса сверхскоростного резания, но и значительным уменьшением ширины зоны резания с ростом скорости резания.

Потенциальная энергия изменения положения массы срезаемого металла $E_{п}$ при снятии толстых стружек может быть большой по абсолютному значению, но по отношению к общему количеству затрачиваемой энергии и особенно для чистовой обработки она пренебрежимо мала. Энергия, излучаемая в окружающую среду, в основном расходуется на теплоотдачу, которая зависит от двух процессов: радиации и конвекции. При обработке без применения СОТС распределение плотности энергии излучения по спектру длин волн или частоте устанавливается законом Планка, так как одно- и двухатомные реальные газы, окружающие зону резания, обладают малым тепловым поглощением. При подводе смазочно-охлаждающих технологических сред, особенно на водной основе, теплоотдача возрастает в десятки раз.

Основная часть энергозатрат приходится на деформирование материала: работа трения на передней поверхности в среднем не превышает 0,3...0,35, а на задней — 0,05...0,1 работы резания.

Важным параметром процесса резания является удельная энергоемкость, которая характеризует энергозатраты в единице объема удаляемого материала: $e = N_e / (Stv)$, где N_e — эффективная мощность процесса резания.

Эффективная мощность складывается из мощностей, затрачиваемых на движение заготовки и инструмента: $N_e = N_{ez} + N_{ex}$.

Для процесса точения $N_{ez} = 60P_2v$; $N_{ex} = P_x Sv / (\pi D)$. Составляющая N_{ex} во много раз меньше N_{ez} , поэтому с высокой точностью можно рассчитывать

эффективную мощность процесса резания только по составляющей N_{ez} , т. е. $N_e = N_{ez}$.

При определении мощности двигателя металлорежущего станка следует учесть, что коэффициент полезного действия цепи станка $\eta < 1$ и, следовательно, требуемая мощность двигателя выше, чем N_e .

Так как процесс стружкообразования дискретен, то и затраты мощности характеризуются постоянной средней и переменной составляющими. Характер изменения

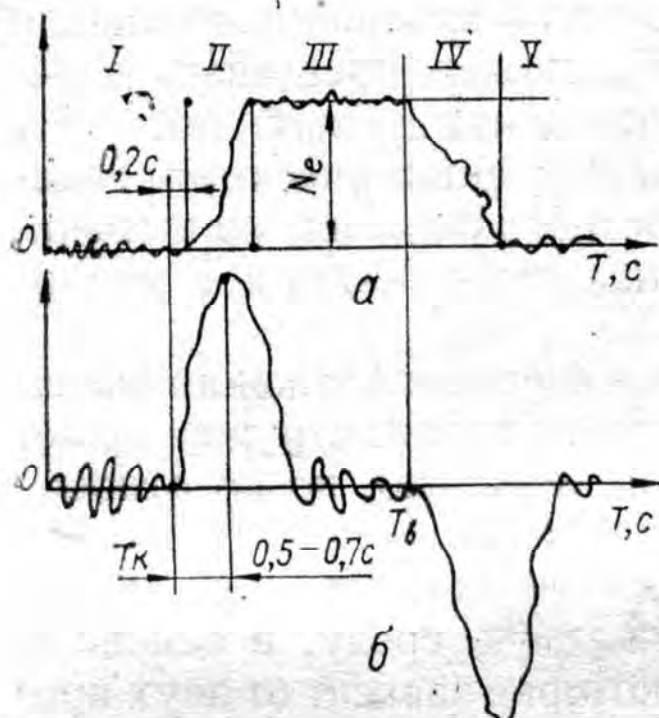


Рис. 10. Кривые изменения переменной (а) и постоянной (б) составляющей мощности при точении

уровня сигналов переменной составляющей мощности при врезании и выходе инструмента из заготовки показан на рис. 10, а, а постоянной — на рис. 10, б. Участки кривых I и V соответствуют работе станка на холостом ходу, а II и IV отражают изменение уровня сигналов соответственно при врезании инструмента в заготовку и его выходе. Участок III характеризует непосредственно процесс резания металлов. Амплитуда и форма всплесков сигналов переменной составляющей мощности при

врезании и выходе инструмента из заготовки почти аналогичны, с той лишь разницей, что их отклонение происходит в противоположные стороны. Анализ энергозатрат показывает, что при расчетах необходимо учитывать как переменную, так и постоянную составляющие эффективной мощности. График зависимости энергозатрат от условий обработки изделия [показан на рис. 11. Оптимизируя условия обработки, можем уменьшить энергозатраты на 20—30 % без снижения ее производительности.

3. ТЕПЛОВЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ

Экспериментально установлено [17], что более 99,5 % энергии в процессе резания металлов переходит в теплоту и расходуется на разрушение. Поэтому нагрев играет важную роль при резании металлов, приводя к сложным и неоднозначным зависимостям между температурным

полям и параметрами резания. Так, уменьшение износа режущего инструмента достигается в одних случаях при предварительном нагреве металла, а в других — при использовании СОТС, снижающих температуру.

Основными источниками нагрева являются деформация материала в зоне стружкообразования, трение на передней и задней поверхностях. На основании этого количество теплоты, выделяемой при металлообработке:

$$Q = Q_d + Q_{т.п} + Q_{т.з},$$

где Q_d , $Q_{т.п}$, $Q_{т.з}$ — количество теплоты, выделяемой

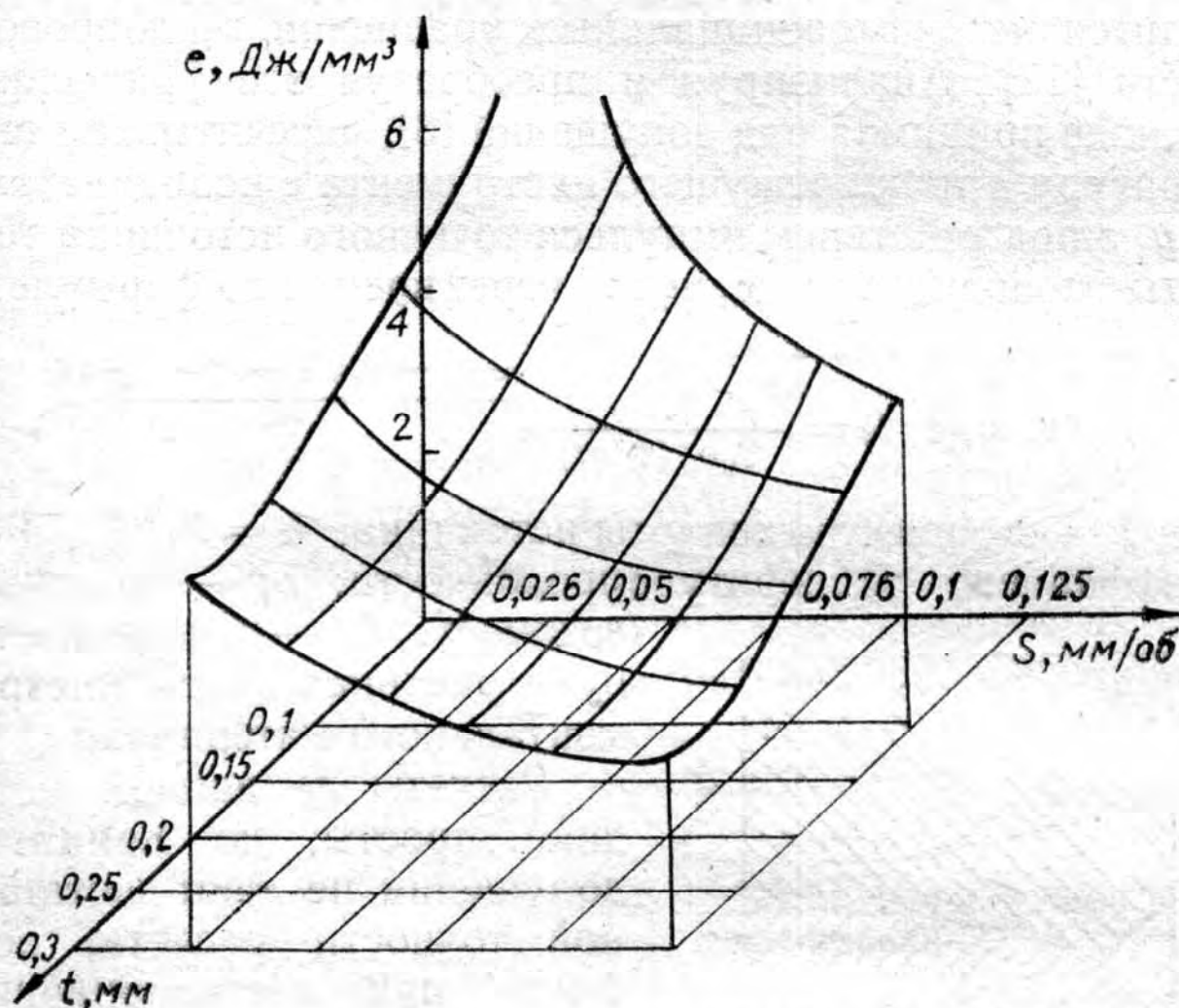


Рис. 11. Зависимость удельной энергоёмкости e от подачи S и глубины резания t при точении стали 45

соответственно при деформации материалов и трении на передней и задней поверхностях.

Отвод теплоты из зоны происходит вместе со стружкой q_c . Часть тепла уходит в глубь режущей части инструмента q_p и обрабатываемой заготовки q_z . Значительная часть тепла уходит в окружающую среду q_n . Таким образом, тепловой баланс может быть выражен уравнением $Q_d + Q_{т.п} + Q_{т.з} = q_c + q_p + q_z + q_n$. На рис. 12 показана диаграмма теплового баланса Q в зоне резания при изменении скорости точения конструкционной углеродистой стали 45, когда $Q_d = 75...76\%$; $Q_{т.п} = 19...23\%$ и $Q_{т.з} = 2...3\%$. Большие значения $Q_{т.п}$ и $Q_{т.з}$ соот-

ветствуют более высоким скоростям резания. Отвод теплоты из зоны стружкообразования происходит с большим относительным перераспределением. Так, стружка с ростом скорости резания уносит при низких скоростях 68 %, а при высоких до 75 % теплоты. Доля теплоты, отводимой в тело резца, уменьшается в 2,5 раза, а в заготовку — увеличивается в 3 раза.

Доля теплоты, отводимой в окружающую среду, уменьшается при низких скоростях резания до 24—25 %, при высоких — до 9 %. Температура некоторой точки тела с координатами x, y, z в любой момент времени находится из дифференциальных уравнений теплопроводности [17]. Анализируя и преобразуя эти уравнения, а также принимая ряд допущений [3], рассчитываем температуру в точке режущего инструмента с координатами x, y, z под действием импульса точечного источника теплоты с координатами x_n, y_n, z_n через время t по формуле

$$T_{\text{точ}}(x, y, z, t) = \frac{Q}{C_p \rho_0 (4\pi a t)} e^{-\frac{(x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 + (z_n - z)^2}{4at}},$$

где Q — количество теплоты источника; $a = \lambda_T / (C_p \rho_0)$ — коэффициент температуропроводности; λ_T — теплопроводность; C_p — теплоемкость; ρ_0 — удельная масса инструментального материала.

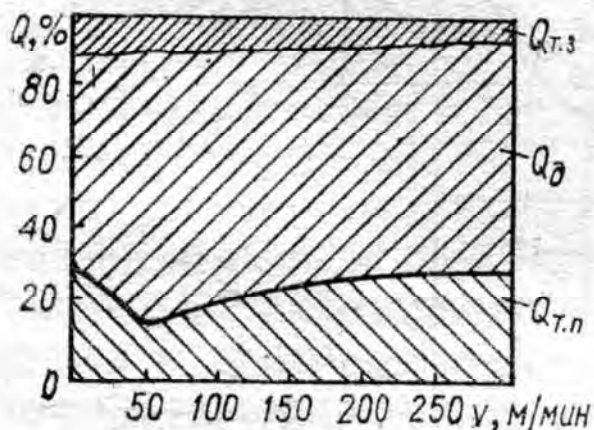


Рис. 12. Диаграмма теплового баланса при изменении скорости резания

Расчеты по данной методике просты, но принятые допущения не дают достаточной точности расчета, особенно при нестационарных условиях обработки. Поэтому в настоящее время получили развитие численные методы расчета температурных полей зоны стружкообразования.

При данном расчете учитываются деформация металла, которая наблюдается во всем объеме стружкообразования с различной скоростью как внутри зоны, так и на поверхностях трения; изменение теплофизических свойств, конвекционного и радиационного обмена с окружающей средой; неравномерность термосопротивления и контактных нагрузок на гранях инструмента; особенности теплообмена при возникновении нароста. Температура точки зоны резания с координатами x, y, z в любой момент времени определяется уравнением теп-

лопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[a \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[a \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[a \frac{\partial T}{\partial z} \right] -$$

$$- v_x \frac{\partial T}{\partial x} - v_y \frac{\partial T}{\partial y} - v_z \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{Q}{C\rho},$$

где v_x , v_y и v_z — проекции вектора скорости, перемещающегося источника теплоты по осям x , y , z соответственно.

Для решения данной задачи численными методами конечных разностей или конечных элементов вся зона резания разбивается на

2 000—5 000 неравномерных элементов в виде тетраэдров. С помощью программы, разработанной в Киевском политехническом институте, рассчитываются все необходимые данные, исходя из данных процесса стружкообразования и теплофизических свойств материалов, а затем дается распечатка температурного поля в любом сечении зоны резания и на любой грани режущего инструмента. Высокая точность расчета и малое время, необходимое для

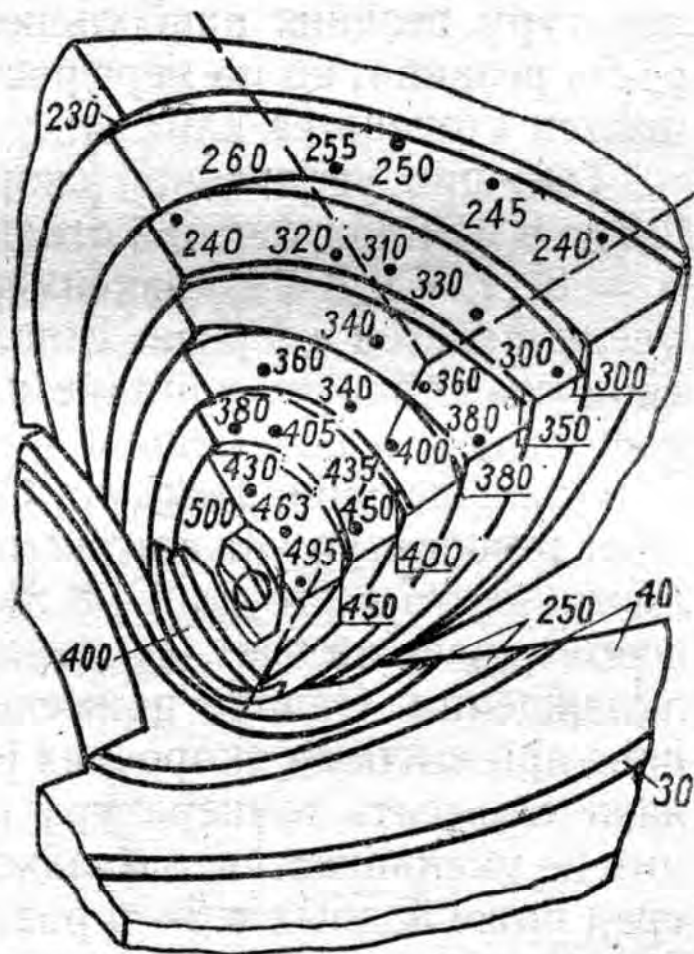


Рис. 13. Распределение температуры в зоне резания

расчета от 3 000 до 7 500 линейных алгебраических уравнений, обеспечивались применением вариационно-градиентного метода. Максимальная температура в зоне резания 500 °С (рис. 13) достигается на передней поверхности режущего инструмента в середине контактной зоны. Температура режущей кромки на 65—75 % определяется энергией деформации металла, поэтому процесс наростообразования во многом зависит от деформации материала. Температура на контактных поверхностях более, чем на 3/4 определяется тепловыми источниками трения и контактными пластическими деформациями. Поэтому для снижения контактных температур необходимо уменьшать касательные контактные нагрузки, наиболее эффективно достигаемые с помощью покрытий и пленок, создаваемых на контактных поверхностях различными видами СОТС.

Измерение температуры в зоне резания производится с помощью термопар, в качестве которых применяют искусственные типа хромель-алюмель, полусинтетические, когда в качестве одного из термоэлектродов используют инструментальный или обрабатываемый материал, и естественные термопары, образованные обрабатываемым и инструментальным материалом. Широко применяют для измерения температуры бесконтактные радиационные методы, основанные на использовании фотоэлектрических элементов и тепловидения. На температуру резания наибольшее влияние оказывает скорость резания, но по мере роста (свыше 150 м/мин) уменьшается степень ее влияния.

Так, при увеличении скорости резания в 10 раз (от 0,3 до 3 м/с) при точении стали ШХ-15 (Т14К8; $\gamma = 10^\circ$; $\alpha = 8^\circ$; $t = 0,3$ мм) максимальная температура резания увеличивается в 3 раза. В полтора-два раза меньше, чем скорость резания, влияние на рост температуры оказывает подача и еще меньше — глубина резания.

Охлаждающие действия СОТС на водной основе снижает температуру на контактных поверхностях режущего инструмента всего на 5—8 %, т. е. температура прежде всего падает на счет снижения сил трения, а не за счет охлаждения. Однако применение СОТС на масляной основе при высоких скоростях резания (более 2 м/с) может даже повысить температуру резания, так как силы трения не уменьшаются, а охлаждающие свойства этого вида сред ниже водных в 3—6 раз. Большое значение для эффективности процесса металлообработки имеет характер изменения температурного поля в переходных процессах: при врезании и холостом ходе. Температура на передней грани резца из Т14К8 достигает 85—90 % максимального значения 700 °С при обработке конструкционных сталей со скоростями 1,5—2 м/с уже через 0,001—0,05 с (рис. 14, а), а через 1—2 с температурное поле стабилизируется и температура достигает 750 °С (рис. 14, б). На задней грани температура достигает 85—90 % максимального значения через 0,01—0,02 с, так как здесь действуют менее мощные тепловые источники и происходит сильный теплоотвод в тело обрабатываемой заготовки, в зоне у вершины резца 90 % — через десятые доли секунды. Во всей режущей части инструмента процесс нагрева измеряется минутами. Таким образом, при переходных процессах можно получить очень важную информацию о характере металлообработки. При увеличении теплопроводности инструментальных материалов контактные

температуры при врезании резца изменяются более плавно, увеличивая время на их стабилизацию пропорционально увеличению теплопроводности. В то же время в режущей части инструмента стабилизация температуры ускоряется.

Обработка сплавов с низкой теплопроводностью резко повышает интенсивность нагрева. Так, при точении жаропрочных и нержавеющей сталей даже при низких скоростях резания скорость роста температуры в контактной

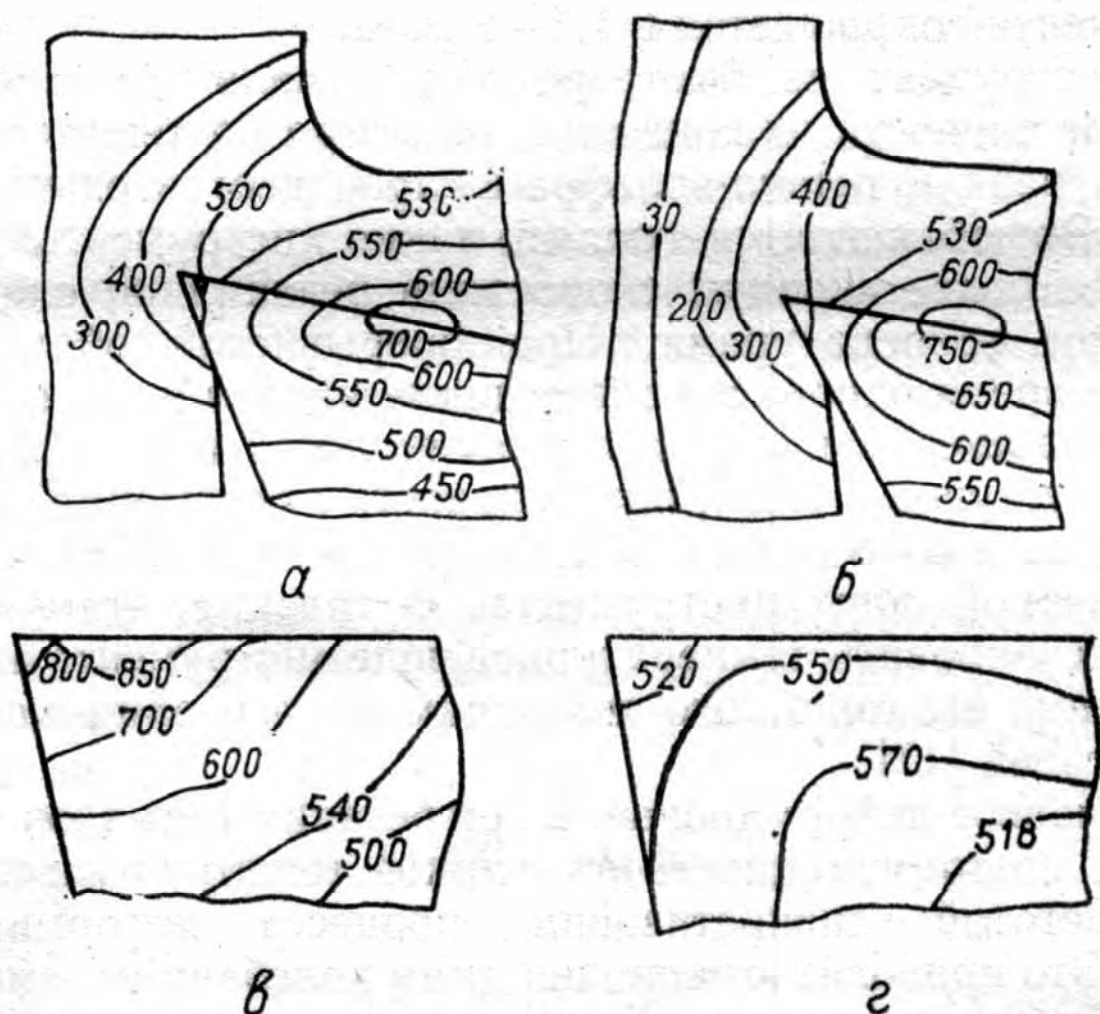


Рис. 14. Изменение температурного поля при врезании (а, б) и при охлаждении (в, г) режущего инструмента

зоне при врезании режущего инструмента достигает $2 \cdot 10^5$ град/с.

При выходе инструмента из заготовки наступает быстрое его охлаждение (рис. 14, в), ускоренное действием СОТС. Особенно высокий коэффициент теплоотдачи имеют СОТС на водной основе. При охлаждении резца на воздухе при обточке шарикоподшипниковой стали ШХ-15 при скорости 90 м/мин температура режущей части изменяется от 850—800 до 100—150 °С в течение 40—50 с (рис. 14, г). Если резец обдувать струей воздуха, то время охлаждения уменьшается в 2 раза благодаря тому, что коэффициент теплоотдачи увеличивается в 3 раза. Еще более интенсивное охлаждение получается при поливе СОТС. При применении СОТС на масляной основе

температура режущей части становится равной 100—150 °С уже через 8 с, а при применении СОТС на водной основе скорость охлаждения достигает $(5-9) \cdot 10^4$ град/с и охлаждение происходит за 1—2 с.

Уменьшение скорости резания, как показано выше, приводит к снижению температуры резания, а следовательно, и к снижению скорости охлаждения инструмента, пропорциональной снижению скорости резания. При увеличении теплопроводности материала режущего инструмента вдвое время охлаждения режущей части инструмента сокращается в 1,3—2 раза.

Инструмент из быстрорежущей стали имеет более низкие скорости охлаждения, несмотря на теплопроводность, равную титано-вольфрамокарбидным твердым сплавам. Это объясняется тем, что такие инструменты работают с более низкими скоростями резания и, следовательно, температурами. При прерывистой обработке, когда время одного рабочего цикла инструмента меньше 0,1 с (фрезерование или строгание узких полос, обточивание уступов и т. д.), интенсивность охлаждения увеличивается в 5—8 раз из-за периодичности нагрева только контактной зоны инструмента. В связи с этим чтобы стабилизировать температурное поле инструмента иногда во время его холостого хода применяют различные виды подогрева [17].

Процесс деформирования при резании металлов дискретен, поэтому мощность источников теплоты пульсирует с частотой дискретизации процесса деформирования. Это приводит к периодическим колебаниям температурного поля, однако в силу инерции частота его колебаний на порядок и более ниже частоты колебаний источников теплоты. При увеличении амплитуды колебания режущего инструмента увеличиваются и колебания температурного поля, амплитуда колебаний которого может достигать 10—15 % при непрерывной обработке.

В процессе резания происходит непрерывное изменение внутреннего состояния движения атомов и молекул — источников возникающих электромагнитных явлений. Учитывая то, что любая система стремится к состоянию с минимумом энергии, то и процесс металлообработки сопровождается выделением избыточной энергии в виде упругих электромагнитных волн, а также в виде электрической энергии на контактных поверхностях инструмента. В результате пластической деформации при резании атомы, находящиеся в момент перехода в ядре дислокации, совершают колебания атомов, которые приводят к

появлению так называемых «активных центров» с пониженной работой выхода электронов в окрестностях дефектов структуры. При этом некоторые электроны выходят на границу раздела инструмент — деталь, появляется разность электрических потенциалов между контактными поверхностями, что сопровождается генерированием электрических сигналов.

Интенсивность инфракрасного излучения из зоны резания характеризуется функцией $\Phi(\lambda_B, s_r, t)$, описывающей распределение спектральной и пространственной плотности излучения по длинам волн λ_B , фактической площади контакта s_r и по времени t , т. е. функцией, представляющей собой распределение величины W_{si} по трехмерному пространству с координатами λ_B, s_r, t . Если учесть, что фактическая площадь контакта инструмента с деталью определяется суммой элементарных единичных точек схватывания, то каждому i -му единичному контакту соответствует мощность излучения

$$W_{si} = \int_{\Delta\lambda_B} \int_{\Delta s_r} \int_{\Delta t} \Phi(\lambda_B, s_r, t) d\lambda_B ds_r dt.$$

Информационная способность инфракрасного излучения поверхностей контакта инструмента с деталью определяется максимальным количеством информации¹⁰ о процессе:

$$H = k^{-1} T^2 (\lambda_B s_r \bar{\epsilon}_\tau)^{1/2},$$

где

$$K = k^{-1} (\pi\sigma)^{1/2} (hc)^{-1/2};$$

T — температура резания; $\bar{\epsilon}_\tau$ — усредненная по длинам волн излучательная способность; σ — постоянная Стефана — Больцмана; c — скорость света; h — постоянная Планка. Образующиеся в процессе резания поверхности, а также грани инструмента при нагреве активно вступают в химические реакции с окружающей средой, образуя окисные пленки. Толщина этих пленок постоянно изменяется, что приводит к изменению излучательной способности зоны резания в несколько раз.

Большое влияние на излучательную способность поверхности $\bar{\epsilon}_\tau$ оказывает ее шероховатость и в том случае, если высота микровыступов в несколько раз превышает длину волн излучения: $\bar{\epsilon}_\tau = \epsilon [1 + 2,8(1 - \epsilon)^2]$, где ϵ — излучательная способность гладкой поверхности.

Для получения более интенсивного излучения зону резания можно осветить с помощью источника инфра-

красного излучения известной мощности и измерить отраженную составляющую, по которой можно вычислить коэффициент отражения, а по нему и значение излучательной способности.

Следовательно, электромагнитное излучение несет важную информацию для диагностики процесса резания. Излучательная способность зависит от электрического сопротивления зоны резания. Электрические сигналы, генерируемые при резании, определяются электрическим сопротивлением контакта инструмента с деталью и, следовательно, существует взаимосвязь между электромагнитным излучением и электрическими сигналами. Процесс генерирования электрических сигналов связан с источником, энергия которого расходуется на разрыв электрических связей, существующих между зарядами в зоне резания.

Возникающая в процессе резания пластическая деформация увеличивает плотность дислокации, приводящей к такому изменению плотности состояния электронов, при котором они приобретают энергию, достаточную для преодоления потенциального барьера и выхода за границу контакта инструмента и обрабатываемой детали. В общем виде энергия электрона

$$E_s = \frac{3}{5} E_f(0) + \pi^2 (kQ)^2 / (4E_f(0)),$$

где $E_f(0)$ — энергия Ферми; k — коэффициент.

Первое слагаемое в данной формуле характеризует среднюю энергию электрона при нулевой температуре и называется «нулевой» энергией, имеющей чисто квантовую природу. «Нулевая» энергия зависит от концентрации свободных электронов и эффективной плотности электронов. Второе слагаемое определяется температурой и представляет собой «тепловую» энергию электрона. Сравнение «тепловой» и «нулевой» энергий электронов показывает, что даже при температуре плавления «тепловая» энергия составляет сотые доли «нулевой» энергии. Такая слабая восприимчивость электронов в металлах к нагреву приводит к тому, что только некоторые электроны приобретают энергию, которая превышает среднюю и оказывается достаточной для преодоления сил, препятствующих выходу электронов.

Именно это небольшое количество электронов обуславливает процесс термоэлектронной эмиссии, основным законом которой является формула Ричардсона —

Дешмана, описывающая зависимость тока эмиссии от температуры и работы выхода электронов.

Термоэлектронная эмиссия определяется составляющей ЭДС процесса резания, которая считалась основной причиной генерирования электрических сигналов при резании. При температуре, соответствующей резанию металлов, энергия электрона определяется прежде всего «нулевой» энергией, которая зависит от степени пластической деформации. Термоэлектрические явления, открытые Зеебеном, связаны с возникновением электродвижущихся сил в цепи разнородных проводников, в которых имеется градиент температуры. Эффект обратимого выделения или поглощения теплоты в спае двух разных металлов, когда через него протекает электрический ток, открыт Пельтье. Термоэлектрический эффект Томсона характеризуется обратным выделением или поглощением теплоты в однородном проводнике, по которому протекает электрический ток при одновременном наличии градиента температуры. Все эти термоэлектрические эффекты определяют интегральную ЭДС резания.

Изменение энергии электрона под действием пластической деформации называется низкотемпературной (экзоэлектронной) эмиссией, или эффектом Крамера. Электронная эмиссия возникает в результате искажения электронного энергетического спектра твердого тела с последующей перестройкой его электронной структуры, связанной с появлением дефектов. Пластическая деформация при стимулировании температурой, окислением, фазовым превращением является основным видом энергетического воздействия, вызывая эмиссию так называемых «экзоэлектронов» при резании металлов.

Возникновение адгезионных связей обрабатываемого металла с режущим инструментом приводит к возникновению вакуума при разрыве адгезионного шва, который в микроскопических объемах как бы выдавливает воздух. Таким образом создается как бы условный контакт, энергетическое поле которого вызывает автоэлектронную эмиссию. Автоэлектронная эмиссия является чисто квантовым эффектом, связанным с волновыми свойствами электронов. Роль электрического поля сводится к формированию соответствующего потенциального барьера. В это время внешнее ускоряющее электрическое поле понижает потенциальную энергию за пределами твердого тела и меняет форму потенциального барьера, что влечет за собой образование потока свободных электронов.

В процессе резания волны механических напряжений являются причиной появления эмиссии волн электрических напряжений. Особенно высокое пластическое деформирование в зоне контакта, где материал достигает предела текучести, вызывает интенсивное образование двух волн напряжений: упругой и за ней пластической. Л. А. Лебедев получил зависимость для разности потенциалов в результате эмиссии волн напряжений, определяемой прежде всего электрическими и акустическими свойствами материалов, а также интенсивностью волн при взаимодействии контактных поверхностей.

Возникающие колебания в процессе металлообработки возбуждают и волны напряжений различных частот, которые генерируют ЭДС, соответствующую частотам всего спектра колебаний. Переменная составляющая ЭДС резания характеризует колебания энергии на контактных поверхностях режущего инструмента — детали и зависит от физико-механических свойств инструмента и детали, а также силы резания, фактической площади контакта, скорости относительного движения, вибрации, адгезии и др.

Общая ЭДС резания является суммой ЭДС, возникающих в результате термоэлектрических явлений E_T , экзоэлектронной эмиссии $E_{ЭК}$, автоэлектронной эмиссии $E_{ав}$ и эмиссии волн напряжений $E_{в.н}$: $E = E_T + E_{ЭК} + E_{ав} + E_{в.н}$. Все четыре составляющие примерно равноценны и связаны между собой. Экзоэлектронная, автоэлектронная эмиссии и эмиссии волн напряжений влияют на «нулевую» энергию электрона, а термоэлектрические явления изменяют долю «тепловой» энергии в общей энергии электрона.

Анализируя вышеприведенное, можно сделать вывод, что электрические сигналы представляют комплексную характеристику процесса резания.

4. ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ

Релаксационная природа процесса резания и стружкообразования является основой формирования его периодичности, которая определяется условиями пластического деформирования внешнего и внутреннего трения, температурой, подачей, скоростью резания, свойствами материала, формами и размерами режущего инструмента. Процесс резания в совокупности с теплофизическими свойствами представляет собой открытую термодинами-

ческую систему. При образовании нароста и срыве его периодичность процесса наблюдается в диапазоне низких частот.

Периодичность процесса стружкообразования заключается в образовании сегментов и текстуры стружки. В реальном диапазоне резания от 0,5 до 4,0 м/с частотный диапазон данной периодичности 0,5—20 кГц и вызывает наибольшую амплитуду смещения инструмента относительно заготовки. Рассматривая эту периодичность, следует отметить в ней высокую корреляционную связь внешнего и внутреннего трения. Следы периодичности деформирования металла в процессе резания отмечаются не только по стружке, но и по следам на необработанной поверхности. Эти оставленные на поверхности резания волнообразные следы изменяют глубину резания и являются также источником колебаний при последующих срезах. Практически все реальные процессы резания происходят при работе по следу.

Возмущения в реальной системе, вызываемые неравномерностью припуска, неоднородностью материала, прерывистостью схемы обработки, биением детали или инструмента, приводят к возникновению собственных колебаний технологической системы, которые могут или быстро затухать, или приводить к возникновению автоколебаний технологической системы. Автоколебания в процессе резания зависят от многочисленных параметров и их явление связано с совпадением одной из собственных частот технологической системы с частотой возбуждающих факторов. Поэтому модель самовозбуждаемых вибраций следует рассматривать как колебания с отрицательным коэффициентом демпфирования.

В связи с тем, что кривая зависимости сил резания от скорости имеет падающий характер, возникают условия к постоянному притоку энергии резания для поддержания и усиления вибраций, что позволило получить для процесса точения следующие уравнения [9]:

$$m\ddot{x} + \Phi_2(x)\dot{x} + F_x = \Phi_1(v, t, \gamma),$$

где m — эквивалентная масса резца в точке резания; $\Phi_2(x)$ — коэффициент демпфирования резца; x — мгновенное значение смещения резца; F_x — восстанавливающее усилие на единицу отклонения; $\Phi_1(v, t, \gamma)$ — функция вертикальной силы резания от мгновенных значений скорости, толщины среза и переднего угла. ☺

Таким образом резец, выведенный из состояния равновесия, совершает движение по эллипсу перемещений

(рис. 15). Объясняется данное явление тем, что при движении вершины резца вначале от A к B усилие резания возрастает, а от B к A — падает. Такая неоднозначность действия силы приводит к тому, что энергия, входящая в колебательную систему, больше, чем отобранная. Поэтому интенсивность колебаний будет нарастать вплоть до значения, соответствующего состоянию энергетического равновесия.

Автоколебания оказывают значительное влияние на все параметры процесса резания. В первую очередь,

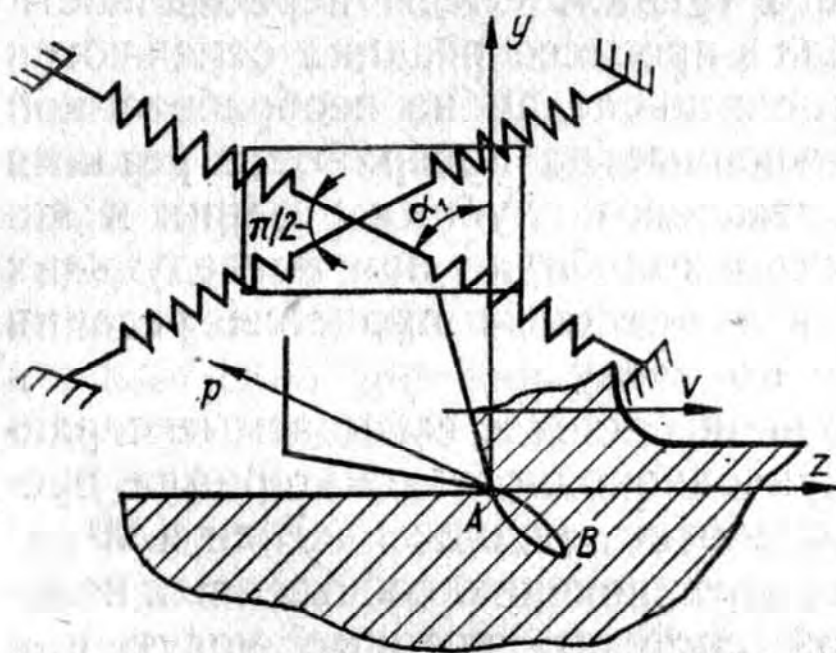


Рис. 15. Схема автоколебаний резца в процессе резания

стойкость T инструмента изменяется в десятки раз с изменением амплитуды A автоколебаний. Графики зависимости T от A при точении коррозионно-стойких сталей 12Х18Н9Т (кривая 1), 08Х15Н5Д2Т (кривая 2) и титанового сплава ВТ-9 (кривая 3) проходными резцами ВК-8 на станке модели 1К62 показаны на рис. 16. Все кривые имеют экстремальный характер. Максимальная стойкость достигается при амплитуде колебаний $A = 8...20$ мкм, а дальнейшее увеличение или уменьшение амплитуды колебаний приводит к значительному снижению стойкости. Для сплава 08Х15Н5Д27 увеличение амплитуды в 5 раз от 18 до 90 мкм приводит к снижению стойкости T в 7 раз. Эти зависимости описываются уравнением вида [9]:

$$T = QA^m e^{-nA},$$

где Q , m , n — постоянные, зависящие от вида обрабатываемого и инструментального материалов и условий обработки.

Такой характер зависимости объясняется сложностью физических процессов, происходящих в зоне резания. Пульсирующие нагрузки облегчают пластическое деформирование материала в зоне стружкообразования,

ослабляют адгезионное сцепление, а следовательно, силу и коэффициент трения на контактных поверхностях, что и уменьшает износ и увеличивает стойкость инструмента. Но одновременно с ростом пульсации нагружения инструмента происходит и увеличение цикличности напряжений в режущей части, что приводит к разрушению инструментального материала и одновременно существенно увеличивает длину пути, проходимого инструментом при обработке деталей. Взаимодействие этих двух противоречивых динамичес-

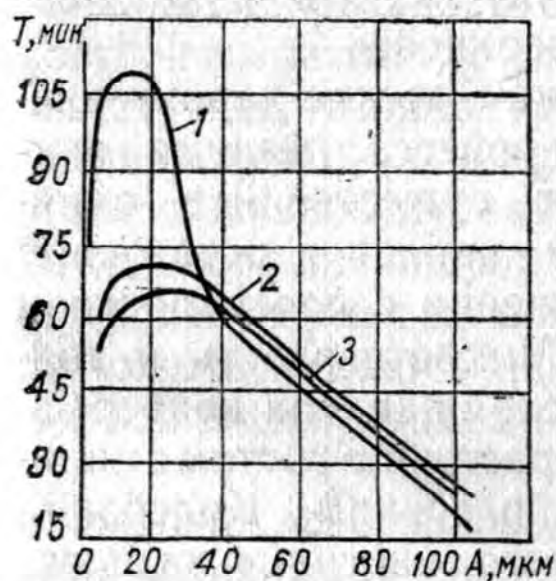


Рис. 16. График зависимости стойкости инструмента от амплитуды автоколебаний для различных обрабатываемых материалов

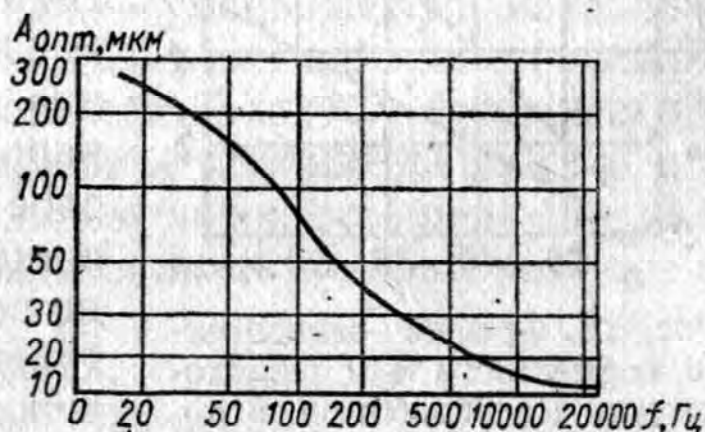


Рис. 17. График зависимости оптимального значения амплитуды колебаний $A_{\text{опт}}$ от частоты f

ких явлений и определяет сложный характер износа с изменением амплитуды колебаний.

Таким образом, за счет оптимизации амплитуды колебаний можно повысить производительность металлообработки в несколько раз.

В связи с тем что обрабатываемые изделия имеют сложную форму и неоднородную жесткость, при обработке одновременно с амплитудой изменяется и частота колебаний. При этом каждой частоте колебаний f соответствует свой довольно узкий диапазон оптимальных амплитуд $A_{\text{опт}}$ (рис. 17). Зависимость $A_{\text{опт}} = f(f)$ имеет монотонный характер. Большей частоте колебаний соответствует меньшее оптимальное значение амплитуды. Такое явление объясняется тем, что с ростом частоты колебаний происходит не только увеличение количества циклов нагружения, но и переход вида разрушения на микроуровень. Так, при высокочастотных колебаниях возникает интенсивное воздействие на дислокационном уровне, которое и определяет изменения пластического деформирования в зоне стружкообразования.

Автоколебания оказывают влияние на шероховатость обрабатываемой поверхности: с ростом амплитуды автоколебаний растет шероховатость и волнистость поверхности для всех видов металлообработки [9]. Анализ экспериментальных данных (рис. 18) показывает, что рост шероховатости и волнистости прямо пропорционально зависит от роста амплитуды автоколебаний. Увеличение же частоты колебаний приводит к уменьшению как волнистости, так и шероховатости поверхности.

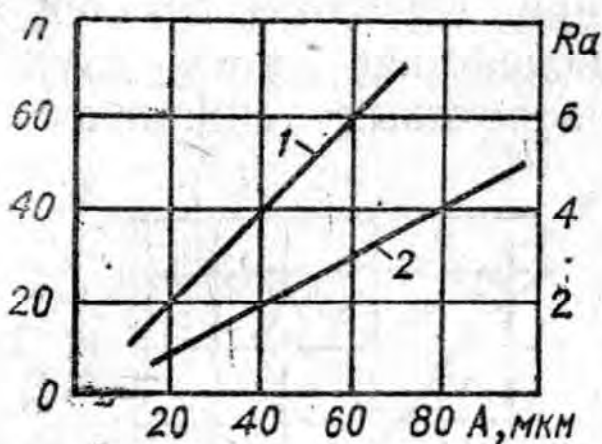


Рис. 18. График зависимости волнистости n и шероховатости Ra обработанной поверхности от амплитуды автоколебаний при точении сплава $08 \times 15H5ДГТ$:

1 — $f = 140...190$ Гц; 2 — $f = 500...600$ Гц

Динамические характеристики процесса резания оказывают существенное влияние на наклеп и остаточные напряжения в поверхностном слое. Микротвердость и толщина слоя наклепа непрерывно возрастают с ростом амплитуды колебаний. Колебания режущего инструмента и его циклическое воздействие на наклеп обработанной поверхности прямо пропорционально квадрату амплитуды и частоты колебаний. Наклеп и его глубина существенно влияют на эксплуатационные свойства деталей, поэтому диагностика процесса наклепа позволит обеспечивать высокое качество и надежность приборов и машин.

Свойства наклепанного слоя зависят от величины и характера действия в нем остаточных напряжений, главной причиной образования которых являются нагрев и пластическое деформирование. Рост амплитуды автоколебаний вызывает увеличение остаточных напряжений. Не менее интенсивно влияет на остаточные напряжения и частота колебаний, способная увеличить их на 20—30 %. Остаточные напряжения во многом определяют эксплуатационную прочность и коррозионную стойкость деталей, которые могут регулироваться при диагностике процесса резания. В связи с этим для диагностики процесса резания необходимо иметь информацию о его динамических характеристиках, которая точнее всего передается виброакустическим сигналом. Спектральный состав возмущений имеет очень широкий частотный диапазон от долей герца до десятков мегагерц и представляет собой чередование полос пропускания и задержания

сигнала. С точки зрения информативности о процессе резания, антирезонансные зоны являются не менее информативными, чем резонансные с максимальными амплитудами. С увеличением износа отмечается рост неустойчивости генерации виброакустического сигнала, что ведет к появлению комбинированных и модуляционных частот. Одновременно происходит перераспределение энергии и устойчивости генерации виброакустического сигнала, увеличение контрастности одних форм и уменьшение стабильности генерации других. Определение этих границ у частот, где, с одной стороны, устойчивость генерации увеличивается, а с другой — уменьшается, позволяет вести диагностику затупления режущего инструмента. Таким образом виброакустический сигнал несет необходимую информацию об износе и поломке режущего инструмента, а также необходимую информацию для размерной его настройки и оценки качества поверхности.

5. ПРОЦЕСС ИЗНАШИВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Одним из главных факторов, снижающих эффективность металлообработки, является износ режущего инструмента. Износ инструмента допускается до определенной величины (критерия износа), которая зависит от вида обработки и инструмента. Для токарных твердосплавных резцов при черновой обработке сталей в качестве критерия износа принимается износ по задней грани $h_3 = 0,8 \dots 1$ мм, а для чистовой обработки $h_3 = 0,2 \dots 0,25$ мм или радиальный износ. Выделяют четыре основных вида износа инструмента: абразивный, адгезионный, диффузионный и окислительный.

При абразивном износе твердые включения обрабатываемого материала, попадая в контактные поверхности материала инструмента, царапают их и срезают микростружки. Абразивный износ приводит обычно к неравномерному износу режущей кромки, создавая канавочный (или концентрированный) износ.

Канавочный износ появляется в результате многократного царапания поверхностных пленок инструментального материала, ослабленных действием химически активной среды. Он свидетельствует о неравномерности контактных процессов, происходящих на задних поверхностях инструмента. Неравномерное распределение силовой и тепловой нагрузки может привести к локальным всплескам температуры и росту давлений, изменению

электрических потенциалов между инструментом и деталью. Измерение электрических потенциалов позволит производить диагностику канавочного износа инструмента.

Для абразивного вида взаимодействия объемный износ [11] $W_a = KNLa/H$, где W_a , мм³; K — коэффициент, зависящий от абразивных свойств истирающей поверхности, условий испытаний, мм⁻¹; N — нормальная нагрузка, кг; L — длина пути, мм; a — диаметр абразивного зерна, мм; H — твердость материала, кг/мм².

Анализируя формулу видим, что по диаметру абразивного зерна можно оценивать осциллирующее воздействие абразивного изнашивания и вести его идентификацию по определенной частоте колебаний, возникающих в процессе резания электрических и виброакустических сигналов. В результате совместного пластического деформирования возникающие в процессе резания высокие давления создают условия для сближения ювенильных поверхностей на расстояние, равное параметру кристаллической решетки, что приводит к образованию металлических мостиков сварки [3].

На основании исследования адгезионного износа предложена зависимость для стойкости T , мин, твердосплавного инструмента в следующем виде:

$$T = \frac{C_v h_3 \sigma_B^{t_1}}{(\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \sigma_T) v b_T^{t_1 - v}},$$

где C_v — коэффициент; v — параметр степенной аппроксимации участка кривой поверхности детали в зоне резания; σ_B — предел прочности инструментального материала, кг/мм²; t_1 — параметр кривой Веллера; σ_T — предел текучести обрабатываемого материала, кг/мм²; v — скорость резания, м/мин.

Из этой формулы следует, что стойкость инструмента при адгезионном износе, в первую очередь, зависит от физико-механических характеристик инструментального σ_B и обрабатываемого σ_T материалов.

Путь резания до заданного критерия износа при адгезии [11]

$$L = vT = \operatorname{const} \frac{\sigma_B^m}{a^2 \tau_K^x \tau_{\text{ср}}^y},$$

где L , мм; a — толщина среза, мм; τ_K^x — твердость контактных слоев стружки, кг/мм²; $\tau_{\text{ф}}$ — сопротивление деформации обрабатываемого материала, кг/мм².

Приведенные выше математические модели износа инструмента в условиях адгезии лишь качественно описывают физические явления, происходящие в зоне резания, а входящие в них параметры трудно определимы.

Например, твердость и прочность материалов, измеренные с помощью стандартных методов, будут отличаться от тех значений, которые соответствуют условиям нагружения в зоне резания. Эти модели не учитывают динамику процесса резания, не раскрывают процесса износа инструмента на микроструктурном уровне с позиций электромагнитных явлений.

Высокие пластические деформации, давление и температура в зоне контакта, а также интенсивная адгезия при высоких скоростях резания способствуют взаимному диффузионному растворению компонентов инструментального и обрабатываемого материалов.

Процесс диффузии характеризуется коэффициентом, зависящим от температуры резания и энергии активации. Энергия активации определяет разрыхление кристаллической решетки, заключающееся в ослаблении межатомных связей, отрыве атомов от своих положений равновесия и миграции их. Энергия активации зависит от взаимного расположения растворителя и растворенного элемента в периодической системе. Чем больше удален диффундирующий элемент от группы периодической системы, к которой принадлежит растворитель, тем меньше энергия активации и тем больше коэффициент диффузии.

Однако точный контроль и диагностику диффузионных процессов, происходящих при резании, на основании электрических сигналов осуществить сложно, так как частота осцилляции этих процессов будет находиться в диапазоне нескольких мегагерц.

Диффузионный износ режущего инструмента характеризуется не только переносом атомов инструментального материала в деталь и стружку, но и разупрочнением режущего инструмента в результате структурных превращений. Следовательно, диффузионный износ можно представить как результат двух процессов — диффузионного растворения и разрушения разупрочненной поверхности инструмента. Стойкость инструмента по износу задней поверхности в этом случае выражается уравнением

$$T = \frac{\pi^{1/2} \operatorname{tg} \alpha h_3^{3/2} \rho_n}{3 (1 - \operatorname{tg} \gamma \operatorname{tg} \alpha) \rho c_1 D^{1/2} v^{1/2}},$$

где T , мин; $\rho_{\text{в}}$ — плотность инструментального материала, кг/мм²; ρ — плотность диффузионного слоя, кг/мм²; c_1 — массовая доля продиффундирующего элемента; D — коэффициент диффузии.

Стойкость инструмента не зависит от механических характеристик обрабатываемого и инструментального материалов, а определяется температурой контакта, скоростью резания и химическим составом контактирующих материалов.

Под окислительным износом понимают процесс динамического равновесия разрушения и восстановления окисных пленок. При образовании тонких и прочных окисных пленок на контактных поверхностях процесс адгезии происходит в основном между пленками, что предохраняет инструмент от более интенсивного износа. Если образуются рыхлые и толстые пленки окислов, то износ увеличивается за счет того, что такие пленки легко разрушаются. Окислы титано-вольфрамокобальтовых твердых сплавов обладают большими экранирующими свойствами, чем окислы вольфрамокобальтовых твердых сплавов, так как наряду с высокой механической прочностью первые имеют большую разницу в работе выхода электрона между окислом и основой. Поэтому минимуму интенсивности изнашивания соответствует максимальное экранирование адгезионного взаимодействия контактирующих материалов или максимум работы выхода электрона с поверхности режущего инструмента, при котором перемещение контактирующих поверхностей происходит за счет сдвига внутри окисной пленки.

Окисные пленки могут существенно влиять, с одной стороны, на работу выхода электрона и тем самым на ЭДС резания, а с другой — на износ инструмента.

С изменением условий резания интенсивность износа изменяется по сложным зависимостям. Так, при возрастании скорости резания интенсивность износа изменяется в зависимости от интенсивности абразивного, адгезионного, диффузионного и окислительного видов износа.

Наряду с внешним воздействием на контактные поверхности инструмента влияют напряжения, возникающие в режущей части под воздействием тепловых и силовых нагрузок.

Прочность режущей части инструмента оценивается по распределению главных напряжений σ_1 , σ_2 , σ_3 , интенсивности напряжений σ_i и эквивалентному напряжению σ_{η} . Считается, что наступает разрушение, когда $\sigma_{\eta} > \sigma_{\text{в}}$.

Коэффициент запаса прочности определяется отношением

$$K_{з.п} = \sigma_{в} / \sigma_{\eta}.$$

Распределения σ_t и σ_1 используются для установления характера разрушения. Отметим, что зоны режущей части инструмента, в которых выполнялось условие $\sigma_{\eta} > \sigma_{п}$, т. е. $K_{з.п} < 1$, очень хорошо коррелируются с областями разрушения и износа инструмента.

Полученные данные о силах резания, контактных площадках, усадке стружки в совокупности с вычисленными распределениями контактных нагрузок, параметрами процесса резания, формой и размерами инструмента, теплофизическими и физико-механическими свойствами обрабатываемого инструментального материала служат входной информацией для конечно-элементного анализа трехмерного распределения напряжений в режущей части инструмента.

Схема распределения температуры показана на рис. 19, а, напряжения в центральном сечении для учета силового, теплового и совместного нагружения режущей части — соответственно на рис. 19, б—г. Механическая нагрузка создает поле напряжений с максимумом, равным 1140 МПа на задней поверхности под режущей кромкой. Температурные градиенты формируют две зоны локализации напряжений: в окрестности режущей кромки из-за обтекания ее нагретым металлом ($\sigma_{\eta} = 660$ МПа), и под передней поверхностью во второй половине контакта со стружкой ($\sigma_{\eta} = 320$ МПа).

В рассмотренном примере доминирующее значение имеют механические напряжения. Но их распределение не согласуется ни по форме, ни по размерам с зонами разрушения и износа инструмента. Учет же в расчетах совместного действия силовой и тепловой нагрузок приводит к изменению как значений, так и характера распределения напряжений. Наибольшие значения σ_{η} расположены на режущей кромке, область с напряжениями $\sigma_{\eta} > \sigma_{в}$ ($\sigma_{в} = 450$ МПа) становится более протяженной вдоль задней поверхности и выходит на переднюю поверхность, чего не наблюдалось в случае с механическими напряжениями. Протяженность вдоль задней поверхности зоны с $K_{з.п} < 1$ равна 0,17 мм, а измеренный износ по задней поверхности составил 0,16 мм, причем высокие значения $\sigma_t = 5910$ МПа в этой зоне говорят о преимущественно вязком характере разрушения.

Полученные результаты показывают, что наилучшим образом коррелируются с зонами разрушения контактных

поверхностей распределения напряжений σ_{η} . При уменьшении скорости резания увеличиваются усадка стружки на 15 %, длина контакта на 25 %, составляющие силы резания на 10 %. Максимальное значение напряжений при уменьшении скорости резания с 200 до 124 м/мин снизились с 1320 до 920 МПа несмотря на рост сил резания на 10 %. Таким образом, максимальные напряжения в режущей части уменьшаются на 30 % и прочность ин-

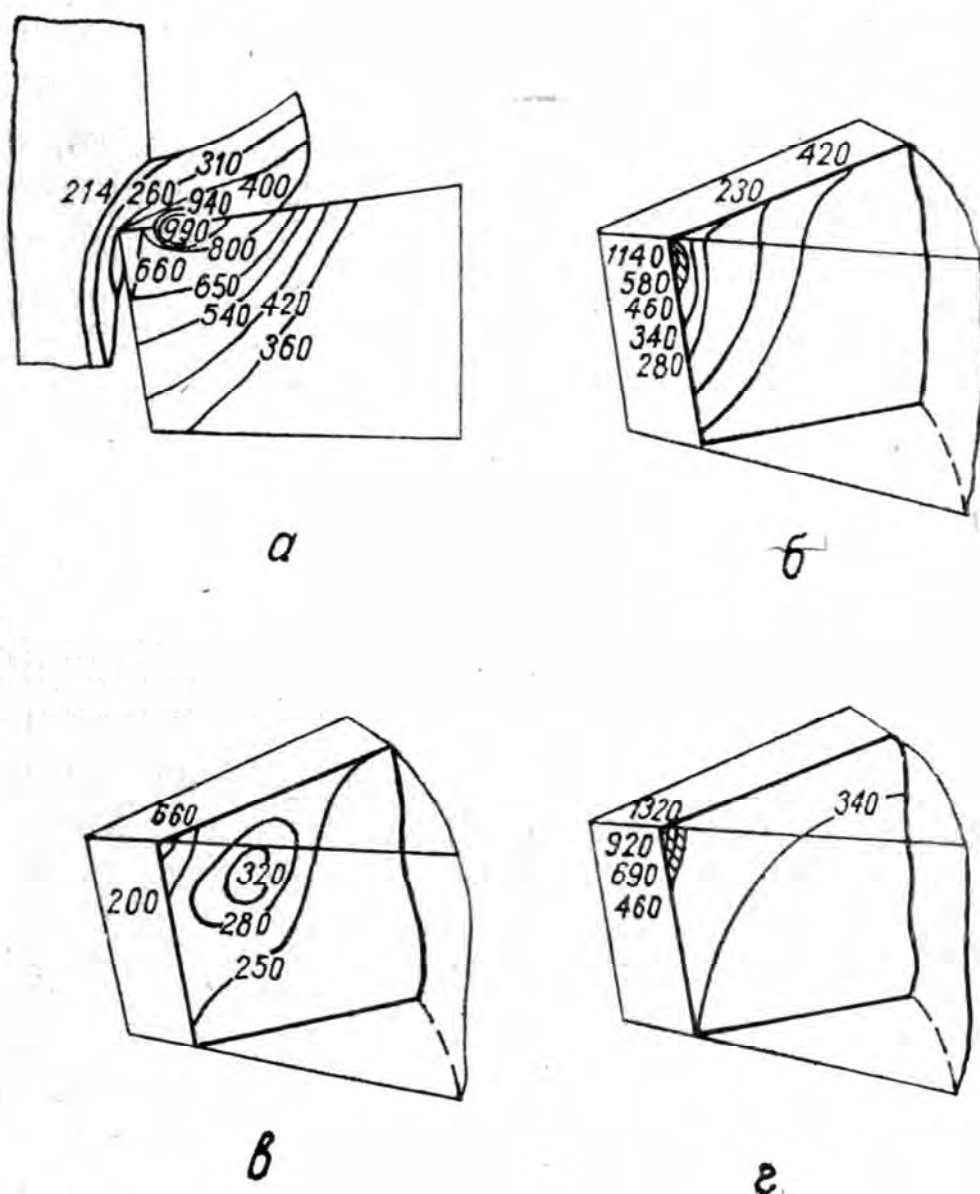


Рис. 19. Схема распределения температуры (а) и напряжений (б, в, г) в режущей части инструмента

струмента существенно увеличивается, снижая вероятность выкрашивания и интенсивность износа.

При врезании резкий нагрев контактных поверхностей приводит к возникновению в окрестности режущей кромки очень неблагоприятного сочетания механических и тепловых напряжений. Максимальные значения σ_{η} достигают 1700 МПа через 2 мс, а при стабилизации температуры через 40 мс снижаются до 1320 МПа. При выходе инструмента из зоны обработки в момент силовой нагрузки происходит перестройка напряженного состояния в соответствии с распределением температуры.

Под контактной площадкой на передней грани $\sigma_{\eta} = 465$ МПа (рис. 20, а), что превышает предел прочности $\sigma_{\text{в}}$ для сплава Т15К6, а напряжение на вершине падает до 116 МПа. Через 0,34 мс с начала охлаждения максимальные значения температуры снижаются до 751 °С, а напряжения σ_{η} уменьшаются до 309 МПа. Через 0,68 мс максимальные значения температуры 643 °С, а $\sigma_{\eta} = 274$ МПа (рис. 20, б), но при этом изменился характер их распределения. Область максимальных значений σ_{η} сместилась к концу площадки контакта и вышла на пе-

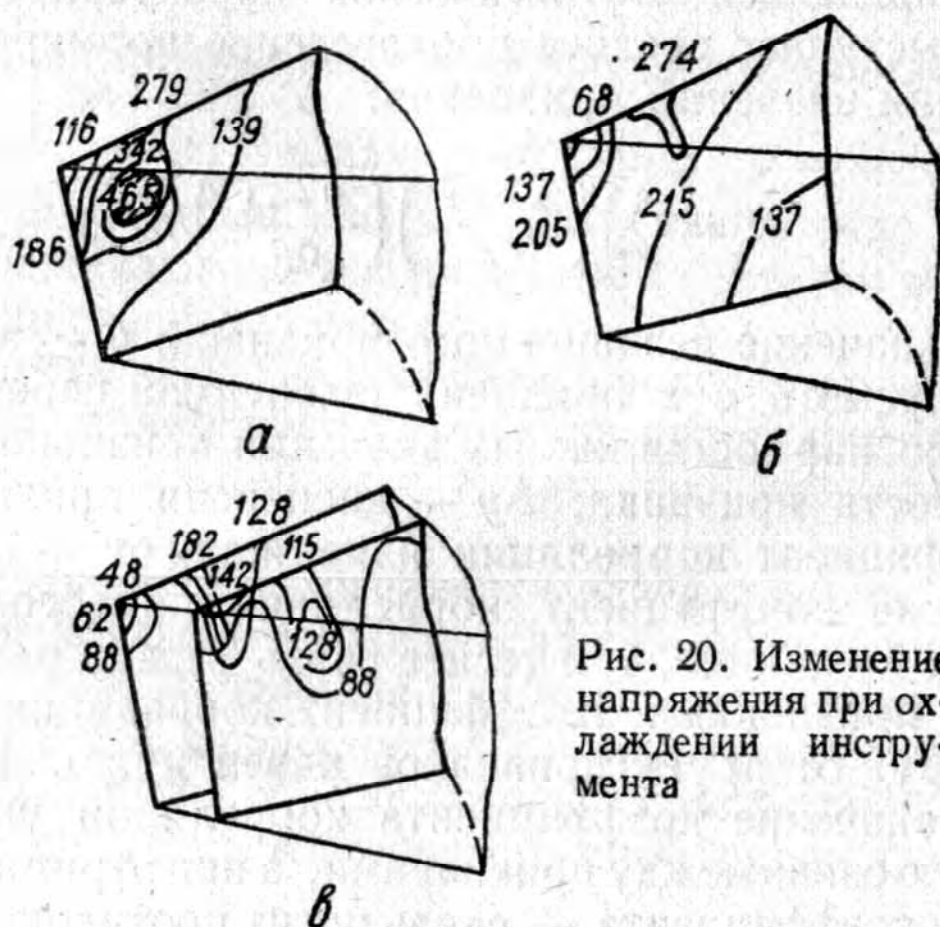


Рис. 20. Изменение напряжения при охлаждении инструмента

реднюю поверхность. Через 2,04 мс температура падает до 437°, а напряжение — до 182 МПа (рис. 20, в). Максимальные напряжения в этих зонах расположены на задней вспомогательной поверхности, которая интенсивно охлаждается. При перемещении в тело инструмента на 0,295 мм напряжения снижаются до 128 МПа. С точки зрения статистической прочности такие значения напряжений не должны представлять опасность. Однако в условиях циклического нагружения они являются причиной возникновения термических трещин.

6. АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ КАК ИСТОЧНИКА ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Для определения количественных характеристик и параметров диагностируемого процесса металлообработки используются автоматизированные информационные

системы, позволяющие учесть и обработать десятки тысяч экспериментальных данных, накопившихся у технологсв [22].

Одним из часто применяемых статистических методов оценки тесноты связи является сопоставление статистически параллельных рядов, определение коэффициента корреляции рангов Спирмэна, коэффициента тесноты корреляционной связи Рехнера и др. Для более точного учета необходимо рассчитывать коэффициент корреляции. В этом случае в качестве средней величины, играющей роль обобщающей статистической характеристики явления, выступает среднее произведение нормированных отклонений значений признаков:

$$r = \sum \left(\frac{x - \bar{x}}{\Delta x} \right) \left(\frac{y - \bar{y}}{\Delta y} \right) / n,$$

где x — значение независимого признака; y — значения коррелируемого с x признака (зависимой переменной); n — число пар составляемых значений признаков; Δx — колеблемость признака; Δy — дисперсия признака.

Коэффициент корреляции изменяется от -1 до $+1$. Чем ближе коэффициент корреляции по абсолютному значению к единице, тем теснее связь между рассматриваемыми признаками. Коэффициент корреляции независимых друг от друга признаков равен нулю. Положительное значение коэффициента корреляции указывает на прямую связь между признаками, а при отрицательном значении коэффициента — связь носит противоположный характер.

Оценка коэффициента корреляции производится по выборочному коэффициенту корреляции, который по n парам наблюдений $|x_1, y_1|, |x_2, y_2|, \dots, |x_n, y_n|$ определяется следующим образом:

$$r = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) / \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}.$$

Во многих случаях удобно пользоваться методом произвольно выбранных начал для вычисления коэффициента корреляции по формуле $r = (\sum dx dy f_{xy} - n f_x f_y) / n \sigma_x \sigma_y$, где $dx = (x - A_x) / i_x$; $dy = (y - A_y) / i_y$ — отклонение параметра относительно произвольно выбранных начал A_x и A_y , сокращенное на величину соответствующего интервала i_x и i_y ; $b_x = \sum dx f_x / \sum b_x$; $b_y = \sum dy f_y / \sum f_y$ — условные моменты первого порядка; f_x

f_y — совместная частота; $\sigma_x = \sqrt{\Sigma d^2 x f_x / \Sigma f_x - b^2 x}$ и $\sigma_y = \sqrt{\Sigma d^2 y f_y / \Sigma f_y - b^2 y}$ — среднее квадратичное отклонение.

В том случае, если нет точных количественных данных о параметрах процесса резания, то в практике статистических исследований встречается задача определения тесноты связи между качественными признаками. Обозначив наличие признака единицей, а его отсутствие нулем, получим матрицу наблюдений, состоящую из четырех клеток. Если обозначим клетки матрицы таким образом:

a	b
c	d

то коэффициент корреляции альтернативных признаков имеет следующий вид: $r = a_0 / (-bc) \times \sqrt{(a+b)(c+d)(a+c)(b+d)}$. В таком виде коэффициент корреляции называется коэффициентом взаимной сопряженности признаков.

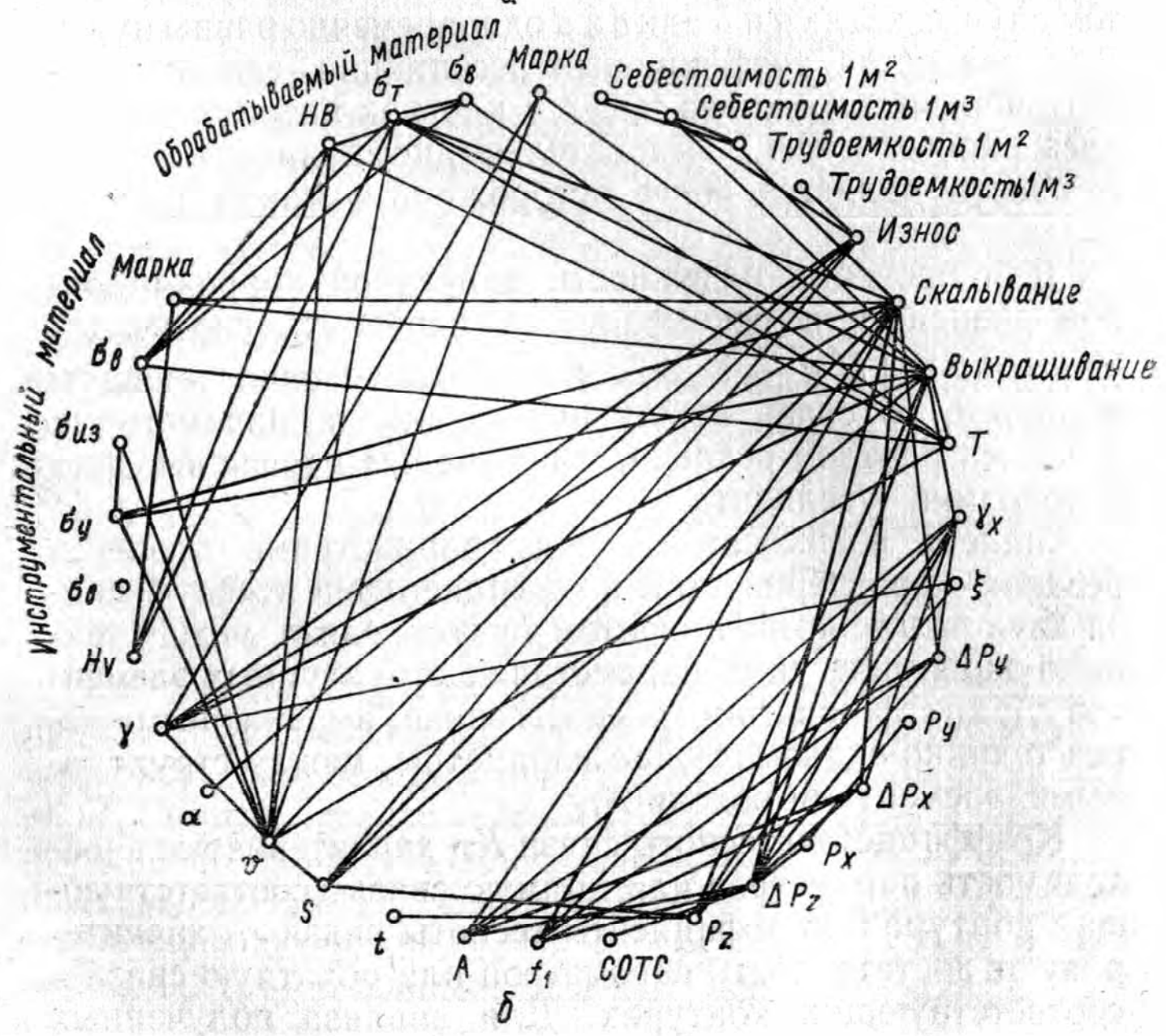
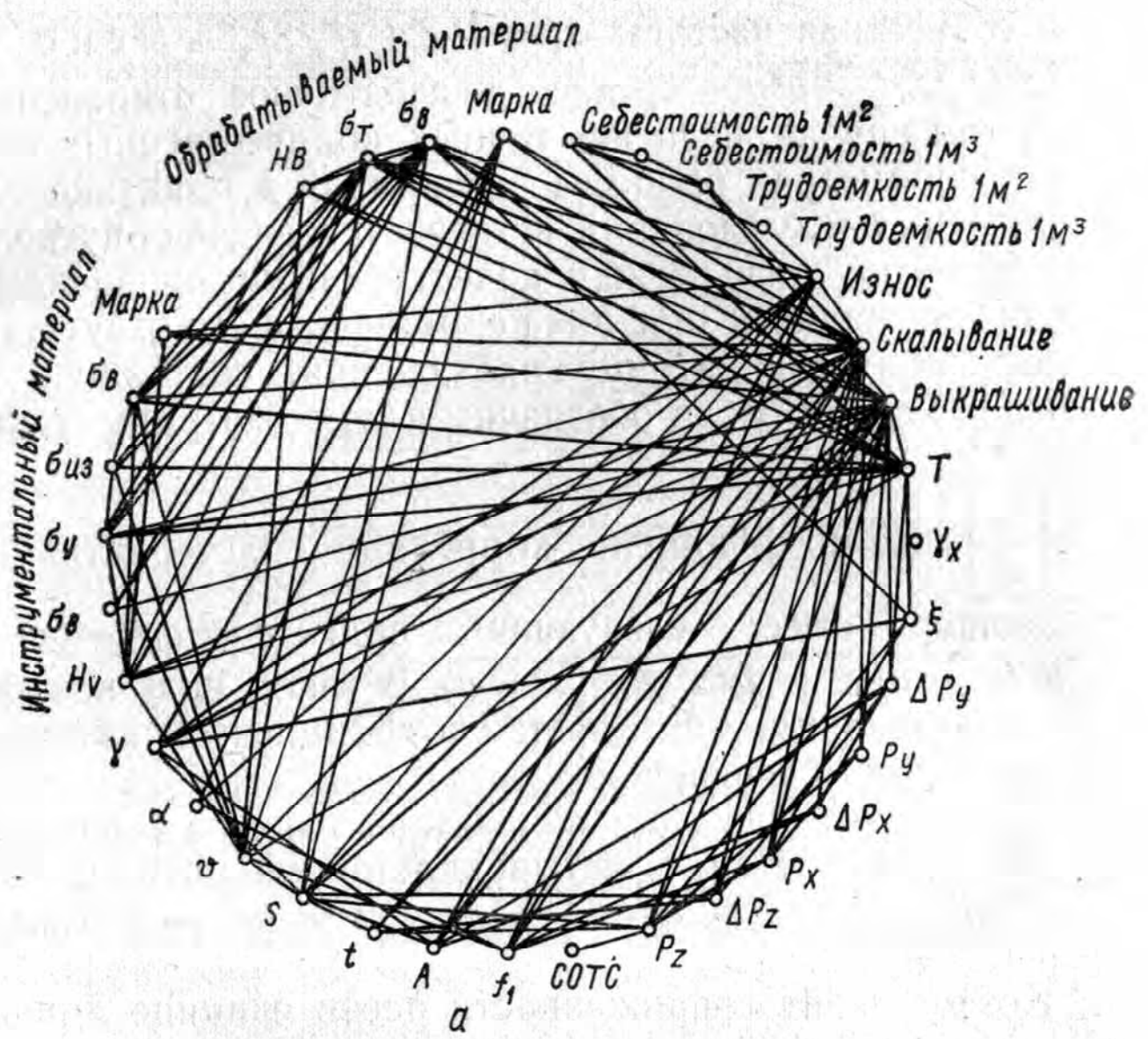
Существует еще один показатель тесноты связи, который применяется в четырехклеточной матрице. Это коэффициент ассоциации Юла: $r = (ad - bc) / (ad + bc)$.

Коэффициент сопряженности равен единице лишь в том случае, когда a и b или c и d одновременно равны нулю. Для равенства коэффициента ассоциации единице достаточно, чтобы одно из чисел в клетках матрицы оказалось равным нулю. Следовательно, коэффициент сопряженности является более осторожной оценкой тесноты связи.

Для проверки надежности найденной корреляционной зависимости рекомендуется проверять следующие условия: $|r| \sqrt{n-1} \geq 3$. Если это условие удовлетворяется, то связь между исследуемыми параметрами процесса резания реальна, в противном случае выборку необходимо увеличить.

Степень взаимосвязи между параметрами процесса резания характеризуется коэффициентами тесноты связи двух видов: коэффициентом тесноты связи между технико-экономическими параметрами структурных элементов r_{ij} ; коэффициентами тесноты связи, выраженными через технико-экономические параметры, между структурными элементами модели K_{ij} .

Коэффициенты тесноты связи K_{ij} характеризуют необходимость параметров или прямую связь в соответствующих контурах; коэффициенты тесноты связи r_{ij} характеризуют достаточность параметров или обратную связь в соответствующих контурах. Для анализа полученных



результатов существуют несколько методов распределения тесноты связи r_{ij} .

Отбор наиболее существенных факторов проводится методом корреляционных плеяд. Согласно этому методу по полученным коэффициентам корреляции строится граф, который затем в результате некоторых преобразований разбивается на подграфы с различными степенями связи признаков. Пусть имеется матрица корреляции размерности $n \times n$. Нанесем на чертеже n точек, соответствующих n признакам. Соединив каждую точку прямыми линиями, соответствующими корреляционными связями, с каждой из $(n - 1)$ -й точкой, получим исходный

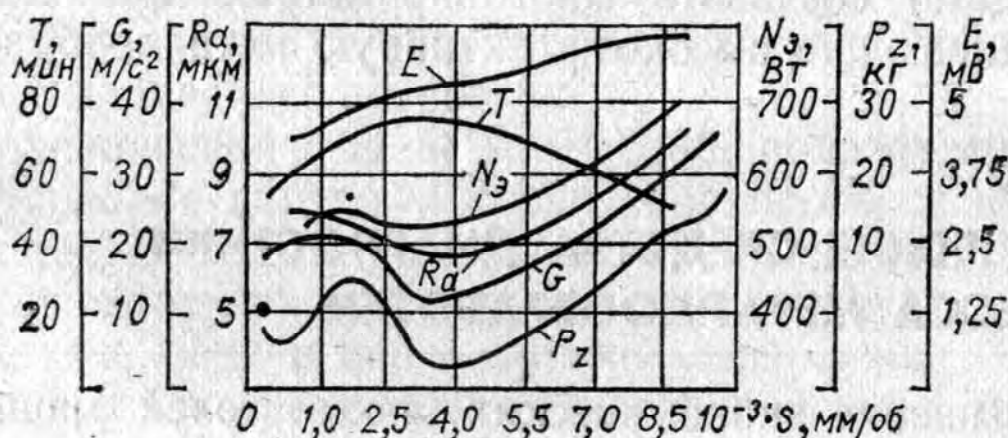


Рис. 22. Изменение параметров процесса резания от подачи при точении конструкционных сталей твердосплавным резцом T15K6

граф (рис. 21). Таким образом, точки являются вершинами графа, а отрезки прямых — дугами. Зададим пороговое значение коэффициента корреляции σ , и исключим из графа все дуги, которые соответствуют коэффициентам корреляции с меньшим пороговым значением. Если постепенно увеличивать σ , и исключать из графа дуги по тому же принципу, то при некотором большом значении σ , получим соответствующий подграф. Этот подграф будет соответствовать группировке признаков, корреляционная связь которых с результатом больше пороговой, а между самими признаками меньше ее.

Таким образом, данная методика позволяет определить наиболее значимые параметры, необходимые для диагностики процесса резания. Так, одновременно измеряли ЭДС резания E , стойкость инструмента T , силы резания P_z , эффективную мощность N_z , шероховатость поверхности R_a и виброакустическую эмиссию G при увеличении подачи S (рис. 22). При малых подачах

Рис. 21. Корреляционная взаимосвязь параметров процесса резания с порогом 0,4 (а) и 0,7 (б)

до $S < 25$ мм/мин наблюдается общее увеличение E , T , R_a и уменьшение сил резания. В области подач $S = 35...45$ мм/мин наблюдается максимальная стойкость инструмента, которая соответствует минимальным значениям энергетических затрат и виброакустического сигнала, в то же время достигается высокое качество поверхности и точность обработки. Таким образом, по диагностике уровня виброакустического сигнала можно осуществлять оптимизацию процесса металлообработки и оценивать обрабатываемость изделий. Правильную и надежную диагностику процесса резания невозможно вести по измерению одного параметра. Для этой цели необходимо создавать многопараметрические системы, обеспечивающие высокоэффективную металлообработку.

Глава 3

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДИАГНОСТИКИ ПРОЦЕССА МЕТАЛЛООБРАБОТКИ

Повышение экономических показателей машин является важнейшей задачей современного машиностроения и в значительной мере зависит от качества обработки, которое определяется стабильностью технологического процесса, режимов резания, геометрических параметров режущего инструмента и его размерной стойкости, упругих и температурных деформаций технологической системы, настройки станка и его геометрической точности и других факторов. При таком многообразии действующих факторов и заданных требований диагностика процесса металлообработки требует прежде всего надежных и эффективных средств диагностики технологических параметров процесса металлообработки. Надежность и информативность этих средств в значительной мере определяют их эффективность и эффективность всей системы диагностики процесса в целом. Поэтому в современных условиях все более широкое внимание уделяется разработке новых и совершенствованию выпускаемых промышленностью технических средств контроля процессов металлообработки как в нашей стране, так и за рубежом.

В приборостроении и машиностроении все более высокие требования предъявляются к качеству деталей, получаемых металлообработкой. При этом качество деталей определяется как шероховатостью поверхности детали, так и соответствием ее геометрических размеров и формы, ранее установленным на них допускам. Послед-

ние, в свою очередь, зависят от стабильности технологических процессов при их обработке и точности используемого металлообрабатывающего оборудования. Существенное повышение точности металлообработки и качество изготавливаемых деталей достигается в результате внедрения и применения приборов, датчиков, преобразователей для диагностики и контроля технологических процессов металлообработки. Такие технические средства должны обеспечивать контроль состояния режущего инструмента и параметров технологического процесса (режимов металлообработки рационального использования оборудования), а также качества изготавливаемой детали в процессе ее обработки.

По физической сущности явлений, положенных в основу приборов контроля параметров процесса металлообработки, последние могут быть подразделены на виброакустические, пневматические, электроконтактные, механические, оптические и оптико-электронные. Каждая из этих групп в разной мере развита и освоена промышленностью, однако, применимы они практически для всего технологического оборудования металлообрабатывающей промышленности. Наиболее перспективными для использования в условиях прецизионной металлообработки являются электроконтактные, оптические и оптико-электронные приборы, обладающие наивысшей точностью и быстродействием. Именно поэтому наиболее широкое внимание их развитию и практическому совершенствованию уделяется многими зарубежными фирмами и отечественными предприятиями. Ниже более подробно рассмотрены принципиальные схемы таких приборов, отмечены их конструктивные особенности и указаны возможные области применения.

1. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ

Использование первичных измерительных преобразователей, а также современных систем ЧПУ при наличии соответствующего сервисного программного обеспечения позволяет производить диагностирование заготовок, оценивать состояние применяемого инструмента и качество обрабатываемой детали. При этом управляющая программа наряду с технологическими данными получает дополнительную текущую информацию об инструменте и обрабатываемой детали. Для этого заготовку необходимо контролировать в рабочем положении, что позволяет

определить точку касания инструмента с заготовкой с достаточной технологичностью. Перемещение режущего инструмента в точку касания с заготовкой может быть ускоренным. Оно не контролируется чувствительным элементом преобразователя. Поэтому необходимо использовать измерительные преобразователи, не только фиксирующие момент врезания инструмента, но и позволяющие быстрое преобразование информации с целью применения решения для управления технологическим оборудованием.

Для связи с технологическим процессом обработки деталей и воздействия на технологический процесс в средства диагностики включены первичные измерительные преобразователи (датчики), предназначенные для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и хранения.

Измерительные преобразователи характеризуются чувствительностью, динамическим диапазоном, пределом и погрешностями преобразований.

Под чувствительностью преобразователя понимают отношение сигнала на выходе к вызывающему его изменению измеряемой величины. Различают абсолютную и относительную чувствительности. Абсолютная чувствительность $S = \Delta e / \Delta x$. Относительная чувствительность $S_0 = \Delta e / (\Delta x / x)$, где Δe — изменение сигнала на выходе; x , Δx — измеряемая величина и ее изменение.

Предел преобразования — наибольшее значение входного сигнала, который воспринимается измерительным преобразователем без искажений и повреждений. Под погрешностью измерений понимают отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины.

Кроме того, к надежности чувствительных преобразователей необходимо предъявить высокие требования, иначе при максимальной скорости хода движущихся частей станка могут возникнуть аварийные ситуации. Так, при механической обработке может возникнуть поломка, вызванная ошибочными командами, приводящими к столкновениям узлов и механизмов станка. При этом повреждения очень быстро распространяются на инструмент, станок, обрабатываемую деталь. В таких случаях факт поломки инструмента должен устанавливаться в течение нескольких миллисекунд, а подача мгновенно отключаться. Например, время для переключения подачи на станке зависит от целого ряда факторов: тормоз-

ных характеристик суппорта станка, зависящих от динамических характеристик привода подачи, контура заготовки, конструкции инструмента.


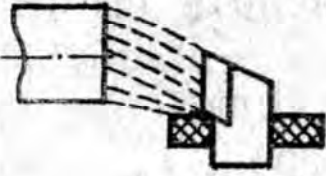
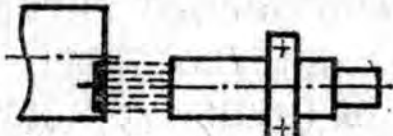


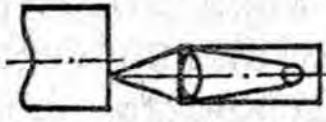
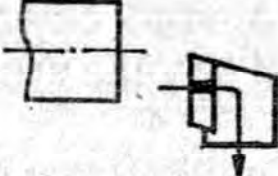
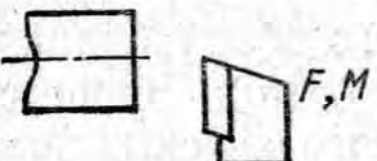
Скорость современных управляемых тиристорных приводов постоянного тока, используемых в металлорежущих станках, достигает 10 м/мин. Если предположить, что процесс торможения длится около 200 мс, то за это время суппорт пройдет путь около 33 мм.

Наименьшее расстояние a_{\min} , при котором необходимо подавать сигнал на включение торможения суппорта, приблизительно можно вычислить по формуле $a_{\min} = V_{б.х} (T_з + T_т/2)$, где a_{\min} — наименьшее расстояние, при котором происходит включение подачи; $V_{б.х}$ — скорость быстрого хода суппорта; $T_з$ — время запаздывания чувствительного элемента; $T_т$ — время от начала до конца торможения.

Если в качестве информационного сигнала чувствительного преобразователя в диагностических системах используют выходные сигналы (например, датчиков силы резания, крутящего момента или акустического шума и др.), то скорость сближения режущего инструмента с заготовкой должна быть значительно уменьшена. Максимальная скорость сближения инструмента с деталью определяется по формуле $V_{\max} = 0,8S_{\min}/(T_з + T_т/2)$, где S_{\min} — подача инструмента. Например, для измерительной системы, содержащей тензометрический датчик силы резания, постоянная времени $T_з$ которого меньше 1 мс, при подаче $S = 0,5$ мм/мин и постоянной привода 60 мс максимальная скорость сближения $V_{\max} = 0,8$ м/мин. При этом некруглость или биение детали могут приводить к таким соотношениям момента врезания, которые не допускают повышенной скорости подачи. Поэтому для создания технологических процессов металлообработки, гарантирующих надежность производства деталей заданного качества, необходимо иметь надежные датчики, которые регистрируют момент начала резания и дают информацию, по которой можно осуществлять необходимую коррекцию процесса в случае его отклонения от заданного.

В табл. 1 приведены схемы измерительных преобразователей фиксации момента врезания режущего инструмента в заготовку, используемых в различных системах диагностики технологического оборудования.

Известные системы диагностики процесса обработки основаны на измерении энергетических параметров резания: мощности, потребляемой станком, крутящего

Датчик приближения	Схема	Примечание
Индуктивный		От величины магнитного зазора между датчиком и деталью зависит значение электрического сигнала
		Система инструмент — деталь и станок образует замкнутый магнитный контур, изменяемым параметром в котором является воздушный зазор между инструментом и деталью
Емкостный		Приближение к детали приводит к изменению емкости, входящей в электрический колебательный контур
Пневматический или гидравлический		Деталь служит рефлектором для воздушной или жидкой струи и воздействует на изменение скоростного напора
Акустический		Если отраженная волновая энергия превышает пороговое значение, то происходит включение рабочей подачи
Фотоэлектрический		Отраженный свет преобразуется приемником в электрический сигнал. При превышении порогового значения включается рабочая подача
Контактный		Сигнал возникает при соприкосновении контактного штифта с деталью
Силовой		При повышении заданного порогового значения (сигнал от датчика силы резания или крутящего момента) происходит включение рабочей подачи

Датчик приближения	Схема	Примечание
Световой		Световой пучок источника света, который перемещается перед режущей кромкой вместе с инструментом, прерывается деталью и выдает сигнал на включение рабочей подачи
Акустический		Акустический шум, возникающий при соприкосновении с деталью, включает рабочую подачу

момента, составляющих сил резания и т. д. Возрастание энергетических параметров означает отклонение от нормального процесса резания и, в первую очередь, связано с затуплением или поломкой режущего инструмента. Однако возрастание мощности может произойти из-за роста припуска заготовки или твердости ее материала. Поэтому эти системы предназначены для диагностики при грубом отклонении технологического процесса от заданного. Для регистрации возникающих в процессе обработки сил резания, крутящего момента, мощности резания известны различные прямые и косвенные методы измерений.

В табл. 2 приведены схемы измерительных преобразователей для регистрации сил резания и крутящего момента, которые используются в устройствах диагностики и контроля технологических систем.

Чувствительные элементы для измерения крутящего момента и сил резания в большинстве случаев устанавливают на отдельных частях станка. Они воспринимают зависящие от силы изменения угла и длин, а поэтому должны обладать, с одной стороны, высокой жесткостью для того чтобы существенно не изменяться при динамическом действии, а с другой, — достаточной чувствительностью. Собственная частота чувствительного элемента должна быть выше, чтобы была возможность быстрого реагирования на такие возмущения как врезание или резкое изменение глубины резания.

Для измерения силы резания датчик должен располагаться возможно ближе к зоне резания. Механическое передаточное устройство, расположенное между зоной

Преобразователь	Схема	Примечание
<p>Датчик силы: На основе теплорезисторов</p>		<p>Деформация кольца ведет к изменению сопротивления наклеенных тензодатчиков</p>
<p>Пьезоэлектрический</p>		<p>Деформация пьезоэлектрических кристаллов приводит к возникновению электрических зарядов, которые усилителем преобразуются в пропорциональное электрическое напряжение</p>
<p>Магнитоупругий датчик сопротивления</p>		<p>Нагружение кольца изменяет магнитные свойства материала, а, следовательно, индуктивность катушки</p>
<p>трансформаторный датчик</p>		<p>Нагрузка изменяет электрическую связь между первичной и вторичной обмотками</p>
<p>Датчик крутящего момента: Магнитоупругий</p>		<p>Магнитоупругие датчики установленные в поворотной револьверной головке, выдают сигнал пропорциональный силе резания</p>
<p>Тензорезисторный</p>		<p>Скручивание изменяет магнитные свойства материала, а, следовательно, электрическую связь катушек I и II</p>
<p>Тензорезисторный</p>		<p>Элемент, работающий на скручивание наклеенных тензорезисторов, электрическое сопротивление которых изменяется в зависимости от приложенного момента</p>

Преобразователь	Схема	Примечание
Токовый		Крутящий момент при постоянном возбуждении поля пропорционален току якоря I двигателя главного привода

резания и чувствительным элементом, может неблагоприятно влиять на процесс измерения силы резания. В то же время, если в опорах шпинделя станка или на суппорте устанавливаются тензо- или пьезодатчики, измеряющие деформации, то происходит некоторое снижение жесткости станка, которое необходимо для увеличения большой чувствительности датчиков.

Более широкое распространение получили упруго-силовые системы диагностики, основанные на использовании магнитоупругого эффекта. Под магнитоупругим эффектом понимают изменение магнитных свойств твердого ферромагнитного тела вследствие других механических напряжений (растяжения, сжатия, сдвига или кручения), воздействующих на него. Если магнитоупругий активный сердечник катушки нагружается в продольном направлении с определенной силой, то длина его сокращается и соответственно модулю упругости изменяется его магнитная проницаемость, а также магнитный гистерезис и сопротивление утечки.

При постоянной напряженности магнитная индукция является функцией механического нагружения сердечника: $B = f(\sigma, H)$ и $\mu_r = 1 \cdot B/\mu_0 H$, где B — магнитная индукция; H — магнитная напряженность; μ_r — относительная проницаемость; σ — механическое напряжение.

Изменение проницаемости вследствие механического напряжения зависит от сопротивления катушки с магнитоупругим сердечником и определяется по формуле $R = R = j\omega L$, где $R = R_0 + R_V$ и $R_V = R_h + R_W + R_n$, или $R_V = K_h f \mu_r + K_W f^2 \mu_r + K_n f \mu_r$, где R_0 — сопротивление постоянного тока; R_V — сопротивление утечки; f — частота; μ_r — проницаемость; K — константа; h — гистерезисные утечки; W — утечки от вихревых токов; n — утечки последействия.

Индуктивность катушки $L = W^2 G_m = K \mu_r$, где W — число витков; G_m — магнитная проводимость. При этом следует учитывать, что как активная, так и реактивная составляющие сопротивления зависят от проницаемости μ_r .

Кроме того, при этом может использоваться и трансформаторный эффект для измерения силы. Если к первичной обмотке приложено постоянное питающее напряжение, то вторичная обмотка формирует выходное напряжение $U = U_1 (K_1 + KF)$, где U , U_1 — первичное и вторичное напряжение; K_1 — коэффициент передачи; K — постоянная; F — сила.

Построенные на магнитоупругом эффекте силоизмерительные преобразователи, используемые в диагностических системах, измерительные преобразователи обладают простой и надежной конструкцией, высокой выходной мощностью и широко применяются для контроля технологических процессов.

Для определения силы резания при металлообработке используются оптические, емкостные и индуктивные датчики силы, но из-за своей нелинейности и конструктивных сложностей они не нашли широкого распространения в системах диагностики технологических процессов.

Для повышения точности измерения сил и колебаний резания, а также их анализа широко применяются пьезоэлектрические преобразователи, т. е. преобразователи, в которых в качестве чувствительного элемента используются монокристаллические или поликристаллические материалы, обладающие пьезоэлектрическими свойствами.

Действие пьезоэлектрических измерительных преобразователей основано на использовании прямого пьезоэффекта, т. е. свойства некоторых материалов (пьезоэлектриков) генерировать заряд под действием приложенной к ним силы. При установке пьезоэлектрического преобразователя на исследуемом объекте он воспринимает вибрацию объекта. Вследствие стремления инерционного элемента сохранить состояние покоя пьезоэлемент деформируется от воздействия на него инерционной силы $F = ma$, где m — масса инерционного элемента; a — ускорение объекта. Деформация пьезоэлемента и возникающий при этом электрический заряд пропорциональны ускорению.

К основным преимуществам пьезоэлектрических преобразователей следует отнести: широкий диапазон рабочих частот; большие вибрационную и ударную проч-

ности; простоту конструкции; малую чувствительность к магнитным полям; возможность создания высокотемпературных преобразователей и преобразователей с малыми размерами и массой.

Основными недостатками пьезоэлектрических измерительных преобразователей являются большое выходное сопротивление; зависимость выходного сигнала от длины кабеля (при работе с усилителем напряжения) и невозможность измерения постоянной составляющей динамического процесса.

Для контроля вибраций, возникающих в процессе резания, используются преобразователи, обладающие устойчивостью, вибрационной и ударной прочностью, способностью длительное время работать в условиях непрерывного воздействия различных влияющих факторов.

Частотный диапазон пьезоэлектрических измерительных преобразователей определяют исходя из спектра частот вибрационного или ударного ускорения исследуемого процесса металлообработки. Коэффициент преобразования пьезоэлектрических измерительных преобразователей обратно пропорционален квадрату частоты его резонансных колебаний. Верхнюю границу спектра частот исследуемого технологического процесса определяют из выражения $\eta = 1/[1 - (f/f_0)^2]$, где f , f_0 — текущая и резонансная частоты соответственно, Гц.

Для измерения низкочастотных вибраций малого уровня ускорений необходимы преобразователи, обладающие высоким коэффициентом преобразования.

При этом следует учитывать, что на точность измерения влияют следующие факторы: способ и качество крепления преобразователя на объекте, возможность вибрации выходного кабеля, температура, переменные электрические и монтажные поля, механические деформации, акустические шумы, перепады давления, проникновение к токоведущим элементам измерительных преобразователей влаги или масла.

Вследствие того что пьезоэлектрические измерительные преобразователи малочувствительны к различным помехам электрического, акустического и механического происхождения, они широко применяются в системах диагностики режущего инструмента.

Износ режущего инструмента оказывает существенное влияние на параметры процесса резания (силы, температуру, вибрации и т. д.), а также на выходные показатели (прочность, качество поверхности). Измерение износа

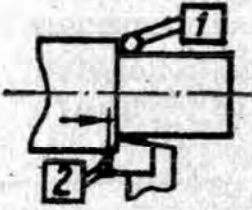
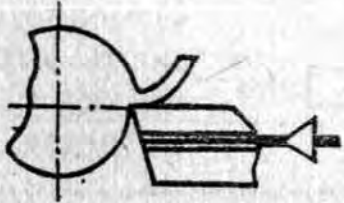
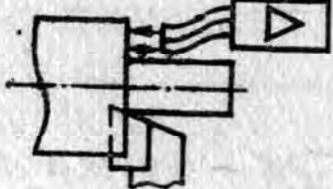
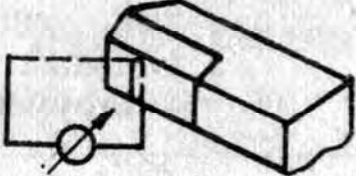
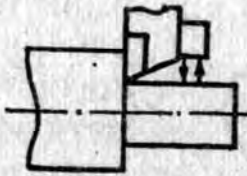
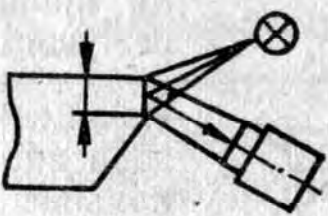
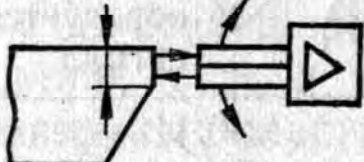
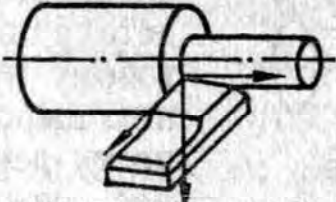
режущего инструмента может осуществляться прямым или косвенным методом. В табл. 3 приведены основные схемы измерительных преобразователей контроля износа режущего инструмента.

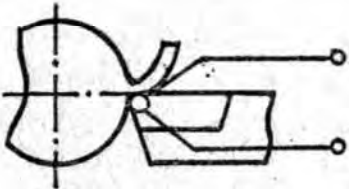
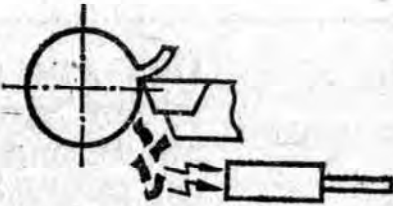
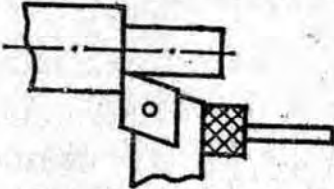
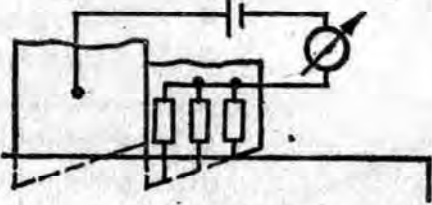
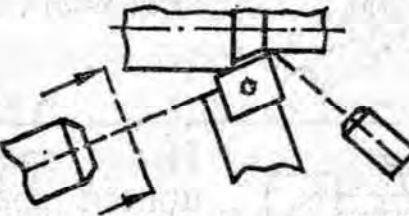
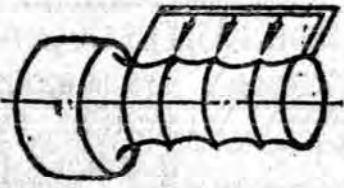
Наиболее распространенный критерий затупления, который свидетельствует о необходимости прекращения работы инструмента и о его переточке — ширина изношенной контактной площадки по его задней поверхности. За меру износа обычно принимают размер изношенной площадки по задней поверхности и выбирают его в пределах от 0,1 до 1 мм.

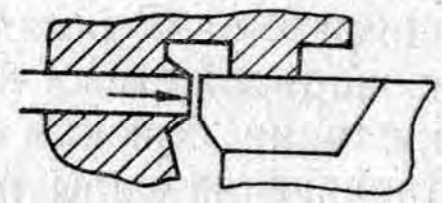
Методика определения критерия затупления основана на систематическом измерении во время работы величины h_z по задней поверхности. Измерения производят в момент прерывания резания или непосредственно в процессе резания. Использование в системах автоматического управления процессом обработки устройств, связанных с необходимостью прерывания процесса резания для осуществления износа инструмента, не дает эффекта из-за значительного запаздывания формирования управляющего сигнала по полученной в результате измерений информации.

Поэтому наибольший интерес представляют устройства, измеряющие износ инструмента непосредственно в процессе резания. К ним относятся оптические устройства с использованием телекамер и средств обычной и волоконной оптики; электрические и радиоактивные измерительные преобразователи. При этом они могут измерять износ инструмента в пределах 0,08...0,1 мм с точностью $\pm 0,01$ мм, а лазерные устройства — в пределах 0,01...0,4 мм с точностью $\pm 0,001$ мм. Однако, несмотря на высокую точность измерения, значительная сложность конструкции затрудняет их широкое использование.

Для измерения износа режущего инструмента используют электрические преобразователи, сопротивление которых изменяется в зависимости от ширины площадки износа. При этом на предварительно изолированную с помощью термоустойчивого слоя заднюю поверхность режущего инструмента наносится слой электропроводящего материала. Вследствие износа резца уменьшается длина этого слоя, что приводит к уменьшению электрического сопротивления нанесенного материала, которое регистрируется измерительным прибором. Метод можно использовать при обработке диэлектрических материалов.

Датчик износа	Схема	Примечание
Щуповой		Щупы 1 и 2 при смещении кромки (износе) режущего инструмента формируют различные сигналы. Их разность пропорциональна износу
Гидравлический		При изменении расстояния между деталью и соплом, работающими по принципу сопла-заслонки, изменяется скоростной напор воздуха жидкости пропорционально износу
Оптический		Изменение расстояния между световым выходным отверстием оптического волокна и деталью приводит к изменению интенсивности отраженного света
Резисторный		Электрическое сопротивление режущей кромки зависит от ее износа
Импульсный		Смещение режущей кромки вызывает изменение времени следования импульса на участке датчик-деталь-приемник
Телемониторный		Измерение износа на экране телевизионного устройства регистрируется в виде световой полосы
Опτικο-волоконный		Износ измеряется движущимся световым пучком и преобразуется им в электрический сигнал
Динамометрический		По изменению величин составляющих силы резания можно судить о состоянии износа режущего инструмента

Датчик износа	Схема	Примечание
Температурный		Износ инструмента эмпирически определяется по изменению температуры резания
Радиоактивный		Радиоактивный слой инструмента уменьшается пропорционально износу. Измеряется радиоактивность стружки или оставшегося радиоактивного слоя на резце
Акустический		По определенным частотам и амплитудам можно судить об износе режущего инструмента
Специальный измерительный резец		Слоистый резец изнашивается подобно режущему инструменту. Регистрируется аналоговый или ступенчатый сигнал, пропорциональный износу режущего инструмента
Вращающийся		Свободная поверхность ощупывается со специальной измерительной позиции вращающимся датчиком (пневматическим, оптическим, индуктивным или емкостным). Период следования сигнала пропорционален износу режущего инструмента
Фотоэлектрический		Изменение клиновидного зазора вне резца, пропорциональное износу, регистрируется светодионом и преобразуется в электрический сигнал
Рефлекторный		Измерение износа осуществляется путем анализа шероховатости поверхности детали по отраженному световому пучку, и по изменению шероховатости поверхности детали оценивают износ режущего инструмента

Датчик износа	Схема	Примечание
Контактный		Инструмент в специальной измерительной позиции обмеряется механической или электрической подвижной измерительной системой, и по смещению режущей кромки определяют износ реза
Пневматический		Изменение скорости потока воздуха в пневматическом устройстве, работающем по принципу сопла-заслонки пропорционально износу режущего инструмента
Оптико-электронный		По отраженному от поверхности детали световому пучку судят о величине износа реза

С помощью радиоактивных преобразователей измеряется объемный износ режущего инструмента. Для этого инструмент облучается нейтронами или заряженными частицами. В процессе резания небольшие радиоактивные частицы материала инструмента отходят вместе со стружкой. Стружка перемещается в поток масла, проходящий через измерительную головку, где измеряется уровень ее радиоактивности. Проблема защиты от радиоактивности и необходимость сбора стружки не позволяют широко применять радиоактивные преобразователи.

При прямых методах измерения износа результаты измерения являются более достоверными, чем при определении износа через функционально связанные с ним параметры процесса резания. В то же время в процессе непосредственного контакта режущего инструмента с заготовкой измерение износа этими методами трудно реализовать. Поэтому наибольшее распространение получили косвенные методы измерения, при которых определяют параметры, отражающие физическую природу изнашивания и связанные с износом определенными функциональными зависимостями.

Известно, что с износом реза увеличиваются силы резания, происходит более интенсивное тепловыделение

в зоне резания, изменяется характер вибраций и происходят другие явления. Зависимость каждого из этих явлений от износа лежит в основе косвенного метода.

В некоторых случаях превалирующее влияние на износ инструмента оказывает контактное давление между задней поверхностью резца и материалом заготовки. Тогда в качестве параметра косвенного измерения износа резца могут быть использованы составляющие силы резания, зависящие от ширины фаски износа. Для измерения составляющих силы резания используются тензометрические, пьезоэлектрические и другие преобразователи. Экспериментально получены линейные зависимости между составляющими силами резания и элементами износа (в основном, шириной фаски по задней грани) с коэффициентом корреляции, близким к 1. Таким образом, приращения составляющих силы резания могут являться мерой приращения износа, а с учетом времени — мерой скорости износа.

Возрастание силы резания с ростом износа режущего инструмента (особенно в направлении подачи) вызывает его вибрацию, интенсивность которой зависит от трения между режущим инструментом и обрабатываемой поверхностью заготовки. Установлено, что мощность сигнала, регистрируемая пьезоэлектрическим акселерометром и определенная при анализе спектра, есть линейная функция от ширины ленточки износа, причем отношение сигнала для нового и изношенного резцов составляет примерно 1 : 10.

Широкое применение находят акустические преобразователи, которые воспринимают сигналы, возникающие при выделении энергии в результате процессов пластической деформации и разрушения при резании и распространяющиеся в режущем инструменте и заготовке (частоты акустических импульсов превосходят частоты шумов от подвижных узлов станка и вибраций). Достоинствами преобразователей являются высокая частота сигналов, дающая возможность отсеивать с помощью фильтров обычные низкочастотные шумы, простота крепления преобразователя к инструменту, несложность конструкции и сравнительная легкость обработки получаемых сигналов.

Среди косвенных методов определения износа режущего инструмента наибольшее распространение получил метод, основанный на измерении температуры режущей кромки резца термоэлектрическим и термохимическими способами. По первому способу температуру режущей

части инструмента определяют с помощью искусственной, полуискусственной и естественной термопар. Метод измерения температуры с помощью естественной термопары нашел наибольшее распространение из-за высокой чувствительности, практически безынерционности и надежности. К недостаткам метода можно отнести сложность тарирования выходного сигнала термопары и необходимость помехозащиты полезного сигнала.

Метод измерения температуры резания с помощью пирометра позволяет определять распределение температуры на поверхности инструмента. К недостаткам метода относятся значительная интерференция тепловых излучений в контактной зоне, влияющая на полученный результат, а также погрешность калибрования пирометра.

Для измерения температуры при резании (например, токарной обработке) используется оптический пирометр, максимальная нестабильность результатов измерений которого при этом составляет не более $\pm 3\%$.

Термохимические методы измерения температуры не получили пока широкого применения.

В процессе обработки из-за размерного износа резца расстояние между резцедержателем и обработанной поверхностью уменьшается. Контроль за изменением указанного расстояния осуществляется с помощью электрического и пневматического преобразователей, а также ультразвукового устройства. Электрический преобразователь устанавливается на резцедержателе, и его щуп контролирует непосредственно обработанную поверхность. Достоинством метода измерения является то, что фиксируется смещение обработанной поверхности, а не режущей кромки инструмента. Однако температурное расширение инструмента, износ щупа из-за его трения о деталь, задиры на обработанной поверхности, вибрации заготовки и другие вредные явления затрудняют автоматическое измерение.

Пневматический преобразователь износа измеряет расстояние между торцевой поверхностью измерительного сопла и действующей в качестве заслонки поверхностью обрабатываемой детали. В процессе резания по мере износа режущего инструмента указанное расстояние изменяется, соответственно изменяется и давление в измерительной камере, по которому судят о величине износа. Преимуществом преобразователя является возможность измерения износа резца в непосредственной близости от режущей кромки, недостатком — влияние на показания

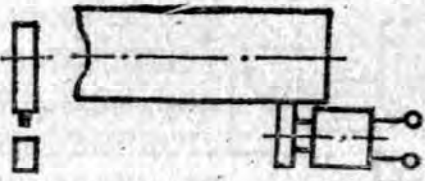

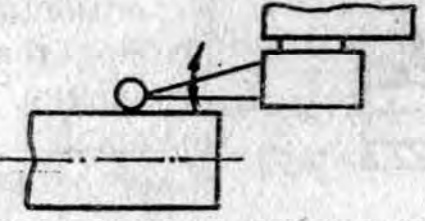
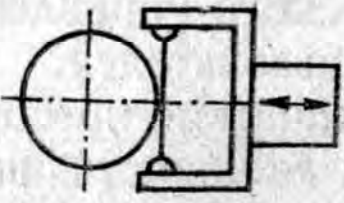
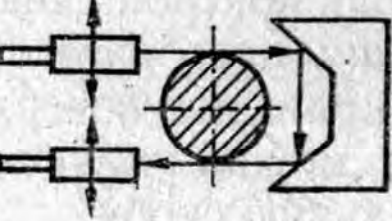
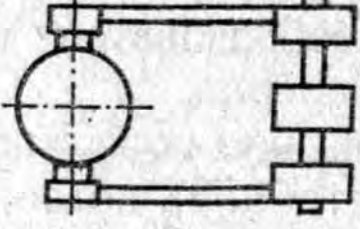
устройства кривизны поверхности обрабатываемой детали, ее шероховатости, а также точности изготовления измерительных сопл.

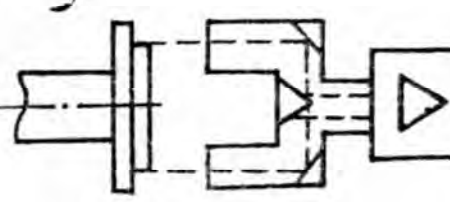
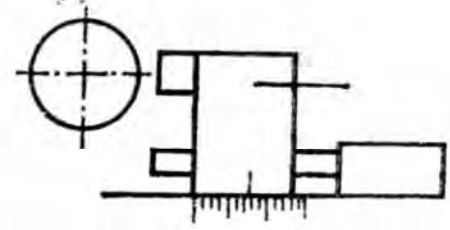
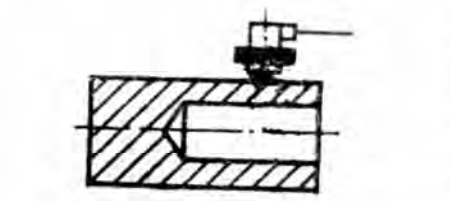
Ультразвуковое устройство основано на использовании ультразвукового генератора, устанавливаемого на резцедержателе. В процессе резания измеряется время прохождения импульсов, отраженных от обработанной поверхности, которое уменьшается по мере увеличения износа резца. К недостаткам устройства можно отнести сложность его конструкции.

При чистовой обработке износ инструмента можно контролировать по изменению шероховатости обрабатываемой поверхности. Используемые при этом оптические преобразователи регистрируют изменение отражательной способности обрабатываемой поверхности, вызванное затуплением инструмента. Сложность конструкции и малая помехозащищенность препятствует широкому их использованию.

Для контроля выходного параметра процесса резания (диаметра детали) используются в основном (табл. 4) два типа измерительных преобразователей — с непосредственным контактом измерительного наконечника с обработанной поверхностью детали (виброгенераторные и с использованием обкатного измерительного ролика) и бесконтактные (пневматические и оптические). При этом наибольшая точность контроля размера и формы вращающейся детали при использовании виброгенераторных и оптических преобразователей может быть обеспечена при двухдетекторной схеме измерения, в результате чего исключаются влияние на точность измерения тепловых и силовых деформаций основных элементов технологической системы, а также влияние геометрической неточности станка. Кроме того, преимуществом двухдетекторной схемы измерения является то, что погрешность измерения, вызванная неточностью взаимного расположения преобразователя и шпинделя, может быть скомпенсирована усреднением результатов измерения, выполненных в диаметрально противоположных точках детали.

Особенности процесса токарной обработки (наличие стружки, СОЖ), а также необходимость работы на повышенных скоростях резания затрудняют широкое применение контактных методов измерения. Это вызвано, в первую очередь, быстрым износом измерительных наконечников, а также влиянием на точность измерения формы измерительных наконечников силы его прижатия. Это

Датчик	Схема	Примечание
Фрикционный		Фрикционный диск, связанный с импульсным датчиком, в зависимости от обхода детали выдает пропорциональное периметру детали число импульсов
Ультразвуковой		Импульс, излучаемый датчиком ультразвуковых волн, огибает деталь и генерирует в приемнике при каждом обходе сигнал. Время между импульсами на приемнике пропорционально периметру детали
Щуповой		Измерение производится индикатором контакта (щупом) с автоматическим управлением от системы ЧПУ, или автономного монитора
Фотоэлектрический		Теневой односторонний метод состоит в том, что ограниченный пучок света падает на дифференциальный фотодиод. Измеряя перемещение вилки, определяют размеры детали
Теневой		Теневой двусторонний метод состоит в том, что пучок излучения лазера ощупывает деталь с помощью зеркала с двух сторон. Фотоприемник оценивает отклонение от установленной величины, по которому определяют размеры детали
Дифференциальный		Измерительная система представляет дифференциальное измерительное устройство в форме вилки. Точное измерение детали обеспечивается пневматическими, емкостными, измерительными и акустическими датчиками

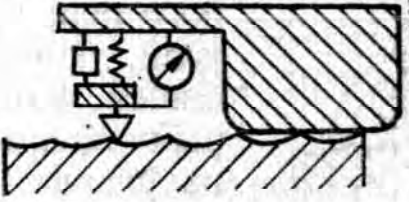
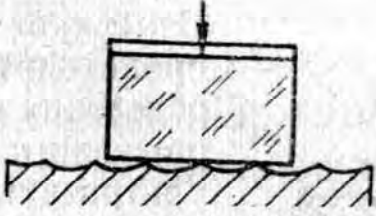
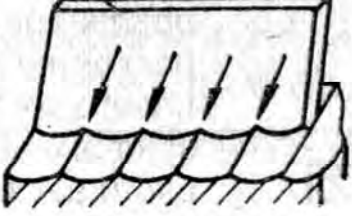
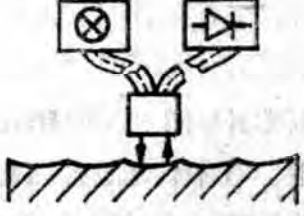
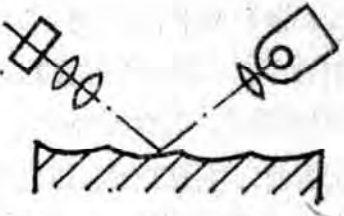

Датчик	Схема	Примечание
Оптический		<p>Оптическая система в форме вилки соединена с видеоусилителем и телевизионной приемной трубкой. Расстояние между строками дает численную величину измерения</p>
Контактный		<p>Контактная подвижная измерительная система с сервоприводом</p>
Акустический		<p>Измерение толщины стенок с помощью ультразвука. Измеряется время распространения импульса между внешней и внутренней стенками детали</p>

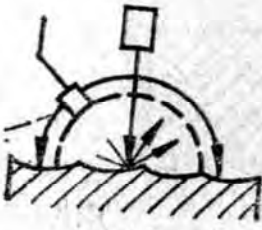
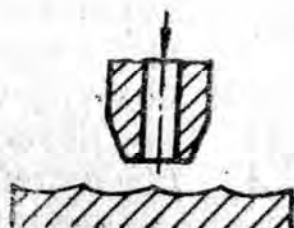
привело к необходимости более широкого использования в системах автоматического управления бесконтактных измерительных преобразователей.

Бесконтактные пневматические преобразователи типа сопло-заслонка имеют ряд достоинств: надежность в работе, нечувствительность к вибрациям, простота конструкции и технологичность их изготовления, самоочистка преобразователей и др. При использовании пневматических преобразователей для контроля диаметра вращающейся детали на показания преобразователей в значительной степени влияет кривизна поверхности обрабатываемой детали, которую можно уменьшить, используя пневматическую измерительную скобу.

В отличие от пневматических бесконтактные оптические преобразователи обладают рядом преимуществ: возможностью осуществления контроля в непосредственной близости от зоны резания и расположением конструктивных элементов преобразователя на значительном расстоянии от объекта измерения.

Для контроля за состоянием поверхностного слоя деталей существуют методы (табл. 5), позволяющие оценить качество параметров в основном только после окончания

Метод	Схема	Примечание
Контактный		<p>Контактная система щупа. Колебания иглы, движущейся по поверхности, индуктивным или емкостным способом преобразуются в электрический сигнал</p>
Емкостный		<p>Поверхность и измерительный электрод образуют конденсатор, емкость которого зависит от вида поверхности. Измерения емкости дает возможность оценить качество поверхности</p>
Световой		<p>Ограниченный световой пучок освещает поверхность под углом. Искажение пучка, зависящее от микронеуровностей, определяется и оценивается линейкой фотодиодов</p>
Оптоволоконный		<p>От источника света пучок с помощью волоконной оптики, отражаясь от поверхности детали, попадает на фотодиод, где регистрируется сигнал, по которому оценивают шероховатость</p>
Фотометрический		<p>Светуправляемая галогенная лампа через систему линз освещает место измерения. Отраженный пучок попадает на фотодетектор и в зависимости от его интенсивности определяется шероховатость поверхности</p>
Лазерный		<p>Отраженный от поверхности лучом лазера воспринимается измерительным фотэлементом, по величине сигнала которого определяют шероховатость поверхности</p>

Метод	Схема	Примечание
Оптический		Пучок лазера, установленного перпендикулярно к детали, попадает на вращающийся фоторезистор, который оценивает отраженное излучение, определяя таким образом шероховатость поверхности
Акустический		Измерение шероховатости происходит в результате определения интенсивности отраженного от поверхности ультразвукового пучка
Пневматический		Измерительное сопло, установленное на определенном постоянном расстоянии от поверхности детали, образующих систему сопло-защлонка, в зависимости от скорости потока определяется шероховатость поверхности

обработки. Несмотря на высокую точность, эти методы обладают рядом недостатков, так как не дают возможности построения автоматизированных систем активного контроля качества с целью обеспечения заданных параметров физико-механического состояния поверхности обрабатываемой заготовки. Так, контактные (например, с помощью индуктивного щупа) методы измерения мало пригодны для использования в автоматическом режиме измерения.

Поэтому для осуществления автоматического контроля используют обработанную поверхность, как один из элементов емкостного датчика, и измеряя емкость между ней и пластиной можно проконтролировать качество поверхности. Для объективного сравнения необходимо производить калибровку по эталонному образцу и сравнивать эти измерения в процессе обработки детали.

При использовании лазерных источников и сканирующих систем измерения оптическая схема измерения упрощается и может найти применение для автоматического

контроля качества поверхности, но при этом их применение затруднено в связи с применением смазочно-охлаждающих сред.

Для повышения надежности измерения качества поверхности и точности обработки применяют акустические методы. Для этого импульсно-звуковой датчик устанавливают в зоне режущей пластины и используя смазочно-охлаждающую среду как проводник звуковых импульсов, которые рефлектируются от поверхности детали, контролируют уровень отклика.

Как правило, все используемые в автоматических системах преобразователи подключаются к микропроцессорам, в которых измерительная информация перерабатывается, и результаты измерения сравниваются с предварительно заданными. При этом принцип работы средств контроля и диагностики основан на анализе какого-либо параметра процесса резания (уровня виброакустического сигнала) потребляемой мощности, крутящего момента, составляющих усилий резания, времени резания и врезания, сравнения этих параметров с допустимыми границами их изменения и принятия решения о продолжении обработки, остановке станка, смене инструмента и т. п.

Для надежного функционирования средств контроля и диагностики необходимо определить критерии отказа инструментов различных типов в различных областях обработки, а также допустимые границы изменения контролируемых параметров.

Поэтому оперативность диагностики достигается, в первую очередь, за счет использования информации, связанной с физико-механическими характеристиками узлов станочных модулей (изменениями электрических и магнитных свойств технологической системы, теплового режима ее работы), а также контроля ограничительных параметров процесса резания (стойкости ресурса инструментов, геометрической точности узлов технологического оборудования). Для регистрации данных источников информации преимущество отдается так называемым датчикам естественной обратной связи, представляющим модернизированные или усовершенствованные узлы гибкого производственного модуля (например, встроенные в подшипники шпинделя тензодатчики для регистрации нагрузки на опоры, средства контроля за изменением нагрузки приводных электродвигателей, различные варианты динамометрических резцедержателей, базовые корпусные детали станка, регистрирующие тепловые

деформации). Преимуществом данных устройств является компактность, надежность в работе, сохранение технологических возможностей оборудования.

2. ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

К контролируемым параметрам режущего инструмента относятся ширина ленточки износа, расстояние от вершины режущего инструмента до постоянной базы, уровень вибраций, температура, остаточная радиоактивность. Параметрами, характеризующими взаимодействие режущего инструмента со стружкой относительно обрабатываемой детали, являются следующие: длительность цикла обработки, сила резания, крутящий момент вращения детали или инструмента, мощность, потребляемая при обработке, вибрации и звуковые колебания, ЭДС резания и электрическое сопротивление зоны контакта «инструмент — обрабатываемая деталь» [4; 5].

На основе анализа состояния средств контроля в действующем парке современного металлообрабатывающего оборудования в работе [5] сформирован ряд основных направлений по созданию эффективных подсистем автоматической диагностики процессов металлообработки. К ним относится, в первую очередь, обеспечение измерения скорости износа и условий работы инструмента. При автоматическом контроле износа инструмента производительность обработки повышается на 40 %, а при контроле, позволяющем предотвратить поломки инструмента, — на 30 %. В связи с этим необходимо разрабатывать модели износа инструментов, методы непосредственного измерения скорости износа и критерии их пригодности.

Критерий износа, который определяет необходимость автоматической смены инструмента, зависит от вида выполняемой обработки, материалов инструмента и обрабатываемой детали и др. К таким критериям относятся резкое возрастание размерного износа, увеличение шероховатости поверхности обрабатываемой детали, силы и температуры в зоне резания сверх допустимых пределов и т. д. В период эксплуатации размерный износ можно прогнозировать. В то же время различные виды поломок режущего инструмента чаще всего возникают случайно, не поддаются прогнозированию и наиболее опасны для работы металлорежущих станков и обрабатывающих

центров. Учитывая вышеизложенное, необходимо в условиях функционирования ГПС внедрять подсистемы автоматического контроля (рис. 23), которые решают задачи диагностики состояния режущего инструмента. Функции обработки информации в подсистеме автоматического контроля могут быть реализованы либо на микро-

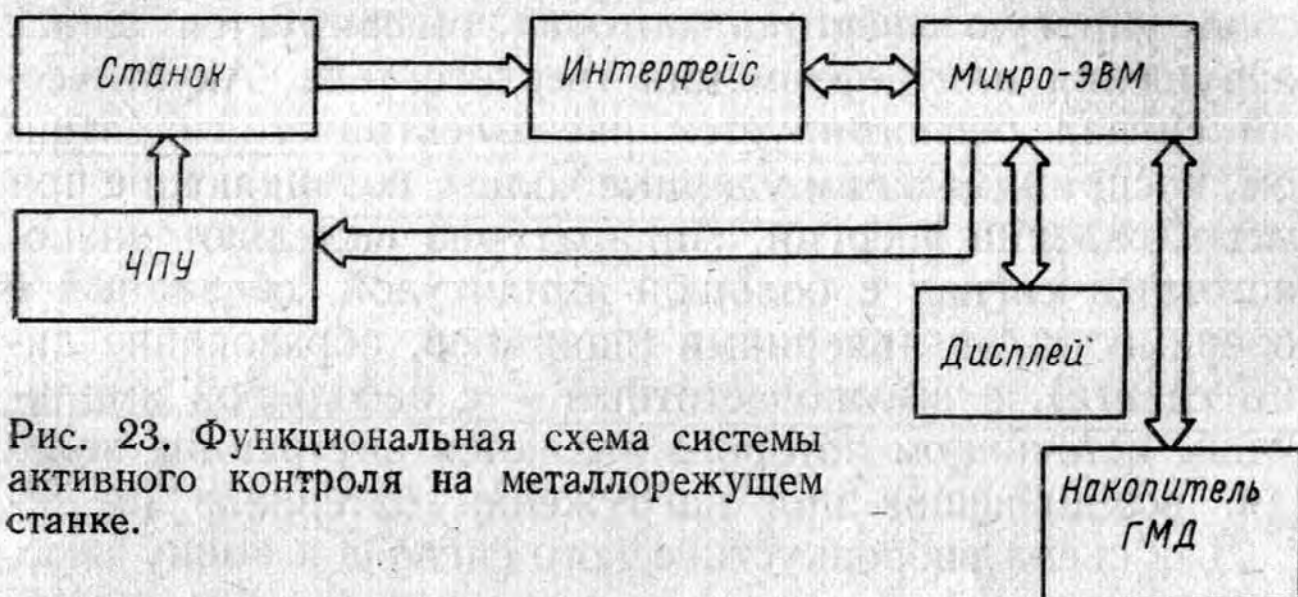


Рис. 23. Функциональная схема системы активного контроля на металлорежущем станке.

ЭВМ системы ЧПУ, либо на дополнительной микро-ЭВМ (вариант локальной подсистемы контроля).

Наиболее распространенным методом контроля состояния инструмента в процессе резания является метод непрерывного или через короткие промежутки времени

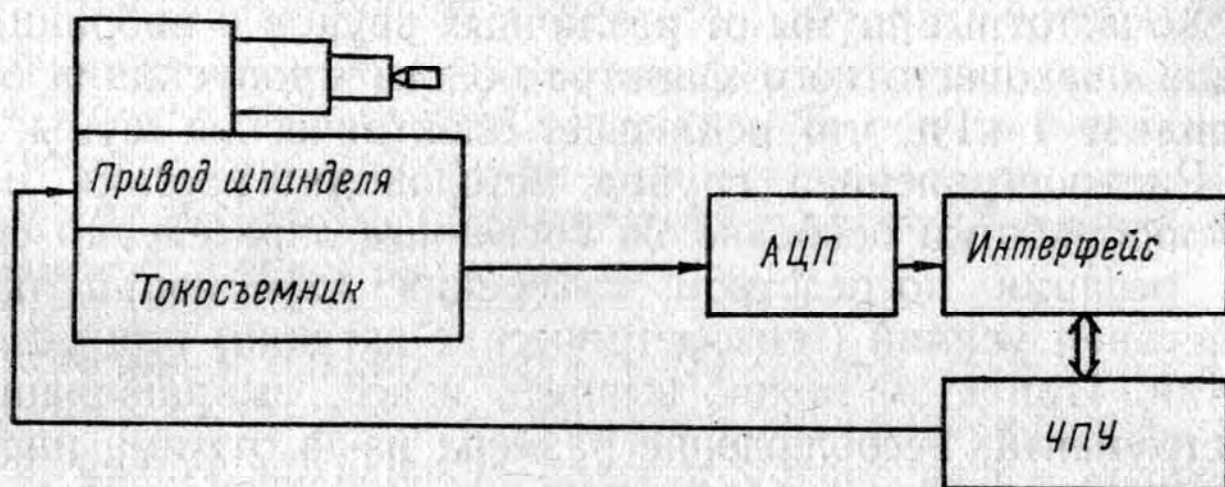


Рис. 24. Функциональная схема системы контроля нагрузки привода главного шпинделя

(для каждой детали) измерения текущих параметров приводных электродвигателей. Измерительные преобразователи, установленные на электродвигателях, регистрируют изменения тока нагрузки и через аналого-цифровой преобразователь (АЦП) передают информацию для обработки в микро-ЭВМ (рис. 24). Информативность и надежность метода во многом зависит от полноты и точности статистических данных о взаимосвязи текущих

параметров энергопотребления приводных электродвигателей с режимами резания всех применяемых инструментов.

Целый ряд работ, известных в научно-технической литературе, посвящен применению виброакустического излучения для контроля состояния режущего инструмента. Виброакустическое излучение (эмиссия) представляет собой упругую энергию, которая генерируется зоной разрушения или деформации твердого тела. Акустический сигнал регистрируется пьезоэлектрическим датчиком, воспринимающим ударные волны, возникающие при высвобождении энергии. Аппаратурно выделяют низкочастотный сигнал с большой амплитудой, связанный с поверхностными явлениями (например, образование линий сдвига), и высокочастотный — с небольшой амплитудой, источником которого являются внутренние явления, возникающие при нагружении материала [6; 8].

Для съема виброакустического сигнала к концу хвостовика инструмента прикрепляется пьезоэлектрический датчик резонансной собственной частотой 0,5 МГц. Выходной сигнал датчика усиливается соединенными последовательно предварительным и основными усилителями, а также фильтруется с помощью установленных в усилителе полосовых фильтров. Для верхних частот полоса пропускания выбирается равной 100 кГц, чтобы подавить низкочастотные шумы от различных звуков и вибраций, а для низкочастотного фильтра полоса пропускания составляет 1 кГц, что исключает электрические шумы.

Распространенная группа методов диагностики металлообработки основана на косвенном определении силы резания посредством измерения деформаций под действием усилий (тензометрические датчики) или ускорений. При этом можно выявить износ, выкрашивание инструмента, несоблюдение размера из-за отжима инструмента, т. е. влияние факторов, которые увеличивают усилие резания.

Для измерения силы резания наиболее эффективно используют пьезоэлектрические активные или пассивные датчики, включаемые в мостик Уинстона в виде омических сопротивлений (пьезоэлектрические датчики) или индуктивностей, в которых линейное смещение ферритного стержня, изменяющего индуктивность катушки, преобразуется в электрический сигнал. В табл. 6 приведены основные технические характеристики некоторых выпускаемых промышленностью пьезопреобразователей, предназначенных для регистрации виброакустических

сигналов и измерения силы резания при металлообработке.

Силу резания или ее составляющие можно измерить пассивными датчиками, встроенными в резец или в резцедержатель, однако при этом увеличивается стоимость инструмента и усложняется его смена.

Все большее распространение в системах автоматического контроля процесса металлообработки получают

Таблица 6

Преобразователь	Параметры преобразований							
	K_{UU} , дБ	f_{UU} , МГц	Δf_{UU} , МГц	$\bar{\theta}_1$, град	f_p , МГц	f_a , МГц	$C_{\text{э}}^p$, пФ	$C_{\text{э}}^a$, пФ
П111-1,25	-20	1,2	0,95	1	0,75	1,3	2210	1250
П111-2,5	-23	2,1	1,3	0,5	1,7	2,55	1710	1320
П-5,0	-32	4,4	4,6	1	3,5	4,6	1210	1010
П121-1,25-30°	-29	1,3	0,4	37	1,1	1,5	2000	780
П121-1,25-40°	-27	1,35	0,32	50	0,86	1,4	2600	1300
П121-1,25-50°	-24	1,3	0,4	60	1,1	1,5	2650	1210
П121-2,5-30°	-37	2,8	1,1	36	2,5	3,2	2200	950
П121-2,5-40°	-34	2,9	0,9	50	2,7	3,4	2400	1170
П121-2,5-50°	-35	2,9	1,1	62	2,6	3,4	2215	1030
П121-5,0-40°	-45	5,7	2,6	51	5,3	6,6	2710	1380
П121-5,0-53°	-46	5,3	2,3	67	5,0	6,3	3660	1290
П121-5,0-55°	-43	5,5	2,4	68	5,0	6,4	3120	1350

Примечание. K_{UU} — передаточная функция (функция по напряжению); f_{UU} — частота, при которой $K_{UU} = \max$; Δf_{UU} — полоса пропускания; $\bar{\theta}_1$ — ширина основного лепестка диаграммы направленности при излучении; f_p — резонансная частота; f_a — антирезонансная частота; $C_{\text{э}}^p$ — емкость при резонансе; $C_{\text{э}}^a$ — емкость при антирезонансе

оптические и оптико-электронные методы, позволяющие получать изображение освещенной зоны износа режущего инструмента, когда он не находится в контакте с заготовкой. На рис. 25 показана принципиальная схема оптико-электронного датчика, в котором оптической системой формируется изображение ленточки износа на щели, за которой находится фотоприемник. Длительность импульса фотосигнала зависит от ширины ленточки износа и скорости перемещения инструмента. Измерение длительности импульса фотосигнала осуществляется путем преобразования «время — код», для чего по переднему фронту фотосигнала включается счетчик высокочастотных импульсов. При увеличении скорости резания уменьшается длительность одного сигнала, при этом

общее число импульсов за определенный период времени при данном номинальном значении ленточки износа постоянно. Следует отметить, что нормальному функционированию датчиков подобного типа может мешать стружка, попадающая в зону контроля, поэтому измерение необходимо выполнять после окончания (или в перерывах) процесса металлообработки.

Оптические датчики с использованием световодов обеспечивают подведение освещающего пучка излучения непосредственно в зону резания от источника и об-

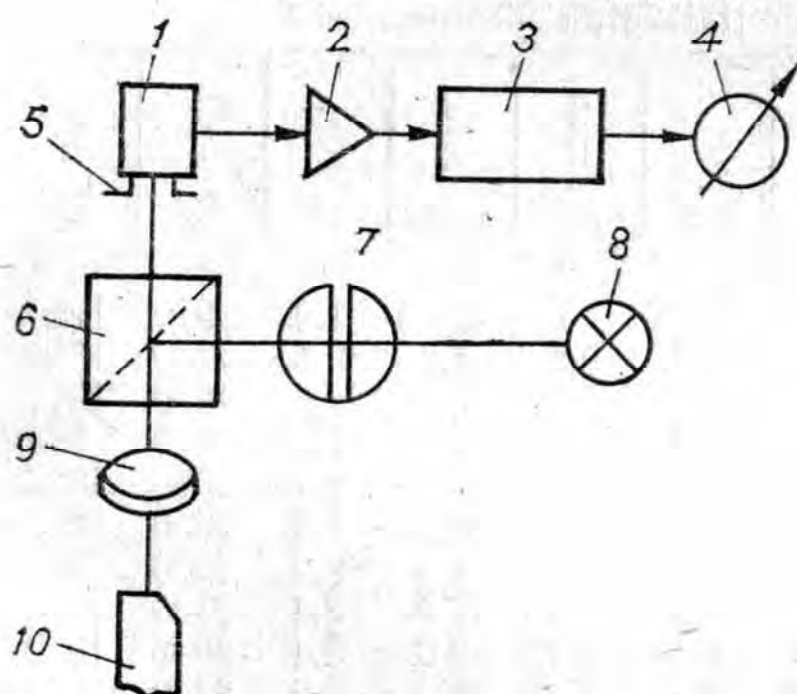


Рис. 25. Принципиальная схема оптико-электронного датчика режущего инструмента:

1 — фотоприемник; 2 — усилитель; 3 — преобразователь; 4 — индикатор; 5 — щель; 6 — светоделитель; 7 — конденсор; 8 — источник излучения; 9 — объектив; 10 — режущий инструмент

ратно — к приемнику отраженного света. При этом точность измерения размерного износа достигает $\pm 0,01$ мм в диапазоне 0,1...0,8 мм.

Известно несколько методов контроля состояния режущего инструмента по свойствам сходящей в процессе резания стружки. Например, контроль по температуре осуществляется с помощью фотодиодов, работающих в инфракрасной области.

Весьма информативным источником для контроля процесса металлообработки является скользящий контакт режущего инструмента с обрабатываемой деталью. Так, ЭДС, которую можно измерять в режиме постоянного и переменного токов, считают одним из наиболее стабильных сигналов процесса металлообработки. Для измерения ЭДС на шпинделе станка устанавливают токосъемник, электрически соединенный с первым входом измерительного преобразователя, второй вход которого соединяется с режущим инструментом, не требующим электрической изоляции, так как сопротивление шпиндельных подшипников значительно больше сопротивления скользящего контакта. ЭДС резания как диагностический сигнал можно использовать в большом диапазоне режимов резания, так как температура заготовки практически не влияет на ее размер.

Об износе режущего инструмента можно судить по абсолютному значению постоянной составляющей ЭДС резания для нового и затупленного инструмента, по значению которой можно определять смещение верхней скоростной границы зоны наростообразования.

Таблица 7

Характеристика	ПН-03	ПН-03П	ПН-03Л	ПН-03ЛП
Наибольшее перемещение, мм:				
каретки		400		
измерительной головки		150		
Наибольший диаметр устанавливаемого инструмента, мм		300		
Наибольшая контролируемая длина инструмента, мм		320		
Дискрета измерительной каретки, Н, не более		0,001		
Точность линейных координатных перемещений, мм:				
каретки		0,010		
измерительной головки		0,005		
Метод измерений	Кон- тактный	Визи- рова- ние опти- ческим проек- тором	Кон- тактный	Визи- рова- ние опти- ческим проек- тором
Разрешающая способность оптической системы в центре экрана проектора линий, мм		100		
Визирование режущей кромки	Контак- тным методом	Опти- ческим проек- тором	Контак- тным методом	Опти- ческим проек- тором
Механизм отсчета		Цифровая индикация		
Габаритные размеры	1150× ×920× ×1400	1150× ×920× ×1460	1250× ×920× ×1400	1250× ×920× ×1460
Масса прибора, кг	750	760	770	780

Приборы предварительной настройки инструмента моделей ПН-03, ПН-03П, ПН-03Л, ПН-03ЛП предназначены для предварительной настройки инструмента для станков типа «обрабатывающий центр» сверлильно-фрезерно-расточной группы, а также для контроля фактических размеров инструмента по длине и диаметру (табл. 7). Указанные приборы имеют горизонтальную компо-

новку на базе стола СПН, который оснащен двухкоординатной отсчетно-измерительной системой на индуктоси-нах с цифровой индикацией. На литом основании стола расположена каретка с измерительной головкой, на кото-рой установлен измерительный наконечник для моделей ПН-03 или проектор для моделей ПН-03П. Для прибора ПН-03Л используется модификация стола СПН-Л, из-мерительная система которого имеет блок связи с УВК.

Принцип измерения и настройки инструмента заклю-чается в следующем. Инструмент устанавливают и за-крепляют в коническом гнезде шпинделя. Измерительная система прибора должна быть выставлена на «нуль», т. е. зафиксированы расстояния соответствующих кромок измерительного наконечника (или перекрестия проек-тора) от выбранных «нулевых положений». Для приве-дения измерительной системы в «нулевое положение» прибор комплектуется эталонной оправкой, на которой указаны фактический размер контрольного диаметра и расстояние от базового торца. Поворот шпинделя с ин-струментом позволяет устанавливать режущие кромки на наибольшем удалении от оси инструмента. Цифровые значения длины и радиусов высвечиваются на цифровом табло измерительной системы. Прибор позволяет со-кратить вспомогательное время и повысить точность об-работки и предназначен для эксплуатации в закрытых незапыленных помещениях.

Среди оптических приборов контроля состояния ре-жущего инструмента наибольшей точностью обладают приборы, реализующие дифракционный метод измере-ния в специализированной оптической системе когерент-ного спектроанализатора. На основе такого метода раз-работан прибор для диагностики процесса металлооб-работки по размерному износу режущего инструмента. Прибор состоит из оптической преобразующей системы для формирования дифракционного изображения щели, фотоприемного устройства и электронной системы ана-лиза выходного сигнала и управления процессом метал-лообработки, принципиальная схема которого показана на рис. 26.

Оптическая преобразующая система содержит распо-ложенные последовательно на оптической оси лазер 6 (источник когерентного излучения), первую поворотную призму 7, щелевую узкопольную диафрагму 8, щель 10, образованную дополнительной опорной полуплоскостью 9 и вершиной режущего клина инструмента 11, оборачи-вающую прямоугольную призму 14, вторую поворотную

призму 5 и Фурье-объектив 4. В задней фокальной плоскости Фурье-объектива 4 расположена линейка 3 приемника в зарядовой связью (ПЗС), выход которого через АЦП 2 подключен к процессору 1 числового программного управления станка. Процессор 1 подключен к сервоприводам 13 исполнительного механизма суппорта 12 станка. При этом центр проекции диафрагмы 8 на плоскость щели 10 совмещен с ее центром, а большая сторона указанной проекции ориентирована по нормали к рабочей кромке

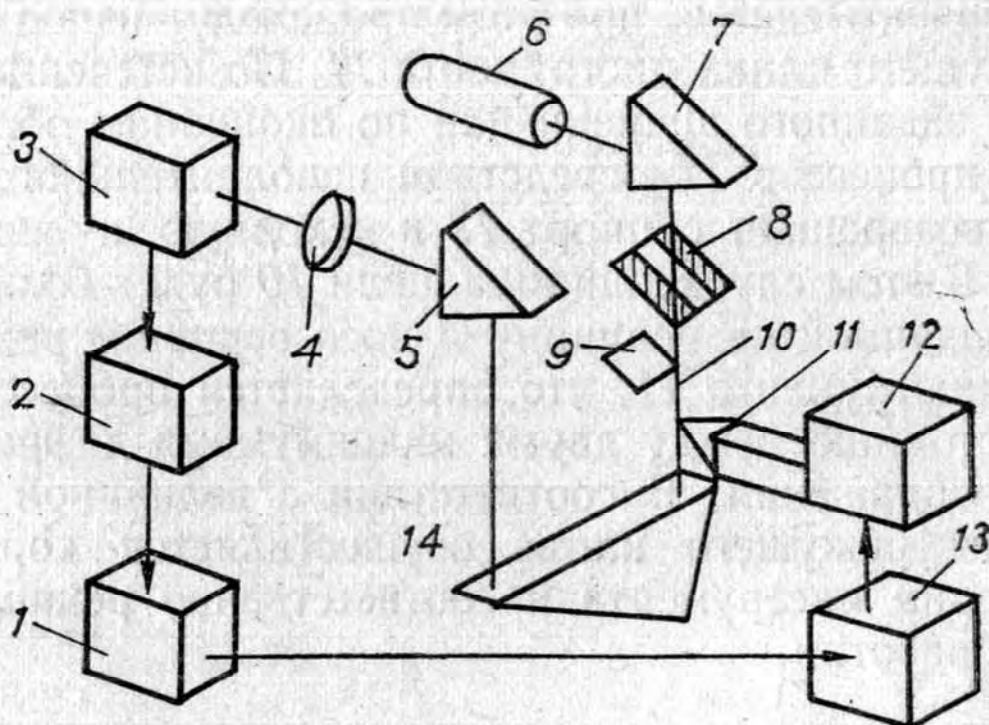


Рис. 26. Принципиальная схема лазерного устройства диагностики размерного износа режущего инструмента

опорной полуплоскости 9, обращенной к вершине режущего клина инструмента 11.

Перед началом обработки инструмент 11 в суппорте 12 перемещают в исходную нулевую позицию. Пучок излучения лазера 6 поворачивается призмой 7 и направляется на узкопольную щелевую диафрагму 8. Далее пучок, сформированный диафрагмой 8 и имеющий прямоугольную форму шириной 40...200 мкм и длиной 3000—5000 мкм, дифрагирует на щели 10 от полуплоскости 9 и режущего клина инструмента 11. Дифрагированный световой пучок поворачивается и направляется призмами 5 и 14 в Фурье-объектив 4, который формирует дифракционное изображение щели 10 в своей задней фокальной плоскости на линейке ПЗС. Выходной сигнал ПЗС преобразуется АЦП в цифровой код и поступает в процессор 1.

Дифракционное изображение щели состоит из эквидистантно расположенных перпендикулярно оптической оси максимумов светового потока. Линейное расстояние

пропорционально ширине щели 10 и прямо пропорционально фокусному расстоянию объектива 4. Поэтому перед началом работы суппорт устанавливают в такое положение, чтобы расстояние между двумя максимумами дифракционного изображения щели 10 достигло программно заданного значения, что соответствует определенному значению ширины щели 10. Такое положение суппорта 12 станка запоминается блоком памяти процессора 1, и станок готов к началу работы. Затем заготовка детали обрабатывается, при этом происходит износ вершины режущего клина инструмента 11. По истечении программно заданного времени или по окончании обработки детали процессор 1 посредством исполнительного механизма возвращает суппорт 12 в исходную нулевую позицию. В этом случае ширина щели 10 будет больше наперед заданной на величину износа вершины режущего клина инструмента 11, что определяется процессором 1 по расстоянию между двумя максимумами дифракционного изображения. В соответствии с величиной износа вершины режущего клина осуществляется коррекция траектории инструмента и соответственно режимов металлообработки.

3. ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ОБРАБАТЫВАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ

Наряду с диагностикой и контролем состояния режущего инструмента важное значение в прецизионной металлообработке имеет и контроль геометрических размеров обрабатываемых деталей, который осуществляется с помощью различных приборов, рассмотренных ниже.

Электроконтактный прибор содержит чувствительное устройство, преобразующее линейное перемещение в электрический дискретный сигнал (команду) путем замыкания или размыкания электрических контактов [5].

По назначению электроконтактные приборы подразделяются на предельные, предназначенные для контроля фактического размера детали, и амплитудные — для контроля отклонений формы детали от заданной (требуемой) геометрической формы.

В предельных электроконтактных приборах (рис. 27, а) каждому значению размера контролируемой детали 9 соответствует определенное положение подвижного контакта 2 относительно неподвижных (настраиваемых) контактов 1 и 3. Когда размер детали больше максимально допустимого, контакты 1 и 2 замкнуты, а

когда меньше минимально допустимого — замыкаются контакты 2 и 3 и, наконец, когда фактический размер детали находится в допуске, все контакты разомкнуты.

В амплитудных электроконтактных приборах (рис. 27, б), где необходимо исключить влияние самого размера на результат контроля его отклонений, контакт 2 выполнен «плавающим», т. е. под действием некоторого

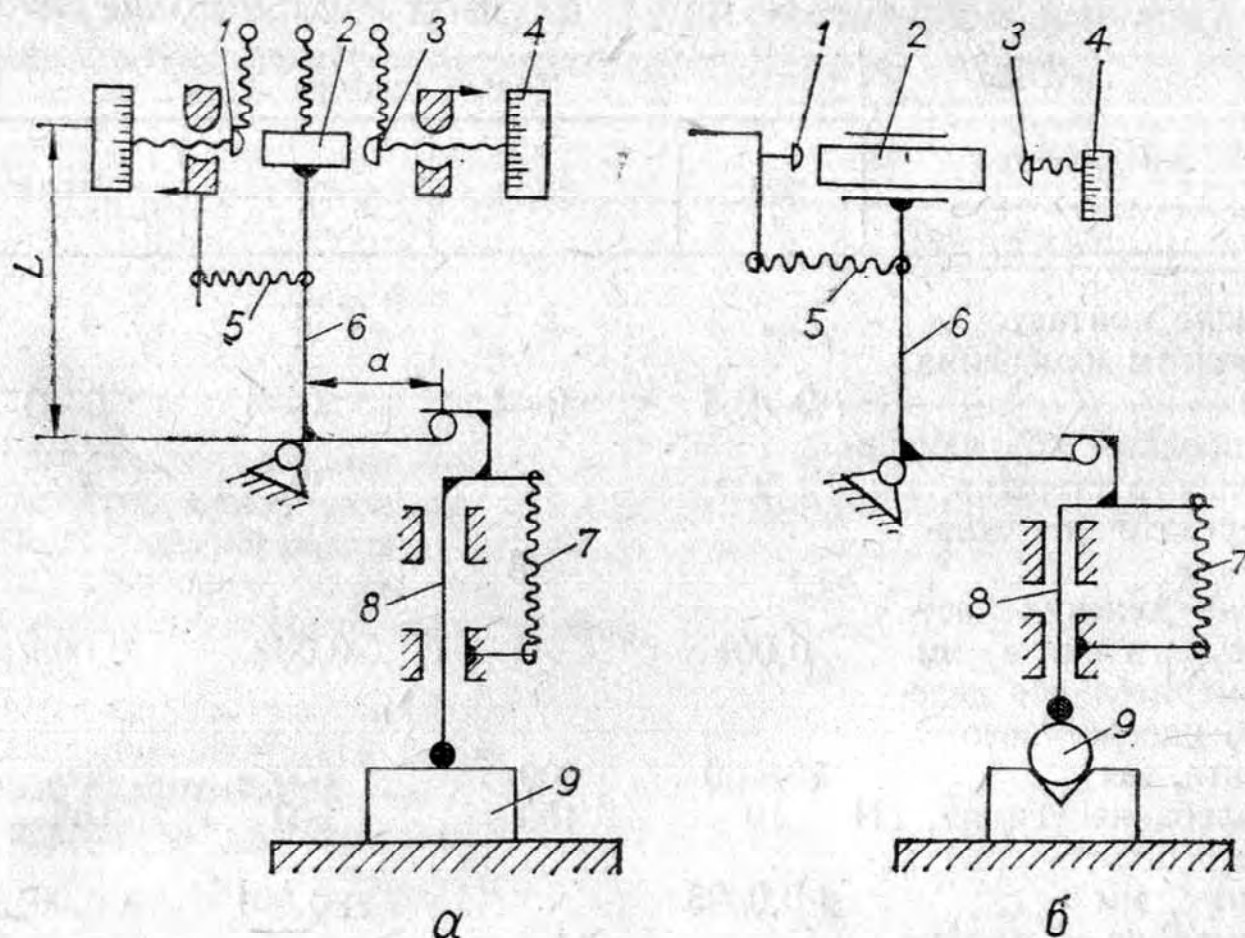


Рис. 27. Принципиальные схемы электроконтактных предельного (а) и амплитудного (б) приборов

усилия пружины 5 он может перемещаться в направляющей рычага б.

Отклонение формы детали 9 от правильной геометрической формы при ее вращении вызовет колебания рычага б с подвижным контактом 2. Изменение размера детали 9 при ее неподвижном состоянии может вызвать только перемещение контакта 2 в своей направляющей, не изменяя амплитуды его колебания. Когда отклонение размера детали выше допустимого, произойдет поочередное замыкание контактов 1 и 2, а затем 2 и 3, или наоборот, что свидетельствует о браке детали 9.

Точность и стабильность работы преобразователя в значительной мере определяются механическим повреждением, физическим разрушением (или эрозией), химическим разрушением (или коррозией) контактов [5].

Механическое повреждение контактов в результате их соударения зависит от твердости материала контак-

тов и от контактного усилия. Значительной твердостью обладают вольфрам и его сплавы, менее твердыми являются контакты из благородных металлов.

Предельные электроконтактные приборы широко применяются в контрольных приспособлениях, сортировочных автоматах и средствах активного контроля.

Таблица 8

Параметр	Модель прибора			
	223	228	229	КДМ-13
Число контактов	2	2	3	1
Пределы измерения, мм	0—0,4	0—1	0—1	0—3
Свободный ход измерительного стержня, мм	2		3	7
Передаточное отношение		5		
Цена деления настроечного винта, мм	0,001		0,002	0,005
Измерительное деление настроечного винта, мм	30—60	300	500	300
Колебание усилия, сН	10	150	300	100
Погрешность срабатывания, мм	$\pm 0,0005$		$\pm 0,001$	$\pm 0,004$
Смещение настройки за 25 000 срабатываний, мм	$\pm 0,005$		$\pm 0,001$	$\pm 0,004$
Предельная скорость арретирования, м/с		До 60		
Габаритные размеры, мм	83×48× ×16	136×66× ×21	136×66× ×21	96×45× ×17
Масса, г	200	420	420	115

Примечание. Преобразователи моделей 223, 228, 229 выпускает завод «Калибр» (г. Ленинград), а модели КДМ-13 — Ленинградский инструментальный завод.

Технические характеристики промышленно выпускаемых предельных электроконтактных приборов приведены в табл. 8.

В предельных электроконтактных приборах моделей 228 и 229 предусмотрена возможность установки отсчетной измерительной головки, что увеличивает габаритные размеры прибора и повышает измерительное усилие. Для устранения указанных недостатков электрическими контактами оснащаются сами рычажно-зубчатые и малогабаритные пружинные шкальные головки.

В табл. 9 приведены технические характеристики некоторых электроконтактных измерительных головок, выпускаемых отечественной промышленностью.

В пневматических приборах для линейных измерений использована зависимость между площадью s проходного сечения канала истечения и расходом Q сжатого воздуха: $Q = F(p, s)$, где p — давление истекания воздуха. По расходу воздуха Q при постоянном давлении p можно судить о размере контролируемой детали.

Таблица 9

Параметр	Тип головки		
	ЭГР	ЭЭКШ	ЭГП
Цена деления шкалы, мм	0,001	0,01	0,001
Диапазон измерения, мм	$\pm 0,05$	$\pm 0,25$	$\pm 0,05$
Число пар контактов		2	
Измерительное усилие, сН	200	300	200
Колебание измерительного усилия, сН	50		100
Погрешность срабатывания		$\pm 0,0005$	
Смещение настройки после 2500 срабатываний, мм		$\pm 0,0005$	
Габаритные размеры, мм	109× ×65× ×220	109× ×65× ×220	109× ×74× ×70
Масса, г	300	200	230

Примечание. Электроконтактные шкальные головки типов ЭГР и ЭЭКШ выпускает завод «Красный инструментальщик» (г. Киров), а головки типа ЭГП — Ленинградский инструментальный завод.

Схема пневматического прибора (рис. 28) состоит из следующих функциональных блоков. Первичный пневматический преобразователь ПП воспринимает линейные перемещения детали и преобразует их в соответствующие изменения расхода воздуха. Измерительная пневматическая схема ИС предназначена для преобразования сигнала ПП в удобные для измерения расхода газа параметры — давление, скорость. Указательное устройство УУ служит для воспроизведения измеряемой величины в принятых единицах измерения. Командное устройство КУ формирует сигналы — команды для управления технологическим процессом. Кроме того, схема состоит из стабилизатора давления С, фильтра Ф очистки воздуха и источника сжатого воздуха ИВ.

Для работы пневматических приборов необходима воздушная сеть с определенным давлением воздуха.

Пневматические приборы обладают значительной инерционностью, снижающей их производительность. Однако последний недостаток иногда является положительным качеством прибора, так как создает нечувствительность его к вибрациям [5].

При бесконтактном измерении размера a детали пневматический преобразователь прибора, показанный на

Рис. 28. Функциональная схема пневматического прибора контроля размеров деталей

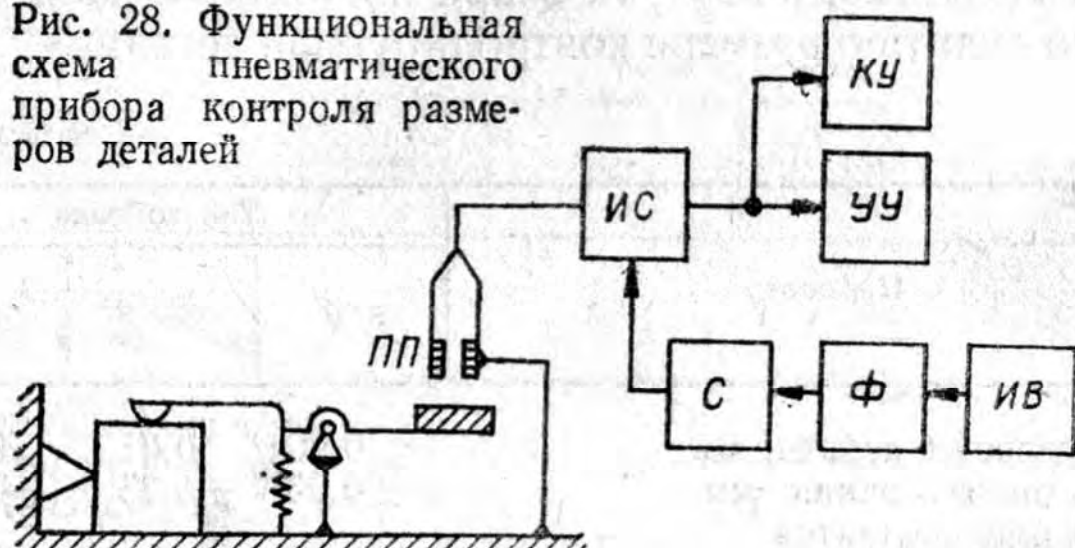


рис. 29, a , представляет собой измерительное сопло 1, в качестве заслонки в котором применяется контролируемая деталь 2. Расход воздуха Q в данном случае определяется размером a до поверхности контролируемой детали 2: $Q = \pi a d$. Практически измерение возможно при условии

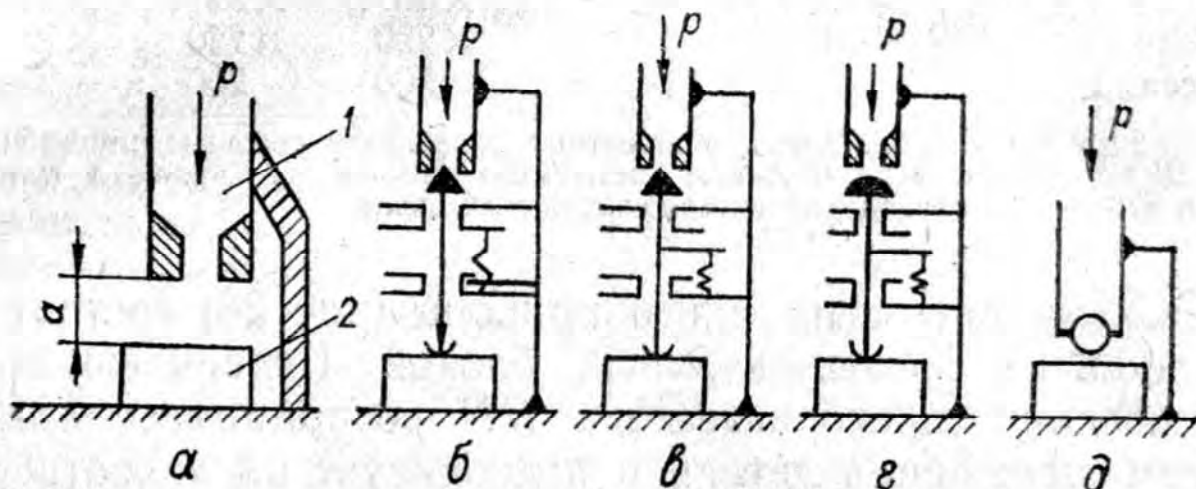


Рис. 29. Принципиальные схемы пневматических преобразователей:

$a, б$ — с плоской заслонкой; $в$ — с конической заслонкой; $г$ — с заслонкой в виде параболоида вращения; $д$ — с шариковой заслонкой

$\pi a d \leq \pi d^2/4$, откуда $a \leq 0,25d$. В противном случае изменение площади s канала истечения не зависит от изменения размера a .

С целью увеличения диапазона измерения используют преобразователи с заслонкой в виде конуса, шара, параболы вращения и др. (рис. 29, $a — д$ соответственно).

Площадь канала истечения s' преобразователя с конической заслонкой (боковая поверхность усеченного

конуса $ABCD$ рис. 30) изменяется нелинейно в зависимости от измеряемого перемещения x и определяется по формуле $s' = \pi dx \sin \alpha - \pi x^2 \sin^2 \alpha \cos \alpha$, а диапазон измерения возрастает при уменьшении угла α , но при этом нелинейность характеристик $s'(x)$ также возрастает.

Такие параметры пневматического прибора, как диаметр отверстия входного сопла d_b , диаметр отверстия измерительного сопла d_n , рабочее давление p , диапазон измерительных зазоров a , определяют его метрологические свойства. Основными метрологическими характеристиками измерительного пневматического прибора, которые задаются при его проектировании, являются чувствительность K_a , диапазон измерения — прямолинейный участок характеристики Δa и измерительный зазор в середине прямолинейного участка характеристики $h(a)$.

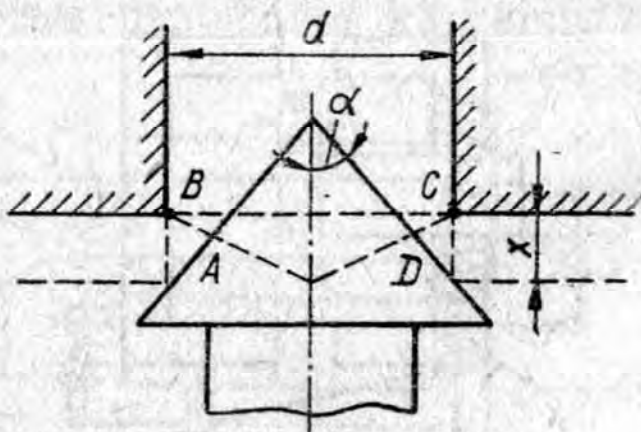


Рис. 30. К расчету выходной характеристик преобразователя с конической заслонкой

В индуктивных приборах используется свойство катушки изменять свое реактивное сопротивление при изменении некоторых ее параметров, определяющих индуктивность L .

Для получения возможно бóльшей индуктивности катушка, как правило, выполняется с магнитопроводом из ферромагнитного материала. Сопротивление такой катушки (без учета потерь на гистерезис и вихревые токи в сердечнике) $z = R_a + j\omega L$, где R_a — активное (омическое) сопротивление катушки постоянному току; $j\omega L = j\omega (n^2/R_m)$ — индуктивное сопротивление; $j = \sqrt{-1}$; $\omega = 2\pi f$ — круговая частота питающего напряжения; f — частота, Гц; n — количество витков катушки; R_m — сопротивление магнитной цепи катушки.

Обычно один из элементов магнитной цепи выполняется подвижным (якорь 1), и его положение относительно неподвижной части сердечника 2 (рис. 31, а) влияет на магнитное сопротивление цепи R_m , а следовательно, и на индуктивное сопротивление катушки.

В применяемых в настоящее время индуктивных приборах изменение индуктивного сопротивления катушки чаще всего достигается в результате изменения воздушного зазора a между якорем 1 и неподвижной частью сердечника 2 катушки или изменения площади s зазора.

Характеристика прибора $z = z(a)$ нелинейна, но если ограничить рабочий участок преобразователя $\Delta a = a_{\max} - a_{\min}$, то можно добиться того, что степень нелинейности характеристики (постоянство чувствительности K_a) не будет превышать заданного значения.

Чувствительность прибора $K_a = dz/da$ показывает, на какую величину изменится сопротивление z катушки при изменении зазора a на единицу длины. Чувствительность возрастает по мере уменьшения зазора. Если взять

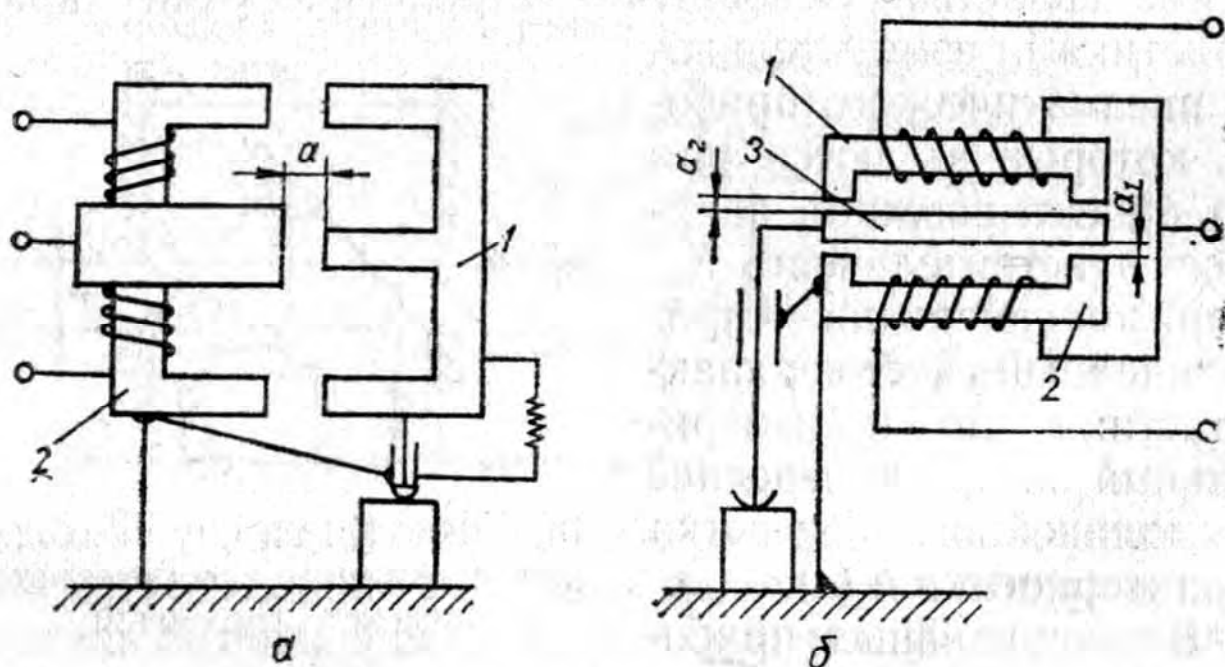


Рис. 31. Принципиальные схемы дифференциальных индуктивных преобразователей с переменной длиной (а) и переменной площадью (б) воздушного зазора

два одинаковых рабочих участка Δa , но с различными средними значениями a_0 , то нелинейность характеристики будет больше у приборов с меньшим a_0 .

Для получения более линейной зависимости без уменьшения величины Δa применяют дифференциальные индуктивные приборы; принципиально схемы которых показаны на рис. 31. Прибор на рис. 31, б, имеет две магнитные цепи 1 и 2 с общим якорем 3. Под действием измеряемой величины оба зазора (a_1 и a_2) изменяются одинаково, но с разными знаками.

Для увеличения диапазона измерений в приборах используют усилители с переменным напряжением 5...10 кГц питания, что позволяет получить цену деления 0.05...1 мкм с пределами измерения $\pm(0,003...1,5)$ мм.

Особую группу составляют индуктивные приборы с преобразователями трансформаторного типа, в которых используется влияние перемещения якоря на индуктивную связь между катушками. На рис. 32, а, показана принципиальная схема недифференциального индуктивного пре-

образователя трансформаторного типа. Обмотка 1 питается от источника переменного тока. К зажимам обмотки 2 подключен вольтметр. При изменении воздушного зазора a изменяется магнитное сопротивление магнитопровода, а следовательно, и магнитный поток. В результате чего изменяется индуцированная во вторичной обмотке ЭДС. Схема недифференциального трансформаторного преобразователя малочувствительна. Значительно лучшими свойствами обладает дифференциальный трансформаторный преобразователь, схема которого показана на рис. 32, б. Две одинаковые первичные катушки 1

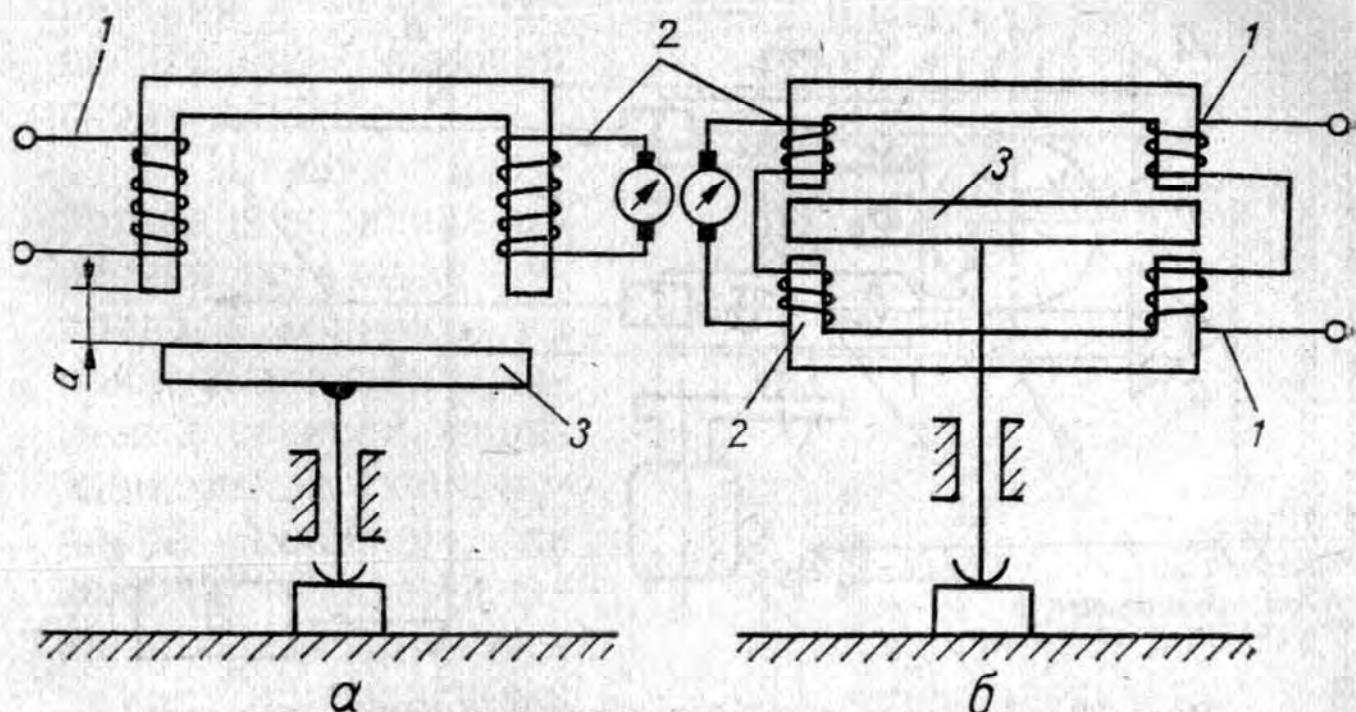


Рис. 32. Принципиальные схемы недифференциального (а) и дифференциального (б) трансформаторных преобразователей

обоих сердечников включены последовательно, благодаря чему при симметричном положении якоря магнитные потоки в обеих магнитных цепях равны. Вторичные катушки 2 также имеют одинаковые параметры, но включены навстречу друг другу. Поэтому при среднем положении якоря индуцированные в них ЭДС уравниваются друг с другом и ток в измерителе равен нулю. При перемещении якоря 3 из среднего положения магнитные сопротивления, а следовательно, и магнитные потоки, пронизывающие вторичные катушки, будут различны, и в измерителе появится ток, определяемый разностью индуцированных во вторичных обмотках ЭДС.

Применение оптико-электронных измерительных приборов является одним из основных и перспективных направлений развития прикладной метрологии, в частности, в области автоматического контроля линейных размеров фасонных деталей. Использование лазеров в метрологии и информационно-измерительной технике связано с пре-

образованием информации о размерах и качестве поверхности контролируемой детали в лазерных интерферометрах и оптических проекторах [20].

Основная область применения в машиностроении лазерной интерферометрии — координатные измерительные машины, точное позиционирование и юстировка станков и прецизионного технологического оборудования; голографическая интерферометрия — изучение топографии поверхностей, измерение деформаций, перемещений и вибраций без ограничения формы, качества поверхности и пространственной ориентации деталей; доплеровская

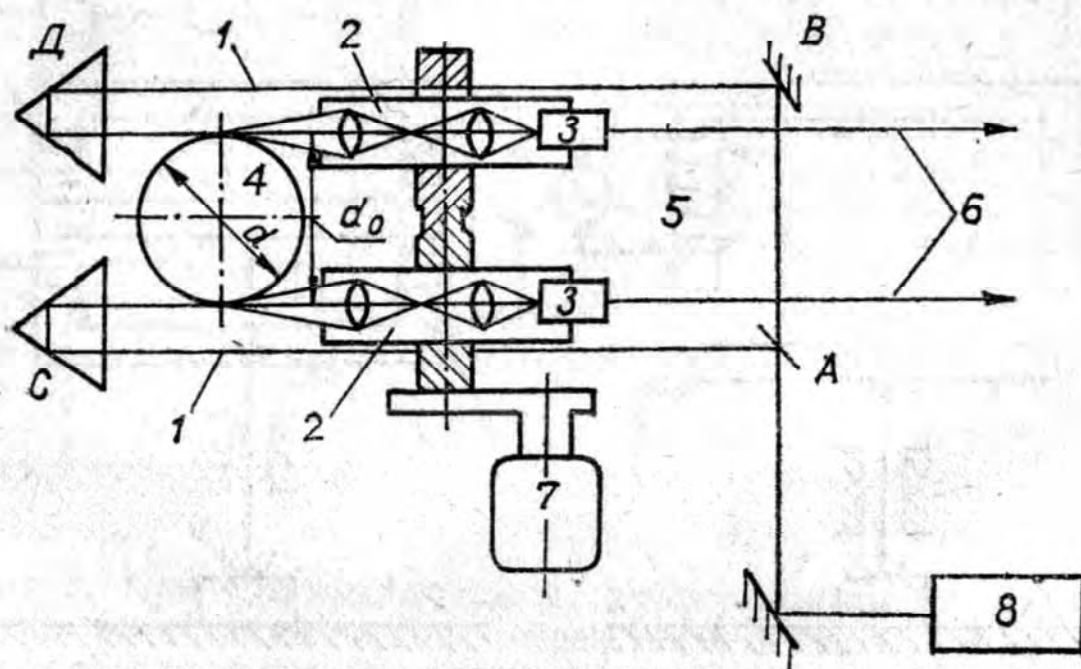


Рис. 33. Лазерное устройство для измерения диаметра цилиндрических деталей

интерферометрия — бесконтактное измерение скорости перемещения; контроль шероховатости поверхности.

Бесконтактные методы измерения, реализованные в оптических проекторах, основаны на законах геометрической оптики и их применяют в современных системах активного контроля для металлорежущих станков. Такие устройства можно разделить на две группы. К одной группе относятся лазерные измерительные устройства, работающие по принципу «лучевой скобы», которая настроена на номинальный размер контролируемой детали, и формирующие управляющий сигнал при достижении в процессе изготовления детали заданного размера.

В Японии разработана лазерная установка для измерения диаметра цилиндрических деталей при обработке на токарных станках, принципиальная схема которой показана на рис. 33. Излучение лазера 8, прошедшее систему зеркал и призм ABCD, направляется на обрабатываемую деталь 4. Часть светового потока, прошедшая по касательной к поверхности контролируемой детали,

отклоняется под углом к основному потоку 1 и оптическими системами 2 и направляется на фотоприемники 3, выходной сигнал 6 которых соответствует размерному отклонению диаметра изделия. Установка контролирует диаметр детали в различных сечениях. Настройка на номинальное значение размера осуществляется дифференциальным винтом 5 с помощью серводвигателя 7. Предел измерений диаметра 0...200 мм, погрешность системы ± 10 мкм. Недостатки следующие: невозможность применения при резании с СОТС, относительно высокая стоимость [4].

В Швеции разработана адаптивная лазерная установка активного контроля на токарных и шлифовальных станках, принципиальная схема которой показана на рис. 34. Размеры детали контролируются двумя импульсными лазерными пучками, которые как бы образуют лучевую скобу. Излучение лазера 10 проходит электрооптический дефлектор 9, преобразуется светоделителем 7 в три параллельных пучка, которые, в свою очередь, проходят прерыватель 8 в виде вращающегося диска с отверстиями и становятся пульсирующими. Два пучка направляются системой призм 4 так, что проходят по касательным в двух противоположных точках сечения обрабатываемой цилиндрической детали 6, а третий проходит вне «скобы», образуемой двумя первыми, и является опорным. При отклонении диаметра от номинального значения фотоприемник 2 с помощью конденсатора 3 регистрирует изменение оптического сигнала в течение полуоборота изделия. Выходные сигналы фотоприемника поступают на вход электронного измерительного и управляющего устройства 1. Оптическая скоба настраивается на номинальный размер дифференциальными винтами 5 с помощью сервопривода 11. Индикация отклоне-

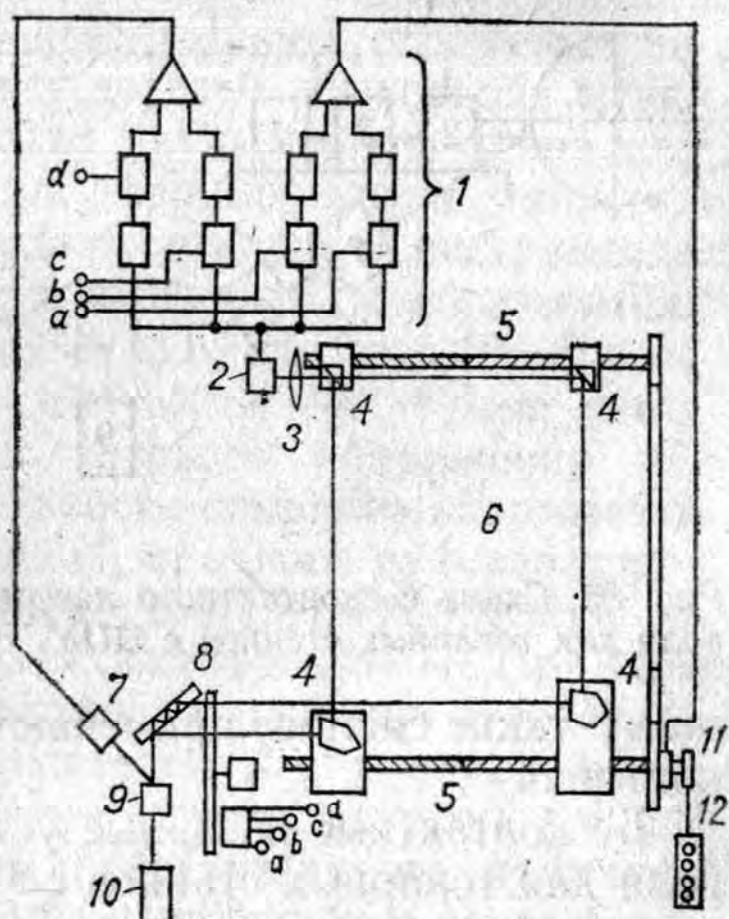


Рис. 34. Лазерная система активного контроля к токарным и шлифовальным станкам

ний размеров деталей производится на цифровом табло 12 [14].

Существенными недостатками устройств, работающих по принципу «лучевой скобы», являются громоздкость измерительной системы, не позволяющая установить измерительный преобразователь непосредственно в зоне резания, запаздывание измерительной информации и влияние на точность измерения стружки и СОТС. По-

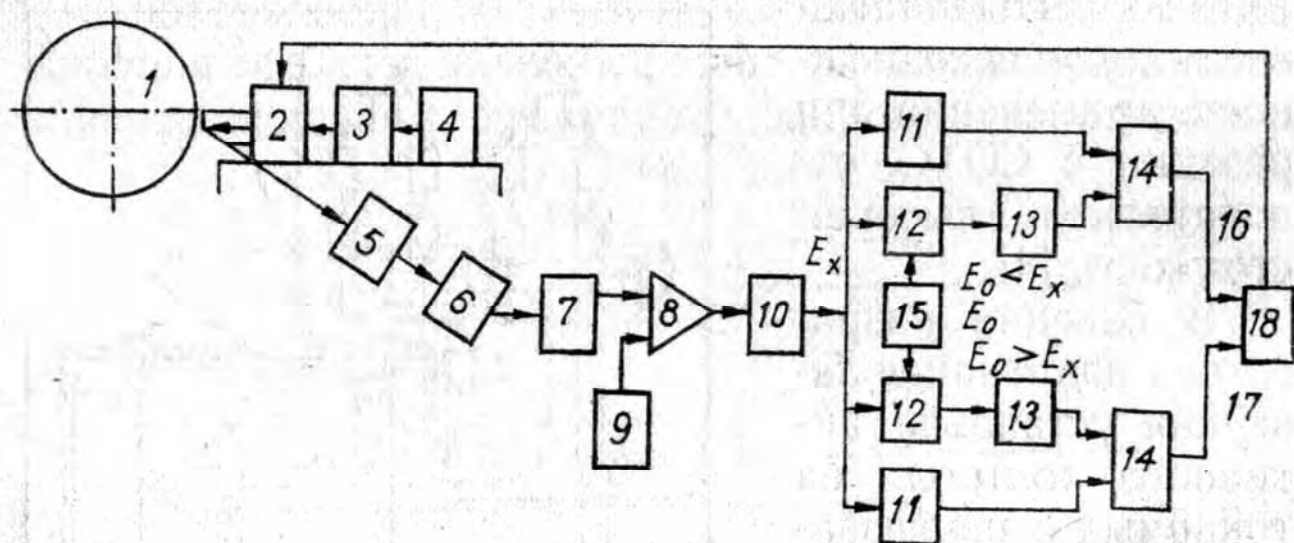


Рис. 35. Схема бесконтактного лазерного прибора активного контроля для токарных станков с ЧПУ

этому такие системы применяют для межоперационного контроля.

Бесконтактные лазерные устройства активного контроля для токарных станков с ЧПУ могут быть построены на основе измерительных преобразователей, действующих по принципу оптических приборов поперечной наводки (известным примером таких приборов является двойной микроскоп Линника и его фотоэлектрические аналоги). Разработаны также измерительные устройства, предназначенные для контроля износа и тепловых деформаций режущего инструмента, и приборы активного контроля размеров обрабатываемой детали.

В Японии создан бесконтактный лазерный прибор активного контроля, предназначенный для токарных станков с ЧПУ, принципиальная схема которого показана на рис. 35. Непрерывное измерение детали в процессе обработки производится с помощью измерительного преобразователя, действующего по принципу поперечной наводки. Излучение гелий-неонового лазера 4 направляется на поверхность контролируемой детали 1 со стороны резца 2 через оптическую систему 3. Отраженный световой поток воспринимается оптической системой 5 и направляется на фотоприемник 6, выполненный из четырех фоторезисторов, включенных по мостовой схеме,

причем два из них образуют дифференциальный фотодетектор, а два других используются для температурной компенсации. Измерительный преобразователь устанавливается на станке со стороны режущего инструмента. Угол между зондирующей и измерительной ветвью составляет 8° . Сигнал с мостовой схемы фотоприемника 6 через фильтр 7 поступает на сумматор 8, на который также подается сигнал схемы компенсации 9, учитывающий изменения характеристик коэффициента отражения поверхностью контролируемых деталей. Выходной сигнал сумматора подается на вход двухканального аналого-цифрового преобразователя, формирующего импульсы коррекции поперечной подачи режущего инструмента. Каждый из каналов аналого-цифрового преобразователя содержит схему блокировки 11, компаратор 12, формирователь 13 и генератор импульсов 14. Кроме того, имеется общий источник опорного напряжения 15. В зависимости от знака разности опорного напряжения U_0 и напряжения на выходе U_x от одного из генераторов 14 в систему ЧПУ 18 поступают импульсы коррекции подачи инструмента «назад» 16, или «вперед» 17. При этом система ЧПУ станка обеспечивает коррекцию поперечной подачи суппорта с резцедержателем 2 с учетом знака и значения отклонения размера контролируемой детали.

Недостатком приборов, работающих по принципу поперечной наводки, является запаздывание измерительной информации и влияние на точность контроля (кроме силовых и тепловых деформаций детали) изменения кривизны ее поверхности, что особенно проявляется при обработке ступенчатых и фасонных деталей. Использование таких приборов для активного контроля размеров дало положительные результаты при контроле гладких жестких валов и отсутствии требований к быстродействию.

В основу устройства непрерывного лазерного контроля размеров изделий в процессе металлообработки целесообразно положить принцип регистрации излучения, отраженного от обрабатываемой поверхности. Оптическая схема получается наиболее простой, если отраженное излучение использовать для управления выходной мощностью лазера, причем в этой схеме может быть достигнута и наиболее высокая чувствительность лазерного датчика размеров изделия.

Отраженное от изделия 1 излучение лазера возвращается оптической системой, схема которой показана на рис. 36, в лазерный резонатор 3 и 5, изменяя его доб-

ротность в соответствии с изменением расстояния до изделия или его ориентации относительно лазера. Изменение добротности резонатора лазера, в свою очередь, приводит к изменению выходной мощности лазерного излучения. Регистрация выходной мощности лазерного излучения с помощью фотодетектора 7 позволяет получить информацию об изменении геометрических размеров обрабатываемого изделия 1. Для повышения светоэнергетических характеристик прибора в оптической системе используют фокусирующие линзы 2 и 6.

Лазерный прибор может быть построен по принципу регистрации числа N максимумов и минимумов в выход-

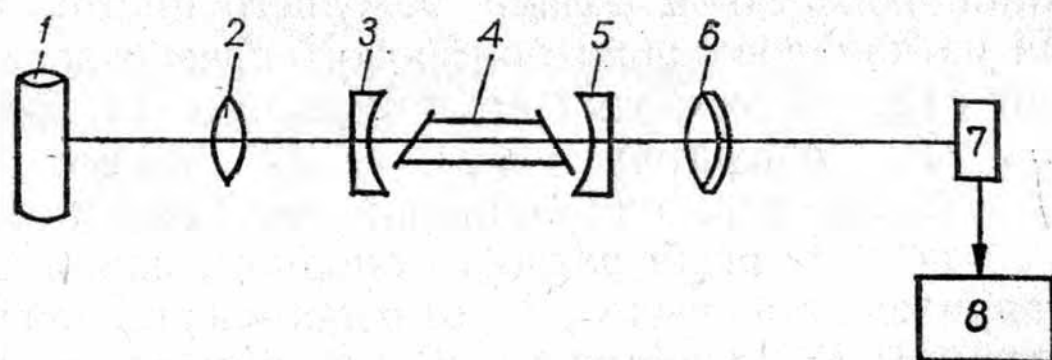


Рис. 36. Принципиальная схема лазерного прибора для контроля расстояния до поверхности детали

ной мощности лазера при изменении расстояния l до измеряемой поверхности. Для реверсивного счета в оптической системе обычно предусматривают фазовый модулятор, размещаемый в измерительном резонаторе. Выходной сигнал на частоте модуляции выделяется из спектра фототока фотодетектора и детектируется синхронным детектором. Число экстремумов N в регистрируемом сигнале пропорционально изменению размера изделия, т. е. $\Delta l = N\lambda/4$. При использовании $\text{He} - \text{Ne}$ лазера $\Delta l = 0,158$ мкм.

Более точным методом измерения является компенсационный. В этом случае сигнал с синхронного детектора поступает на оптический компенсатор, осуществляющий автоматическое слежение за определенным значением фазы Θ , связанной с l . При этом точность измерения определяется точностью слежения за фазой отраженного сигнала и может быть существенно меньше $0,01\lambda$, т. е. составлять менее $0,006$ мкм.

Разработанный метод лазерного контроля размеров при металлообработке изделий опробирован на измерительном приборе, содержащем лазер ЛГ-78, излучение которого через одно из зеркал резонатора фокусировалось цилиндрической линзой на поверхность детали для

контроля ее диаметра в процессе обработки. Отраженное от детали излучение возвращалось в резонатор лазера и регистрировалось фотодиодом ФД-2. Погрешность измерения размера составила менее 0,005 мкм. Данный прибор может быть использован и при других технологических операциях (например, при измерении толщины в процессе напыления диэлектрических и металлических пленок, контроле перемещения обрабатывающего инструмента и т. д.).

На металлорежущих станках для контроля диаметра обрабатываемой детали может быть использовано опти-

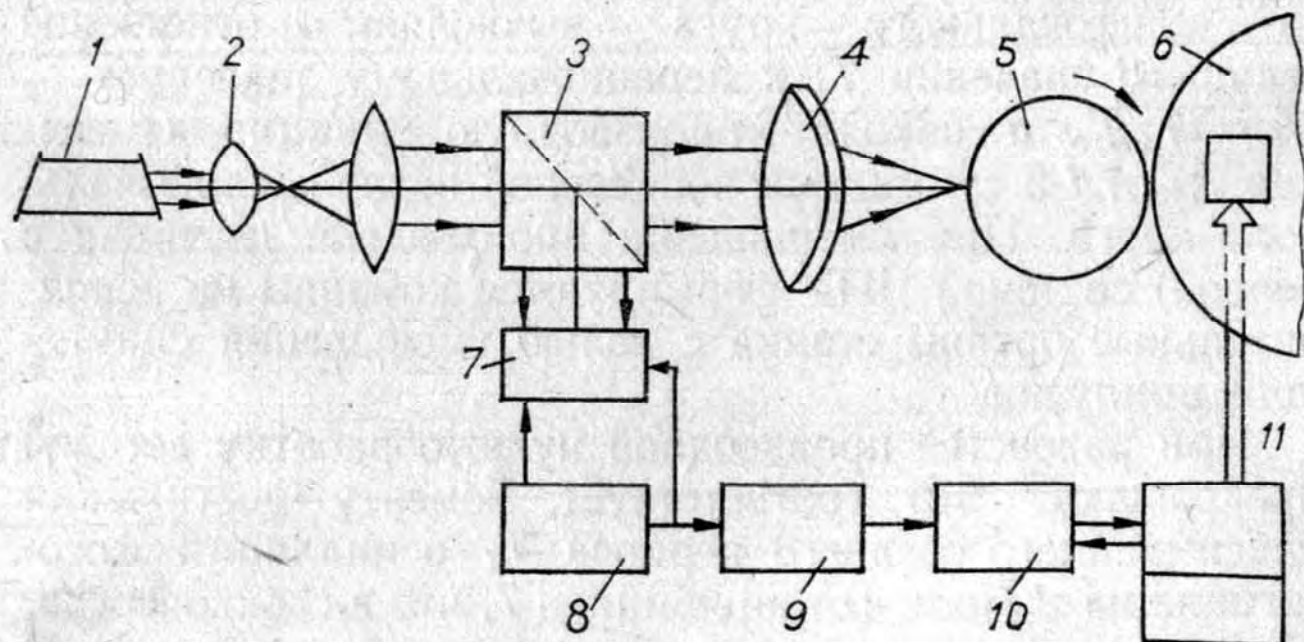


Рис. 37. Принципиальная схема лазерного устройства для контроля диаметра цилиндрических деталей

ческое устройство, принципиальная схема которого показана на рис. 37. Поверхность цилиндрической детали 5 освещают пучком когерентного излучения лазера 1, ось которого перпендикулярна основной технологической оси станка. Пучок излучения от лазера 1 проходит через расширитель 2 пучка, светоделительный кубик 3 и объектив 4 переменного фокусного расстояния. Перед началом обработки задают расстояние a от задней главной плоскости объектива 5 до основной технологической оси детали 5, согласно выражению $f = a - R$, где R — требуемый радиус цилиндрической детали 5, и формируют на фотоприемнике 7 рассеянный поверхностью детали 5 и отраженный от светоделительного кубика 3 световой поток. В процессе обработки (при вращении детали 5 в плоскости входного окна фотоприемника 7 происходит перемещение спектров интерференционной картины отраженного светоделительным кубиком 3 и рассеянного поверхностью обрабатываемой детали 5 светового потока. При этом изменяется освещенность входного окна фото-

приемника 7, с помощью которого преобразуют изменение освещенности во временной электрический сигнал. Видеосигнал фотоприемника 7 преобразуется аналого-цифровым преобразователем 8 в код, и в виде массива чисел через устройство 9 прямого доступа в память ПДП поступает в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) 10 системы ЧПУ станка. На основании поступающих в ОЗУ данных с помощью процессора ПРЦ 11 определяют средний период T_i осциллирующий сигнала на выходе фотоприемника за интервалы времени, равные каждому проходу шлифовального круга 6. После каждого прохода шлифовального круга вычисляют отношение текущего значения T_i к первоначальному значению T_0 , $A_i = T_i/T_0$ и находят производную функции изменения A_i от i -й суммарной поперечной подачи шлифовального круга. При уменьшении производной (начиная с первой) системой ЧПУ формируются команды на исполнительные органы станка с целью уменьшения снимаемого припуска.

При равенстве производной нулю обработку деталей прекращают. Это соответствует моменту достижения максимального среднего периода T_i осциллирующий фотосигнала на выходе фотоприемника 7, что в свою очередь, соответствует достижению номинального диаметра обрабатываемой детали.

4. КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ

В настоящее время как отечественной, так и зарубежной промышленностью пока еще не освоено производство каких-либо специализированных систем для диагностики состояния технологических процессов при металлообработке. Поэтому исследователю приходится изготавливать их самостоятельно, используя выпускаемые промышленностью электро- и радиоизмерительные приборы. Наиболее широкое распространение при диагностике процессов металлообработки получили выпускаемые промышленностью электронные спектроанализаторы, предназначенные для анализа и обработки электрических сигналов виброакустической эмиссии и электромагнитного излучения, генерируемых при металлообработке зоной резания. В табл. 10 приведены основные технические характеристики некоторых электронных спектроанализаторов, выпускаемых отечественной промышлен-

ностью и предназначенных для измерения спектральных характеристик непрерывных электрических сигналов.

Электромагнитное и виброакустическое излучения генерируются твердыми материалами, подвергаемыми механическим воздействиям, при которых происходят деформация и разрушение молекулярного строения материала. Кратковременные импульсные волны, генерируемые в зоне разрушения материала, распространяются в теле и излучаются поверхностью материала. Интенсивность виброакустической эмиссии быстро возрастает

Таблица 10

Спектроанализатор	Диапазон анализируемых частот, МГц	Полоса обзора, кГц	Время счета, с	Потребляемая мощность от сети, В·А
СК-4-59	0,1—110	0,1—300	0,002—0,2	250
СК-4-72	10^{-5} —0,02	—	0,03—9	600
СК-4-53	0,02—0,5	0,2—20	0,002—1	300
С-4-45	10—100	100—90× × 10 ³	0,03× × 10 ⁻³ 3·10 ⁻³	400
С-4-48	$20 \cdot 10^{-6}$ — 20 ⁻³	—	—	150

в ранней стадии разрушения структуры материала. Импульсному сигналу виброакустической эмиссии соответствует слишком широкий частотный диапазон спектра. Однако наиболее информативным о состоянии процесса деформаций при измерении и анализе виброакустической эмиссии является частотный диапазон от 0,1 до 1 МГц. Амплитуды импульсов виброакустической эмиссии слишком малы и изменяются от 0,01 до 1 мВ на выходе соответствующих датчиков.

На рис. 38 показана функциональная схема диагностической системы процесса металлообработки путем измерения виброакустической эмиссии. Работа системы основана на измерении идентифицируемого параметра, т. е. времени превышения амплитуд импульсов сигнала виброакустической эмиссии в определенных и предварительно заданных пределах. В режиме системы «взвешивания» измерению и регистрации подлежит время превышения амплитудой импульса некоторых уровней опорных сигналов. Режим «локализации» — это обнаружение и локализация источника виброакустической эмиссии

небольшой ограниченной площади. Для регистрации сигналов виброакустической эмиссии используются специальные пьезоэлектрические датчики П-8312, П-8313 и П-8314.

Широкополосный датчик П-8312 с встроенным предусилителем используется в системах для общего обнаружения, определения и оценки сигналов виброакустической



Рис. 38. Функциональная схема аппаратного комплекса для измерения виброакустической эмиссии

эмиссии, а также в системах для спектрально-частотного анализа. Датчик обладает полосой пропускания от 0,1 до 1 МГц, линейная характеристика которого составляет ± 10 дБ. Предусилитель, коэффициент усиления которого 40 дБ, имеет малое выходное сопротивление, что допускает применение соединительных длинных кабелей.

Резонансные датчики П-8312 (резонансная частота 0,2 МГц) и П-8313 (резонансная частота 0,8 МГц) предназначены для регистрации импульсных сигналов виброакустической эмиссии, обладающих широким частотным спектром. Чувствительность датчиков составляет до 10 мкВ.

Спектрограммы сигналов акустической эмиссии, формируемые на выходе электронного спектроанализатора, поступают через аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и интерфейсное устройство сопряжения в микро-ЭВМ для дальнейшей обработки их в цифровой форме. Основные технические характеристики некоторых современных АЦП приведены в табл. 11. Такие АЦП позволяют вводить в микро-ЭВМ практически любые сигналы

АЦП	Частота преобразования, МГц	Количество рядов кода	Уровень входных сигналов, В	Время, нс		Входная емкость, пФ	Погрешность в конечных точках, мВ
				преобразования	апертурное		
К1107ПВ1	20	6	-2...0	100	10...22	100	±100
К1107ПВ2	20	8	-2...0	100	10...22	300	±100
К1107ПВ3А	100	6	-2,5...+2,6	20	2	35	±100
К1107ПВ3Б	50	6	-2,5...+2,5	20	2	35	±100
К1107ПВ4А	100	8	-2,5...+2,5	30	2	120	±50
К1107ПВ4Б	60	8	-2,5...+2,5	30	2	120	±50
К1108ПВ1	2	10	0...+4	1000	—	440	±200
К1113ПВ1	0,1	10	-5...+5	25 000	—	500	±100
Ф7077/1	—	10	-10...+10	8000	—	50	±50
Ф7077/2	—	8	-1...+1 -2...+2	3000	—	50	±50

вибраакустической эмиссии и их спектры, формируемые пьезоэлектрическими датчиками при металлообработке на станках. Выбор требуемого АЦП осуществляется в зависимости от ширины спектрального диапазона анализируемого сигнала и необходимого быстродействия диагностической системы процесса металлообработки.

5. КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ В СИСТЕМАХ ДИАГНОСТИКИ ПРОЦЕССОВ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ

Для контроля геометрических размеров деталей широкое распространение получили контрольно-измерительные машины (КИМ), в том числе с автоматической сменой тактильных щупов. Такие КИМ имеют широкие функциональные возможности, реализуемые посредством соответствующего программного обеспечения (ПРО). Наиболее совершенными среди известных являются КИМ, созданные фирмами Opton (модель UMC = 850 и серии SMM) и Mauser (модель KMZ = 121210), а также измерительный комплекс для проверки точности КИМ и оборудование консультационного центра по их обслуживанию [1].

Портальную конструкцию имеет КИМ модели UMC = 850. Портал перемещается по аэростатическим направляющим, обладающим повышенной жесткостью и виброустойчивостью. Наличие портала позволяет КИМ измерять детали в пределах полной длины стола 1200—2400 мм. В качестве устройств для отсчета перемещений

по осям координат используются фотоэлектрические кодовые датчики фирмы Opton, имеющие дискретность шкалы 0,5 мкм. Трехкоординатная головка такой КИМ позволяет измерять или осуществлять сбор данных в режиме сканирования с помощью тактильных щупов, измерительное усилие которых регулируется ступенчато (0,1; 0,2; 0,4 Н); смена тактильных щупов, масса которых до 600 г, осуществляется автоматически. Пределы измерений по осям X , Y и Z составляют соответственно 850, 1200 и 600 мм; погрешность (в мкм) измерения расстояния L при 20°C $\delta = 2,1 + L/300$ (L в мм); скорости установочных перемещений по осям X и Z регулируются бесступенчато в интервале 0,001 — 60 мм/с; регулирование скорости рабочих перемещений осуществляется с дискретностью от 0,0005 до 0,1 мм/с.

В зависимости от типа измеряемых деталей КИМ фирм Opton и Mauser комплектуются дополнительными столами, управляемыми от устройств ЧПУ (УЧПУ); датчики угла поворота имеют дискретность 0,5", что обеспечивает погрешность позиционирования не более $\pm 1''$. Для КИМ обеих фирм ПРО содержит набор следующих программ: UMESS — универсальная стандартная программа; MET — PROG — для редактирования программ измерения, подготовленных вне КИМ; SAM — для статистической обработки результатов измерений, выполненных по программе UMESS; KUM — для измерения двух- и трехмерных кривых; NOM — для измерения кулачковых колес; TOP — для измерения пространственных изогнутых поверхностей.

Фирмой Opton создана КИМ модели НММ-965, координатные перемещения в которой по осям X , Y и Z соответствуют 900, 600 и 500 мм; дискретность датчиков 0,0005 мм, при этом погрешность измерения $\delta = 4 + L/200$ (L в мм); взаимная перпендикулярность всех осей $\pm 1''$. Конструкция КИМ порталная. Для измерения перемещений тактильных щупов используются фотоэлектрические датчики фирмы Opton. Базой КИМ является гранитная плита; подвижные узлы перемещаются вдоль осей X и Y по аэростатическим направляющим, а вдоль оси Z — по стальной панели посредством шариковых опор качения. Для повышения износоустойчивости на рабочие поверхности траверсы и пиноли нанесено керамическое покрытие на основе Al_2O_3 .

Для распечатки результатов измерений КИМ (в частности, серии SMM фирмы Opton) снабжаются специальным графопостроителем Aristograph-CD-103 с пакетом

программного обеспечения КИМ типа CD-103. При этом обеспечивается передача данных (через программу сопряжения) графопостроителю в цифровой форме по нормам VDA (Союза автомобилестроителей ФРГ). Эти данные образуют файл VDA, который дешифрируется программой преобразования и передается в банк данных. Информация из банка может использоваться для вычерчивания кривых на графопостроителе (или графическом дисплее), стирания ряда элементов и представления вновь введенных данных и цифровой форме, что позволяет ускорить процесс проектирования и изготовления конструкторской документации.

Фирма КОМАТ занимается разработкой средств автоматизации, позволяющих использовать КИМ в условиях ГПС. К таким средствам относится автоматизированный измерительный комплекс модели АКЗ, предназначенный для выборочного контроля обработанных деталей (средних и небольших размеров), приспособлений и калибров в основном автомобильной промышленности. В его состав входят КИМ модели UMPC-850 фирмы Opton, склад (размеры в плане $3,1 \times 2,5$ м), на котором размещаются 20 плит-спутников (ПС) с установленными на них деталями (приспособлениями, калибрами); манипулятор, транспортирующий детали со склада на стол КИМ. Число деталей, расположенных на складе, обеспечивает функционирование комплекса в течение двух смен без вмешательства обслуживающего персонала.

Управление комплексом (в том числе измерением и функционированием вспомогательного оборудования) осуществляется от ЭВМ типа HP-1000 (или двух персональных ЭВМ) с применением ПРО фирмы Opton и пакета прикладных программ ATRAL и LMESS, причем последняя используется лишь для аттестации калибров по нормам DIN и ISO.

Входящая в комплекс КИМ модели UMPC-850 имеет перемещения по осям X, Y и Z соответственно 850, 700 и 450 мм; погрешность линейного измерения (в мкм) при 20°C $\delta = 1,2 + L/400$ (L в мм). Остальные характеристики соответствуют КИМ модели UMC-850.

Средства измерения (в частности, КИМ), встраиваемые в ГПС, должны не только иметь высокий уровень автоматизации, но и обеспечивать достоверность результатов измерений в производственных условиях. С этой целью фирмой КОМАТ разработана специальная кабина, предотвращающая проникновение пыли и влаги в зону измерения. Такая кабина состоит из двух камер.

Первая служит шлюзом, в ней деталь выдерживается некоторое время после обработки. Во второй — размещаются КИМ (фирмы Opton или MauSer) и пульт для ее управления.

Фирмой КОМАТ разработан также измерительный комплекс модели РКZ-850, в состав которого входит КИМ модели РМС фирмы Opton, установленная во внутренней камере кабины. В шлюзовой камере смонтировано перегрузочное устройство ПС на стол КИМ; максимальная нагрузка на ПС составляет 800 Н. Обслуживание комплекса осуществляется с помощью специального пульта и персональной ЭВМ, связанной с системой управления перегрузочным устройством.

Фирмой КОМАТ создано и выпускается рабочее место модели RP-850, используемое для подготовки программ измерения деталей на КИМ, а фирмой Feinprüf созданы устройства для измерения длины, формы и шероховатости поверхности деталей. Шкальные приборы и приборы с цифровой индикацией серии Millitron представляют собой многодиапазонные измерительные средства, имеют выходной сигнал в двоичном коде и могут подключаться к цифровым устройствам обработки информации.

Фирмой Perthen представлен широкий комплекс таких приборов серии Formtester, как ММQ-3 и ММQ-2 (для измерения округлости), оснащенных показывающим устройством (радиальная погрешность прибора более 0,1 мкм, осевая — не более 0,05 мкм). Прибор MFU-7 этой же фирмы предназначен для измерения округлости и прямолинейности. Для регистрации и обработки результатов измерений используется электронное устройство типа Rondoscor. На его экране отображается процесс подготовки программ, осуществляемых с помощью приставки Formmeter F5P, а также результаты измерения, которые могут быть выведены на устройство Markgraph в виде круговой диаграммы (профилограммы) или в виде линейной записи. По заказу фирмой поставляется устройство записи результатов измерений на магнитную ленту.

Для измерения округлости и прямолинейности сложных деталей (типа блоков, цилиндров и др.), в том числе несимметричных, предназначен прибор модели МФК-4 фирмы Perthen, особенностью которого является наличие гранитной плиты, на которую помещают измеряемую деталь. Тактильный щуп при измерении перемещается только в вертикальной плоскости. В большинстве выпускаемых приборов используются различные электронные

устройства. В частности фирмой КОМЕТ была представлена КИМ типа QDS-803, отличающаяся повышенной надежностью и предназначенная специально для применения в производственных условиях. Универсальное ПРО не требует специальных навыков при индивидуальном программировании, так как ввод данных производится в режиме диалога. В соответствии с решаемыми задачами возможны три режима работы КИМ: 100 %-й контроль по жестко заданным допускам; 100 %-й контроль по результатам статистического расчета погрешности измерения; селективный контроль по группам произвольно выбранных размеров с предварительно заданными интервалами. При любом режиме работы с помощью специальной клавиши вызывается программа, позволяющая получить для каждого контролируемого параметра карту управления качеством. Полученные результаты обрабатываются системой и хранятся в виде статистических данных, что позволяет в любое время воздействовать на ход производственного процесса.

Наличие дисплея в составе КИМ QDS-803 обеспечивает графическое отображение результатов, а следовательно, быструю оценку всей совокупности параметров. Для облегчения восприятия столбики диаграммы изображаются, как положительные и отрицательные отклонения от среднего значения допуска. Электронная система обработки сигналов в КИМ имеет 16 каналов для подключения тактильных щупов или для вывода аналоговых сигналов каких-либо других датчиков.

Приборы для измерения зубчатых колес созданы фирмой Höfler. Эвольвентометр серии EFRS, предназначенный для измерения зубчатых колес диаметром до 400 мм (модуль 0,2 — 1,5 мм), оснащен устройствами для контроля направления винтовой линии зуба. Кинематическая схема прибора построена на механическом принципе. Обработка результатов осуществляется с применением вычислительной техники; результаты отображаются на дисплее или могут быть выведены на печать и графопостроитель.

Эта фирма создала и выпускает специализированный прибор EMZ для контроля эвольвентного профиля, направления винтовой линии зуба, шага и биения зубчатых колес; его кинематическая схема построена на электронном принципе. Две модификации EMZ-400 и EMZ-630 предназначены для измерения колес диаметром 400 и 630 мм соответственно. Применение специальных электронных устройств расширяет метрологические воз-

возможности приборов (могут измеряться долбяки, шеверы, червячные фрезы, рейки, шлицевые валы, конические зубчатые колеса).

Глава 4

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ ДИАГНОСТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ

В современных технологических металлообрабатывающих системах все более широкое применение находят CNC системы ЧПУ, выполненные на основе микро-ЭВМ. Непрерывное техническое совершенствование используемых микро-ЭВМ позволяет значительно расширить функциональные возможности систем ЧПУ и использовать их не только для реализации функций управления технологическим процессом, но и для контроля его параметров с помощью специализированных внешних датчиков. Это, в свою очередь, позволяет выполнять диагностику состояния технологического оборудования и параметров процесса металлообработки, а следовательно, повышает качество обработки деталей.

1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ ЧПУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ

Отечественной промышленностью освоен выпуск CNC систем ЧПУ, предназначенных для управления линейными и шаговыми двигателями в приводах станков. Технические характеристики и конструктивные особенности некоторых систем ЧПУ рассмотрены ниже.

Система ЧПУ типа CNC-T, на базе микро-ЭВМ «Электроника-60» предназначена для управления токарными металлорежущими станками, оснащенными приводами подачи ЭТ-6 с датчиками обратной связи ДПФ-100. Система CNC-T имеет массу около 400 кг и габаритные размеры не более 530 × 600 × 1500 мм. Потребляемая мощность не более 1500 Вт. Управление электроавтоматикой станка осуществляется посредством программируемого контроллера, обеспечивающего максимальное перемещение приводов по координатам не более $\pm 7999,999$ мм. Программирование перемещений: относительное и абсолютное с дискретностью 0,001 мм. Система ЧПУ имеет и реализует тестовый контроль при

включении питания. Точность при позиционировании не хуже ± 1 дискрета, а точность выхода в «исходную точку» ± 1 мкм по любой из координат.

Запоминающее устройство (ЗУ) системы ЧПУ типа CNC-T состоит из ОЗУ емкостью до 32 Кбайт для хранения функционального матобеспечения, энергонезависимой памяти емкостью 8 Кбайт для хранения управляющих программ; энергозависимой памяти емкостью до 8 Кбайт для хранения констант и коррекций. ЗУ системы ЧПУ обеспечивает индикацию и сохранность управляющих программ в течение

120 ч после отключения источника питания, а также следующие виды коррекций: люфта в диапазоне от -1 до $+1$ мм по каждой из осей с дискретностью 1 мкм; линейных размеров с дискретностью 1 мкм (число коррекций 24); скорости подачи во всех режимах, кроме резьбонарезания, осуществляемой с пульта

оператора; частоты вращения шпинделя во всех режимах, кроме резьбонарезания, с дискретностью 10 % в пределах от 10 до 150 %; скорости быстрого хода с градациями 1 и 10 %. Система ЧПУ обеспечивает рабочие подачи до 4000 мм/мин и быстрый ход до 10 м/мин, точность поддержания контурной скорости не хуже 5 %, стабильность скорости резания в диапазоне ± 2 % в пределах одного механического оборота шпинделя, которая ограничивается на максимальной частоте вращения.

Система ЧПУ типа CNC-T выпускается с программируемым контроллером, запрограммированным под конкретный тип станка (табл. 12).

Система ЧПУ типа 2P22, выполненная на базе микроЭВМ «Электроника-60», предназначена для управления металлообрабатывающими станками, оснащенными следящими приводами. По схемно-структурному решению система ЧПУ реализует управление по четырем координатам с дискретностью управляемых перемещений в 1 мкм. Система содержит 512 знакомест на экране встроенного в ее корпус дисплея, питается от сети напряжением 380 В.

Таблица 12

Вариант исполнения системы ЧПУ	Количество сигналов электроавтоматики станка		Тип станка
	выходных	входных	
БП1.320.004	64		СТП-220 АП
БП1.320.001	32	64	СТП-320 ПР
БП1.320.002	32		СТП-125-4
БП1.320.003	96	160	СТП-125-5

Потребляемая мощность 1,1 кВт. Система, состоящая из блока приборного (весом 130 кг), пульта управления (6 кг) и дисплея (8 кг), позволяет свободно встраивать их в конструкцию станка, а также размещать органы управления в рабочей зоне станка. Основным функциональным и конструктивным блоком является блок приборный, выполненный в виде металлического шкафа. Пульт управления снабжен универсальной клавиатурой.

Информация может выводиться на экран дисплея, магнитную ленту и перфоленту. Система ЧПУ содержит 96 каналов для входных сигналов и 64 канала — для выходных, а также ОЗУ емкостью 10 Кбайт и ПЗУ, емкостью 32 Кбайт. Для подключения внешних аналоговых датчиков имеется пять аналого-цифровых преобразователей. Ввод информации осуществляется клавиатурой пульта управления или фотосчитывающим устройством.

Аппаратно-техническая часть системы ЧПУ в совокупности с программным обеспечением позволяет реализовать линейную интерполяцию одновременно по двум координатам, нарезание резьбы резцом, программное управление электроавтоматикой станка, диагностику функциональных узлов самой системы ЧПУ и управляющей программы. В системе ЧПУ используются индуктивные или фотоэлектрические измерительные преобразователи для отсчетов перемещений приводов суппорта.

Система ЧПУ типа 2Р22 имеет модификацию 2Р22-02, предназначенную для эксплуатации на металлорежущих станках, оснащенных шаговыми приводами суппорта. Для формирования соответствующих команд управления имеется специализированный блок управления шаговыми двигателями, который устанавливается в электрошкаф станка. Основные функции и технические характеристики системы ЧПУ 2Р22-02 соответствуют базовой модели 2Р22. Количество управляемых координат 3, количество преобразователей для фотоимпульсного датчика 1, количество входных сигналов 64, количество выходных сигналов 32, потребляемая мощность от сети питания — 1,3 кВт, масса блока управления шаговыми двигателями 20 кг.

Система ЧПУ типа 2У22, выполненная на базе микро-ЭВМ «Электроника-60», предназначена для управления металлорежущими станками. В совокупности с математическим обеспечением система реализует заданный состав (набор) алгоритмов управления. Число управляемых координат изменяется от 2 до 4, причем число одновре-

менно управляемых координат не более 3. Для связи с электроавтоматикой станка и передачи управляющих команд в системе ЧПУ имеется 160 дискретных входных (выходных) сигналов. Контанты и управляющие программы вводятся в ЗУ, содержащее ОЗУ емкостью 16 Кбайт и ПЗУ емкостью 24 Кбайт.

Аппаратно-технические средства системы в совокупности с соответствующим программным обеспечением позволяют реализовать следующие функции: одновременное управление по трем координатам с линейной интерполяцией; одновременное управление с круговой интерполяцией по двум координатам; ввод информации с пульта управления (клавиатуры), а также от ЭВМ верхнего уровня; вывод текущей информации на электронно-лучевой дисплей. Система ЧПУ с помощью измерительных преобразователей типа индуктосин или резольвер обеспечивает максимальное перемещение по координатам, равное 9999,999 мм, а также коррекцию радиуса и длины инструмента — 999,99 мм с числом пар коррекций до 99. Управление рабочими органами суппорта станка выполняется программно и обеспечивает рабочие перемещения на скорости до 5 000 мм/мин, скорость холостого хода — до 15 000 мм/мин. Для расширения функциональных возможностей системы ЧПУ в целом, а также упрощения ее эксплуатации в программном обеспечении предусмотрены процедуры: возврат на исходную траекторию; цикл разгона и торможения приводов суппорта; обработка управляющей программы; автоматическая компенсация в программном режиме люфта при реверсе; коррекция погрешности измерительных преобразователей; управление ориентированием и вывод откорректированной программы на перфоленту.

Система ЧПУ типа «Электроника НЦ-31» предназначена для применения в оперативной системе управления универсальным токарным станком, снабженным следящими приводами и фотоэлектрическими импульсными измерительными преобразователями. Система выполнена на базе 16-разрядного КМДП БИС микропроцессора, имеет постоянную память для хранения системных программ и оперативную память для хранения программ обработки деталей, реализует оперативный ввод, редактирование, исполнение программ обработки и управление станками с клавиатуры пульта непосредственно на рабочем месте. Модульное исполнение аппаратной части, стандартизированный интерфейс типа СМ ЭВМ и возможность замены постоянной памяти обеспечивает быстрое ее под-

ключение к другим типам станков, управляемых двумя-тремя координатами.

Ввод технологических программ обработки деталей производится как с кассеты электронной памяти, так и с пульта оператора, а вывод отлаженных программ и их загрузка в подобные системы ЧПУ — с помощью кассеты электронной памяти. Специальные программные средства, размещенные в постоянной памяти устройства ЧПУ, преобразуют введенную программу обработки в программу управления станком. Этот процесс перевода осуществляется автоматически без участия оператора. Язык описания программы обработки позволяет пользоваться только чертежом при составлении программы обработки детали. Объем ОЗУ для программы обработки 8 Кбайт, причем возможно наращивание (расширение) до 16 Кбайт. Объем постоянной памяти под управляющие системные программы 16 Кбайт. Редактирование программы обработки поадресное и включает просмотр, исключение и замену кадров, линейная интерполяция осуществляется по двум осям, а круговая интерполяция полной окружности — в базовой плоскости.

С помощью автоматического или ручного управления от пульта станка осуществляется: поиск кадра, начальная установка (сброс), ввод и размещение программ обработки в оперативной памяти, редактирование программ обработки, вывод программ обработки, проверка выполнения технологических программ обработки в реальном времени без перемещения органов управления. Реализация функций электроавтоматики станка — программная, предусмотрена выдача дискретных управляющих сигналов на станок (+24 В; 0,2 А). Для подачи и приема управляющих сигналов имеется 16 входов и 16 выходов. Способ кодирования — специальный язык, формат кадра свободный. Геометрическая информация задается в абсолютных и относительных размерах, скорость подачи при ручном управлении в мм/мин, при автоматическом — мм/об. Дискретность задания геометрической информации по оси z составляет 0,01 мм, по оси x — 0,01 мм на диаметр. Максимальное перемещение, задаваемое в кадре, составляет 9999,99 мм. Функциональные возможности ЧПУ значительно расширены за счет возможности самодиагностики при включении питания и в фоновом режиме во время работы.

Система ЧПУ реализует управление по четырем координатам с помощью 16-разрядных каналов связи, питается от электросети 220 В. Потребляемая мощность

0,4 кВт. Габаритные размеры $400 \times 266 \times 290$ мм, масса не более 40 кг. Основные технические характеристики следующие: диапазон рабочих подач 0,01—2047 мм/об; максимальная подача при резьбонарезании 2400 мм/мин; максимальная подача при автоматической обработке 1200 мм/мин; ускоренное перемещение в продольном направлении 6000 мм/мин и в поперечном 5000 мм/мин.

Система ЧПУ типа «Электроника К-60.680», выполненная на базе микро-ЭВМ «Электроника-60», предназначена для управления металлорежущими станками, оснащенными шаговыми приводами подач ШД-5. Конструктивно система выполнена в виде электрошкафа, габаритные размеры которого не более $600 \times 600 \times 1700$ мм, масса около 100 кг. Потребляемая мощность системы 0,6 кВт. Управление электроавтоматикой станка осуществляется посредством перепрограммируемого контроллера. Максимальное перемещение по координатам до 8 разрядов, т. е. 9999,999 мм. Программирование перемещений относительно с дискретностью 1 мкм по координате x и 2 мкм по координате z . Система ЧПУ имеет и реализует автономно тестовый контроль при включении питания. Для хранения системного программного обеспечения в системе ЧПУ имеется ОЗУ емкостью до 32 Кбайт. Частота формирования и выдачи управляющих команд на шаговые приводы станка составляет от 18 до 40 кГц, что соответствует скорости 18—40 мм/с, т. е. 1080—2400 мм/мин.

Структура аппаратных средств и программного обеспечения системы ЧПУ позволяет использовать ее для управления металлорежущими станками типа ТПК-125, 1А616, ИЖ1И611ПМФ3, 6520Ф3.

2. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА

ДЛЯ СОПРЯЖЕНИЯ УСТРОЙСТВ КОНТРОЛЯ

ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ С ПРОЦЕССОРОМ СИСТЕМЫ ЧПУ

Эффективность современных технологических металлообрабатывающих систем может быть значительно расширена путем оснащения их приборами контроля и диагностики параметров процесса резания. Практическая эксплуатация последних требует их сопряжения с микро-ЭВМ системы ЧПУ для оперативной обработки вводимых сигналов о состоянии процесса резания и соответствующей коррекции режимов резания и траектории движений инструмента. Поскольку в рассмотренных выше системах ЧПУ используется однотипная микро-ЭВМ «Электроника-60», то ввод аналоговых сигналов от датчиков может

быть аппаратно реализован как с помощью ее же интерфейсных средств, так и с помощью дополнительно созданных специализированных интерфейсных устройств.

Для подключения внешних устройств пользователя к микро-ЭВМ «Электроника-60» можно использовать несколько типов имеющихся в ее комплекте интерфейсных устройств: параллельного обмена И-2; прямого доступа в память И-3; последовательного обмена (интерфейс пользователя) И-5.

Устройство параллельного обмена И-2 предназначено для подключения к каналу ЭВМ внешних датчиков и приборов, обменивающихся с процессором данными в параллельном коде. Устройство И-2 имеет 16 входных ТТЛ линий для ввода данных из внешнего датчика или прибора в ОЗУ процессора и 16 выходных ТТЛ линий для вывода данных из процессора во внешний прибор, а также четыре управляющие линии. Максимальная скорость передачи при программном управлении составляет 180 Кбайт/с. Устройство И-2 обеспечивает возможность работы в режиме прерываний.

Если используемый датчик предназначен для работы в режиме прямого доступа к памяти, то для подключения его к каналу ЭВМ можно использовать устройство И-3 прямого доступа к памяти, позволяющее производить обмен словами и байтами в циклах ВВОД, ВЫВОД, ВВОД — ПАУЗА — ВЫВОД как единичными циклами, так и в страничном режиме. Устройство И-3 содержит пять регистров адреса, которые указаны в его техническом описании.

Если используемый датчик способен обмениваться информацией в последовательном коде, можно для подключения его к каналу ЭВМ применить устройство последовательного обмена 15-ВВВ-60/960-003, которое предназначено для связи с объектом через токовую петлю в 20 мА. Оно имеет каналы ввода и вывода информации. Максимальная скорость обмена 9600 бод. Устройство последовательного обмена имеет два регистра состояния и два регистра ввода-вывода, адреса которых могут изменяться. Устройство обеспечивает возможность работы в режиме прерывания программы, два адреса векторов прерывания могут варьироваться пользователем.

Для обеспечения подключения к каналу процессора системы ЧПУ различных периферийных устройств предназначен интерфейс пользователя И-5, содержащий адресный сектор на четыре канала, логику требования прерывания на два канала, приемо-передатчики на линиях

данных адреса и свободные позиции для установки микросхем пользователя. Габаритные размеры и конструктивное исполнение устройства И-5 такие же, как и центральных процессоров М-2 и М-3.

Для ввода импульсных сигналов в микро-ЭВМ, формируемых на выходе однокординатных ПЗС-приемников изображения и используемых в составе лазерных оптико-электронных измерительных приборов, применяется специализированное интерфейсное устройство МС-2 (модуль сопряжения).

3. ИНТЕРФЕЙСНОЕ УСТРОЙСТВО ВВОДА ДИСКРЕТНЫХ И АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ В МИКРО-ЭВМ

В настоящее время применяются различные устройства ввода дискретных и аналоговых сигналов в мини- и микро-ЭВМ. Как правило, их организация и методы обработки входных сигналов ориентированы на конкретную структуру информационно-измерительной системы и физическую связь с первичными датчиками. Выбор метода обработки и его технической реализации зависит от требуемой скорости обработки, объема выборок, быстродействия вычислительной машины и других факторов.

Функциональная схема интерфейсного устройства МС-2 для ввода аналоговых сигналов в микро-ЭВМ семейства ДВК показана на рис. 39. В состав устройства входят следующие функциональные блоки: регистры данных (РД), команд (РК) и состояний (РС); дешифратор адресов и команд управления (управляющих слов микро-ЭВМ) (ДКУ); устройство управления и синхронизации (УУС), поддерживающее работоспособность всех исполнительных внутренних узлов модуля; адаптаторы канала (АК), осуществляющие логическое и физическое согласование с каналом микро-ЭВМ; аналоговый коммутатор входных сигналов (АНК); нормирующее устройство (НУ); аналого-цифровой преобразователь (АДП); буферное оперативно-запоминающее устройство (БОЗУ); счетчик адреса (СА) БОЗУ.

Принцип работы устройства МС-2 заключается в следующем. Сигналы с информативных датчиков, удаленных от измерительной системы, поступают на вход АНК, который управляется РК. С выхода АНК сигнал (его напряжение U_c) поступает на НУ, необходимое для ввода сигнала в область динамического диапазона АЦП. НУ так же осуществляет физическое согласование

характеристик сопротивлений датчика и АЦП с учетом волнового сопротивления соединительного кабеля. Оно имеет в свою очередь четыре входных канала для различной обработки сигнала, программное переключение которых реализуется посредством ПК. Каждый канал

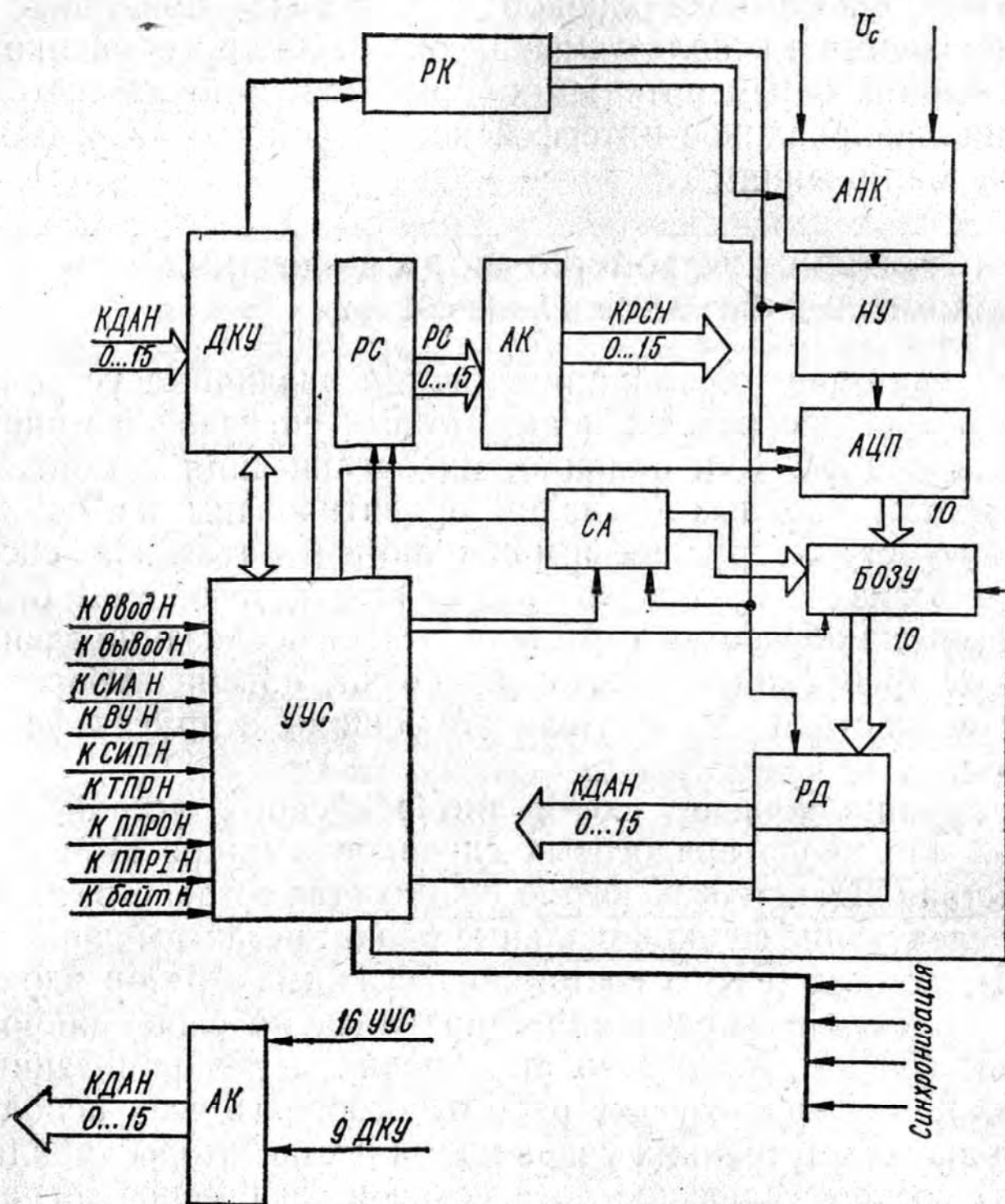


Рис. 39. Функциональная схема устройства МС-2

имеет полосу пропускания не хуже 1 МГц при размахе $U_c = 5,12...10,24$ В и нелинейных искажениях не более 1 %. Каждый канал имеет защиту от перенапряжений на входе аналого-цифрового преобразователя, повышающего надежность работы последнего. НУ содержит устройство мгновенной памяти (УМХ) для фиксации дискретных выборок. АЦП формирует за время преобразования (не более чем 30 мкс) на выходе десятиразрядный параллельный двоичный нормальный код, записываемый в БОЗУ по командам устройства управления и синхро-

низации (УУС). Адрес БОЗУ задается счетчиком адреса (СА). Счетчик адреса и БОЗУ ориентированы на организацию $1 \text{ Кбит} \times 10$ разрядов. В адресном пространстве микро-ЭВМ, используемом МС-2, имеется адресное «окно», позволяющее установить на СА модуля любой адрес канала выборки. Это удобно в случае малой выборки и является аппаратным расширением для перспективных работ. По заполнению БОЗУ УУС информирует регистр состояния (РС) модуля о готовности передать накопленную информацию в ОЗУ микро-ЭВМ для последующей обработки. С помощью соответствующей программы данные пересылаются через регистр данных модуля (РД) в ОЗУ микро-ЭВМ. Дешифратор команд служит для распознавания машинных команд и управления работой УУС, вырабатывающего все необходимые воздействия для обеспечения работоспособности всех внутренних узлов модуля. УУС обеспечивает работу модуля в двух режимах автозагрузки БОЗУ программно выбранных входных аналоговых каналов, к которым подключен датчик, обладающий самосинхронизацией, например, формирователь видеосигнала ПЗС приемника с собственным синхросигналом. В этом режиме после подачи команды «разрешение видеосигнала», УУС блокирует связь с процессором микро-ЭВМ и осуществляет прием, кодирование и запись данных в БОЗУ, т. е. принимает на себя функции активного устройства. Достоинством этого режима является способность модуля функционировать в условиях вынужденной регенерации динамической памяти, входящий в состав большинства вычислительных комплексов семейства «Электроника-60». По заполнении БОЗУ УУС устанавливает флаг готовности передать накопленные данные и восстанавливает связь с микро-ЭВМ. Данный режим необходим для быстрого перевода энергозависимых и времязависимых сигналов (например, с видеосигнала ПЭС) в цифровой код записываемый в БОЗУ.

Режим «разового пуска» более приемлем для медленно флюктуирующих и аperiodических сигналов. Время одного цикла кодирования определяется быстродействием используемой микро-ЭВМ. В адресном поле БОЗУ при этом могут выставляться произвольные адреса.

Модуль сопряжения МС-2 содержит четыре взаимонезависимых и программно переключаемых входных канала, расположенных на многоштыревом одном разъеме ГРПМ10-64ШБ2 типа «вилка». Каждый из входных каналов может быть программно переключен процессором микро-ЭВМ к конкретному типу входного сигнала

для его кодирования и записи в ОЗУ. Первый канал предназначен для ввода электрических сигналов напряжением от 0 до +10,24 В, имеет закрытый вход и предназначен для ввода сигналов однокоординатного ПЗС приемника, содержит резисторный преобразователь уровня, регулируемый двумя потенциометрами (один — осуществляет смещение сигнала, второй — усиление амплитуды сигнала). Вторым каналом имеет закрытый вход и предназначен для ввода сигналов от 0 до +5,12 В, третий — открытый вход для ввода сигналов от 0 до +10,24 В. Четвертый канал имеет открытый вход и предназначен для ввода сигналов от -5,12 до +5,12 В. По каждому каналу входной сигнал может быть введен одним из двух режимов: автоматическим — по внешним синхронизациям формирователя видеосигнала, разовым — по внутреннему запуску АЦП, формируемому программно с пульта микро-ЭВМ.

Основные технические характеристики интерфейсного устройства МС-2 приведены ниже.

Диапазон амплитуд входных сигналов	-5,12 ÷ +5,12 В 0 ÷ +10,24 В
Количество входных каналов	4
Количество каналов синхронизации момента запуска (КС) АЦП	4
Количество каналов синхронизации полного интервала ввода видеосигнала (ДС)	4
Количество уровней квантования АЦП	1024
Интервал дискретизации АЦП	30 мкс
Емкость БОЗУ	1024 отсчета × × 10 разрядов
Габаритные размеры	280 × 240 мм
Напряжение питания	+12,6 В (0,2 А); -12,6 В (0,2 А); +5 В (1,5 А)

4. ТЕКУЩАЯ КОРРЕКЦИЯ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ НА ОСНОВЕ ДИАГНОСТИКИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

Диагностика процесса металлообработки обеспечивает заданное качество обрабатываемых деталей и необходимую производительность в результате сравнения измеряемых параметров с заданными. Точность реализации этих факторов осуществляется с помощью физических либо эмпирических моделей процесса. Модель пред-

ставляет собой систему математических уровней, решение которых реализуется на основе поступающих с диагностических датчиков исходных данных. Приведенные ранее модели процесса металлообработки включают постоянные, заданные параметры. Кроме того, существуют модели, значения параметров которых могут быть изменены по мере поступления информации о процессе. Самообучающаяся модель позволяет изменять свои параметры на основе анализа поступающей информации согласно разработанной стратегии металлообработки.

В реальных условиях из-за случайного характера многих параметров процесса резания рациональные режимы, установленные в результате оптимизационных расчетов, оказываются не оптимальными для конкретной пары инструмент — деталь. Это объясняется наличием возмущающих во время диагностики процесса резания воздействий, которыми могут быть следующие переменные: 1) динамическая жесткость системы ТОС (собственные и вынужденные колебания); 2) обрабатываемость материала заготовки, вызванная неоднородностью материала (переменность свойств материала ведет к непостоянной обрабатываемости и к изменению интенсивности износа режущего инструмента); 3) режущая способность инструмента, обусловленная неоднородностью материала режущей части инструмента и заготовки; 4) колебания размеров заготовки, определяющие изменения глубины резания.

Очевидно, что предварительная оптимизация позволяет контролировать влияние динамической жесткости системы ТОС, вводя ее в систему ограничений.

В условиях специализированного участка станков с ЧПУ с помощью организационных мероприятий, жесткого входного контроля заготовок, поступающих на участок, удастся добиться минимального влияния 4-й переменной.

Главными нерегулируемыми возмущающими воздействиями во время обработки являются 2-я и 3-я переменные. Именно большие колебания свойств инструментального и обрабатываемого материалов являются основными факторами, приводящими к большому разбросу периода стойкости инструмента (в некоторых случаях до 100 %) и, в конечном счете, к потере производительности труда, к увеличению расхода материала режущего инструмента и к росту себестоимости продукции.

В результате изменения входных величин, предварительное определение которых невозможно, постоянно

изменяются интенсивность износа инструмента и, следовательно, значения критериев оптимальности.

Эти объективные предпосылки приводят к тому, что только на основании диагностики необходима реализация текущей оптимизации процесса обработки. Текущая оптимизация возможна только на базе построения динамической математической модели и осуществляется на основе информации о процессе резания, поступающей непосредственно в микро-ЭВМ при обработке деталей на станках с ЧПУ.

Для текущей оптимизации процесса металлообработки необходима информация о зависимости между износом и условиями обработки, что обусловлено переменными режимами резания и нелинейностью зависимости износа от времени резания. Для текущей оптимизации, кроме того, необходимы сведения об изменении во времени функциональной зависимости для износа инструмента, а не сведения о собственной стойкости, которая характеризуется определенной точкой на кривой износ — время. Для получения зависимости износ — время необходимо использовать сочетание теории автоматического регулирования и математической модели. Исходными данными для текущей оптимизации являются внешние оптимизированные режимы резания (предварительная оптимизация) и граничные условия. С помощью специально разработанного диагностического оптического датчика, описанного выше, износ режущего инструмента измеряется во время перерывов в работе.

Действительный износ с помощью ЭВМ сравнивают с заданным износом, соответствующим результату предварительной оптимизации, и при необходимости корректируют режимы резания, чтобы можно было продолжать обработку без смены инструмента.

Критерием оптимальности является мгновенное значение одной из принятых целевых функций себестоимости и производительности.

Регулирующей величиной является технологический режим: частота вращения шпинделя n , так как при оптимизации обработки фасонных деталей скорость резания на каждом участке различна, а частота вращения шпинделя является одинаковой для всех участков.

Выбор частоты вращения в качестве регулирующей величины объясняется следующим образом: частота вращения шпинделя зависит от скорости резания, которая оказывает наибольшее влияние на период стойкости инструмента и имеет широкий диапазон изменения. Ос-

тальные рабочие режимы резания (подача и глубина) не изменяются для поддержания постоянства шероховатости обработанной поверхности и упрощения алгоритмов диагностики процесса. С другой стороны, подача и глубина резания при чистовой обработке менее активно влияют на стойкость инструмента. Так, увеличение глубины резания на 100 % приводит к снижению стойкости на 25 %, увеличение подачи на 50 % ведет к снижению стойкости на 60 %, а при увеличении скорости резания на 50 %, стойкость уменьшается на 90 %.

Оптимальная частота вращения шпинделя определяется путем дифференцирования по частоте вращения шпинделя принятых целевых функций и приравнивания производных к нулю:

по себестоимости обработки

$$n_c = \frac{10^3}{\pi d_s} \left[\frac{C}{(\mu_v - 1) (\tau_{см} + W_T/E_c) S_0^{\mu_s}} \right]^{1/\mu_v},$$

по производительности обработки

$$n_{п} = \frac{10^3}{\pi d_s} \left[\frac{C}{(\mu_v - 1) \tau_{см} S_0^{\mu_s}} \right]^{1/\mu_v},$$

по компромиссному критерию

$$n_{ф} = \frac{10^3}{\pi d_s} \left[\frac{C}{(\mu_v - 1) (\tau_{см} + C_0 W/E_c) S_0^{\mu_s}} \right]^{1/\mu_v},$$

где d_s — эквивалентный диаметр, рассчитываемый согласно форме детали; $\tau_{см}$ — время смены инструмента; W_T — затраты на инструмент за период его стойкости; E_c — минутная стоимость работы станка.

Проведенный анализ работ показал, что наиболее целесообразно и эффективно решается задача текущей оптимизации по регулярному алгоритму. Оптимизация по регулярному алгоритму применяется тогда, когда имеется замкнутая математическая модель, т. е. в этом случае должно быть известно действие входных параметров на результат процесса резания. С помощью математической модели предварительно производится расчет оптимальных значений для регулируемых входных величин.

При оптимизации по регулярному алгоритму изменения входных, неуставливаемых заранее величин, которые проявляются через изменения характеристик процесса и выражаются в количественном изменении математической модели, не только фиксируются по измене-

ниям выходных величин, но тотчас после появления их воздействия на входные показатели процесса компенсируются изменением регулируемых входных величин. Своевременная количественная оценка характеристик процесса осуществляется по информации о текущем про-

цессе износа режущего инструмента: $\int_0^{h_g} dh = \int_0^T v_h d\tau$.

Скорость износа во времени $v_h = dh/d\tau = f(\tau)$.

В зоне нормального износа с достаточной точностью может быть принята линейная зависимость между шириной площадки износа по задней поверхности и временем резания, причем $h_d - h_0 = (dh/d\tau) T$ при $dh/d\tau = \text{const}$; $T = (h_d - h_0)/(dh/d\tau)$.

Отношение дифференциалов $dh/d\tau = f(n, s, t)$ можно рассматривать как сигнал, характеризующий процесс резания в динамическом состоянии.

При обработке деталей небольших габаритных размеров время резания составляет минуты. Из этого следует, что диагностика процесса металлообработки осуществляется с помощью сигнала об износе инструмента, снимаемого после обработки одной или группы деталей.

Ввиду дискретного измерения износа инструмента, отношение дифференциалов $dh/d\tau$ может быть заменено отношением $\Delta h/\tau$, где Δh — приращение износа инструмента, полученное после обработки одной детали; τ — время обработки одной детали; т. е. для каждого измерения сигнал $\Delta h/\tau$, а также частота вращения шпинделя остаются постоянными. Изменение частоты вращения шпинделя, а благодаря этому реализация процесса по мгновенному оптимуму целевой функции, осуществляется обычно дискретными ступенями, соответствующими времени цикла коррекции. При одном измерении можно рассматривать $h = \text{const}$, а процесс резания — как статический. Из этого следует, что для каждого цикла измерения характерно как динамическая стойкостная зависимость, так и статическое уравнение стойкости:

$$C (h_d - h_0)/\Delta h = C/(n^{\mu_v} S^{\mu_s}) (10^3/\pi d_s)^{\mu_v}.$$

Обозначив $C_\tau = C/S^{\mu_s}$, получим $\tau (h_d - h_0)/\Delta h = (C_\tau/n^{\mu_v}) (10^3/\pi d_s)^{\mu_v}$.

Изменяя показателя μ_v для различных процессов металлообработки значительно меньше чем коэффициента

$$C_\tau = (h_d - h_0)/(\Delta h/\tau) (\pi d_s/10^3 n)^{\mu_v} = f(\tau).$$

Однако можно заметить, что скорость износа режущего инструмента $v_h = \Delta h/\tau$ в пределах одного измерения при обработке фасонной детали непостоянная из-за переменной скорости резания. Поэтому используем термин средней скорости износа инструмента за время обработки фасонной детали.

Предполагается, что скорости резания v и износа инструмента v_{hk} на каждой ступени вала постоянны. В формуле вместо T_s и T_k подставим значения $T_s = h_d - h_0/v_{h_s}$, $T_k = h_d - h_0/v_{h_k}$. Тогда $v_{h_s} = \frac{\sum_{k=1}^Q v_{h_k} \tau_k}{\sum_{k=1}^Q \tau_k}$.

Учитывая, что $\Delta h_k = v_{h_k} \tau_k$ и $\tau = \sum_{k=1}^Q \tau_k$, получаем

$$v_{h_s} = \frac{\sum_{k=1}^Q \Delta h_k / \tau_k}{\sum_{k=1}^Q \tau_k / \tau} = \Delta h / \tau. \quad (5)$$

Таким образом, средняя скорость износа инструмента за время обработки фасонной детали вычисляется как отношение приращения износа инструмента к времени обработки этой детали. В связи с этим, выражение (3) может быть применено для текущей оптимизации фасонной поверхности.

Определим значение коэффициента стойкости C_T при обработке группы деталей. Допустим обрабатывается M деталей и коррекция частоты вращения шпинделя ведется на основании диагностики износа инструмента. За каждый цикл диагностического измерения величины износа для узкого интервала времени эмпирический коэффициент стойкостной зависимости считается достоверным и неизменным. После коррекции частота вращения шпинделя n для обработки M деталей должна оставаться постоянной. Тогда для каждой детали характерен следующий порядок расчета. В каждом цикле диагностики и измерения износа инструмента в микро-ЭВМ поступает информация об износе инструмента h_j . В памяти имеются все постоянные величины, встречающиеся в уравнениях математической модели, а также предыдущий сигнал износа h_{j-1} .

На основании этого определим $\Delta h_j = h_j - h_{j-1}$ и $v_{h_{sj}} = \Delta h_j / \tau_j$ (в дальнейшем обозначаем v_{h_j}), где $\tau_j = \sum_{k=1}^Q l_k / n_i S$ — время обработки одной детали, а затем определим значение коэффициента C_T по выражению $C_{T_j} = h_d - h_0 / v_{h_j} (\pi d_s / 10^3 n)^{\mu v}$, где i -я коррекция.

Значения C_{T_j} находятся в памяти до тех пор, пока $j = M$. По окончании такого состояния из M дискретных значений для постоянной C_T подсчитывается среднеарифметическое значение \bar{C}_{T_i} для интервала времени $M\tau_i$:

$$\bar{C}_{T_i} = \sum_{j=1}^M C_{T_j} \tau_i / M \tau_i = \sum_{j=1}^M C_{T_j} / M.$$

Используя среднее значение \bar{C}_{T_i} , по известному уравнению статической модели можно определить оптимальную частоту вращения шпинделя для очередного интервала обработки:

по себестоимости обработки

$$n_{c_{i+1}} = \frac{10^3}{\pi d_s} \left[\frac{\bar{C}_{T_i}}{(\mu_v - 1) (\tau_{cm} + W_T / E_c)} \right]^{1/\mu_v},$$

по производительности обработки

$$n_{п_{i+1}} = \frac{10^3}{\pi d_s} \left[\frac{\bar{C}_{T_i}}{(\mu_v - 1) \tau_{cm}} \right]^{1/\mu_v},$$

по компромиссному критерию

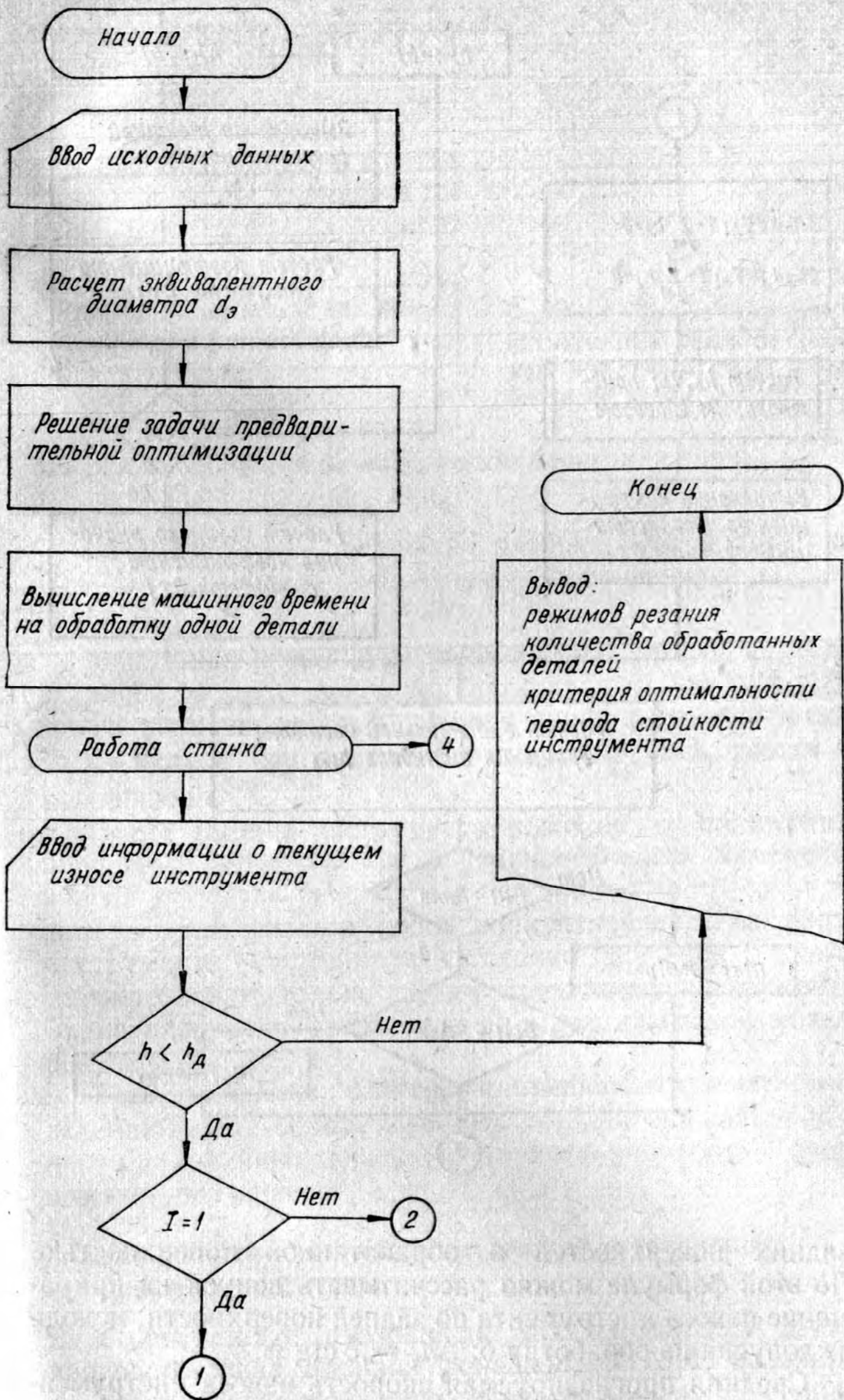
$$n_{\phi_{i+1}} = \frac{10^3}{\pi d_s} \left[\frac{\bar{C}_{T_i}}{(\mu_v - 1) (\tau_{cm} + C_0 W_T / E_c)} \right]^{1/\mu_v}.$$

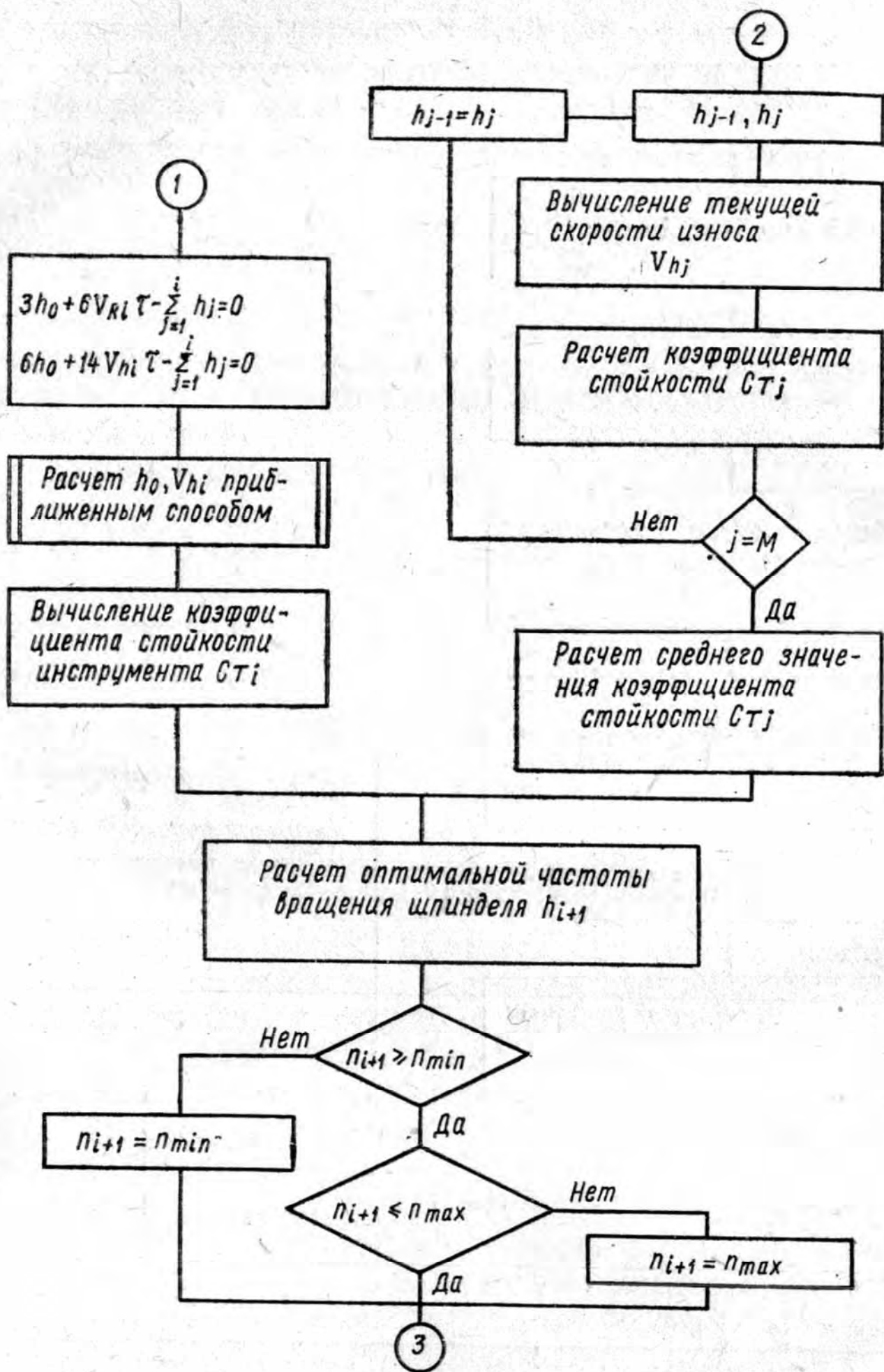
Затем проверяется, находится ли данная частота вращения шпинделя n_{i+1} в рабочем диапазоне, и после этого производится коррекция частоты вращения шпинделя n . Нижний и верхний пределы n_{min} , n_{max} определяются из системы ограничений при $S = S_{opt} = const$.

Процедура повторяется до достижения предельного допустимого износа n_d .

В процессе резания из-за постоянного размерного износа режущего инструмента точность обработки детали постоянно уменьшается и достигает определенного значения (выходит за предел допуска на обработку детали δ), который является моментом коррекции. Тогда, если суммарное приращение размерного износа инструмента, измеренного при диагностике в направлении, перпендикулярном к обработанной поверхности, за время обработки между интервалами коррекции равно или больше δ , следует производить коррекцию.

Зависимость между шириной фаски износа по задней поверхности h и размерным износом h_p описывается формулой $h = h_p \operatorname{ctg} \psi$, где ψ — проекция угла, образованного между ребром пересечения главной и вспомогательной





задних поверхностей и обработанной поверхностью. По этой формуле можно рассчитывать допуск на приращение износа инструмента по задней поверхности, исходя из допуска на обработку δ : $\Delta h_k = \delta \operatorname{ctg} \psi$.

Средняя прогнозируемая скорость износа инструмента для очередной коррекции может быть определена по частоте вращения шпинделя $v_{hn(i+1)}$ и получаемому



Рис. 40. Схема алгоритма оптимизации режимов резания при диагностике обработки фасонной детали

текущему значению коэффициента из выражения $v_{hn(i+1)} = h_d - h_0 / \bar{C}_{T_i} (\pi d_s / 10^3 n_{i+1})^{\mu v}$.

Следовательно, интервал времени обработки до $(i + 1)$ -й коррекции рассчитывается по формуле $\tau_{ki+1} = \Delta h_k / v_{hn_{i+1}}$.

Машинное время обработки каждой детали для следующей частоты вращения шпинделя $\tau_{i+1} = l / (n_{i+1} S)$.

Тогда число деталей, которое может быть обработано до очередной коррекции $M = \tau_{ki+1} / \tau_{i+1} \geq 1$, где M — целое число.

После замены инструмента необходимо, по крайней мере, три первоначальных диагностических измерений износа с целью нахождения n методом регрессивного анализа, так как для любой конкретной пары материал инструмента — материала заготовки значение v может соответствовать только данному режущему инструменту. Схема алгоритма рассмотренной математической модели показана на рис. 40.

Таким образом, благодаря предварительному определению числа обрабатываемых деталей снижается процент бракованных деталей и точность обработки существенно повышается.

5. МЕТОДОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ ПОЛИПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В результате применения многомодельных систем диагностическая система, оснащенная ЭВМ, позволяет не только сигнализировать о неисправности при обработке, но и указать ее причину.

Для того чтобы установить, какой сложности необходимо создавать математическую модель и систему диагностики, необходимо провести анализ процесса металлообработки. В результате данного анализа устанавливается, какой вид процесса диагностируется (точение, шлифование, фрезерование, сверление и т. д.), какой параметр процесса диагностируется, сколько датчиков будет применено, как будут обрабатываться их сигналы и какими параметрами процесса можно варьировать.

Так, при точении детали диагностика выкрашивания и поломки режущей кромки токарного резца осуществляется по сигналу виброакустического датчика, закрепленного на державке резца. Сигнал проходит через усилитель, фильтр, волновой анализатор и вводится в компьютер для дальнейшей обработки. Частота считывания сигнала устанавливается в пределах 0,2—0,3 с, что позволяет практически непрерывно диагностировать состояние режущей кромки. В течение многих экспериментов было установлено, что выкрашивание или поломка режущей кромки резца приводит к резкому ступенчатому изменению виброакустического сигнала, причем это изменение зависит от степени выкрашивания. Такие же срывы генерации виброакустического сигнала возникают на инфранизкой частоте при достижении предельного износа режущего инструмента, которые могут быть проанализированы только с помощью компьютера. Еще более сложная задача диагностики выкрашивания режущей кромки возникает при фрезеровании, когда прерывистость самого процесса приводит к пульсации как сил резания, так и других параметров. Поэтому одновременно с измерением силы резания, снимается информация с двух акселерометров: один установлен на шпинделе станка, а второй — в приспособлении для крепления детали. Поступающие сигналы фильтруются и преобразуются, а затем с помощью кепстрем анализа определяется состояние режущей кромки фрезы. Для того чтобы получить высокую точность изделия при шлифовании, производится одновременно контактное измерение колебаний, определяемое как волнистостью поверхности, так и вибрациями детали, и измерение колебаний детали с помощью закрепленного на ней датчика. Производимое с помощью ЭВМ последующее сравнение этих двух сигналов позволяет диагностировать волнистость поверхности [25].

При диагностике процесса сверления, когда в работе участвуют три режущие кромки сверла (две главные и

одна поперечная), одновременно измеряются осевая сила и подача. Большинство диагностических систем в металлообработке решают задачу только в узком диапазоне для одного вида обработки и материала и заданных режимов резания.

Основной причиной сложившейся ситуации являются очень упрощенные математические модели, не позволяющие найти взаимосвязь возникающих между

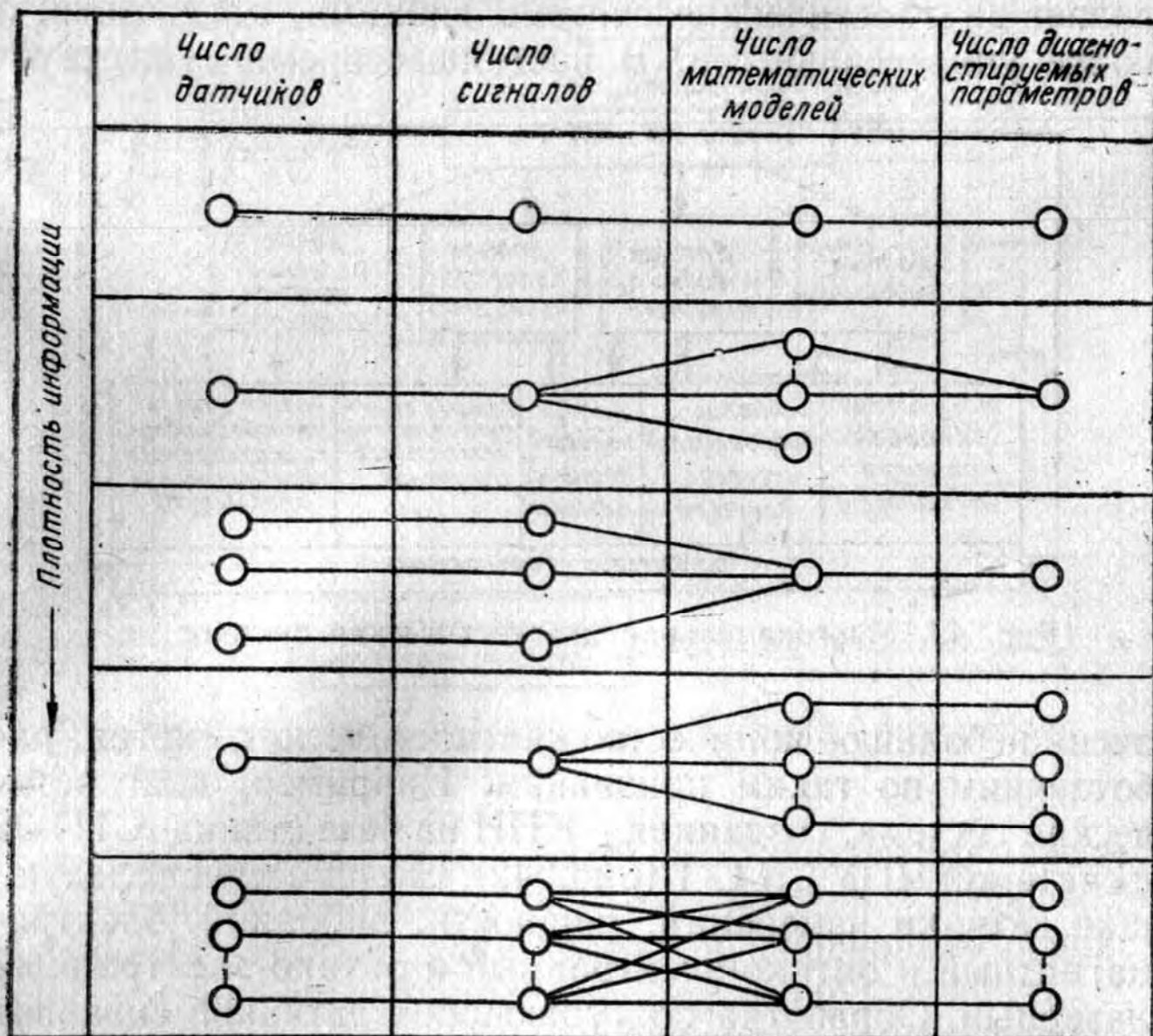


Рис. 41. Варианты комбинаций диагностических систем

многочисленными варьируемыми параметрами процесса резания и сигналами, поступающими от датчиков.

Поэтому современные диагностические системы должны быть оснащены несколькими сенсорами, формирующими сигналы о состоянии нескольких параметров процесса резания. Для успешной работы многосенсорных систем требуются сложные математические модели. Существует несколько сочетаний сенсоров и моделей, применяемых в настоящее время. Самая простая система, когда один датчик диагностирует один физический параметр, требует упрощенной математической модели. Более надежную диагностику можно вести, когда информация одного сенсора обрабатывается несколькими математи-

ческими моделями. Такие диагностические системы называются многомодельными. Другой вид системы, когда результат информации с нескольких сенсоров обрабатывается одной моделью для получения наиболее точной информации о любом параметре процесса резания. Различные варианты построения диагностических систем показаны на рис. 41. Использование большого числа датчиков и математических моделей для обработки сигналов делает диагностические системы гибкими, надежными и более универсальными. В настоящее время существует

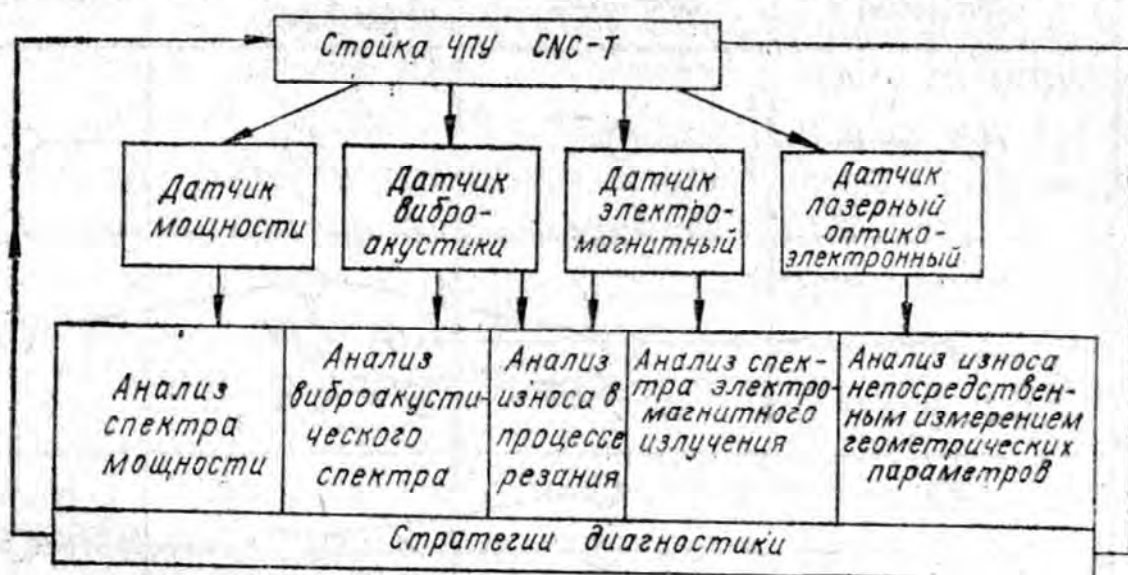


Рис. 42. Многоканальная диагностическая система

очень небольшое количество диагностических систем, работающих по таким признакам. Например, диагностическая система, созданная в КПИ на базе станка СТП-32 с системой ЧПУ CNC-T (рис. 42). Система имеет следующие датчики измерения: мощности, вибраций, электромагнитный и оптико-электронный и оптико-электронный лазерный. Обработка поступающих с датчиков сигналов с помощью ЭВМ ДВК-3 позволяет с высокой степенью точности производить диагностику состояния режущей части инструмента, ресурс ее работы.

Другим принципом построения диагностической системы является мониторинг внутреннего шлифования микрокомпьютером на основе измерения сил резания [25]. Нормальная составляющая сил резания измеряется пьезоэлектрическим датчиком, установленным на шпинделе станка (рис. 43). В качестве контроллера используется 16-битовый микропроцессор, осуществляющий численную обработку сигналов с помощью разработанного алгоритма. Система работает таким образом, что вначале происходит ее обучение и ввод в алгоритм необходимых коэффициентов. Структурная схема обучающейся диагностической системы показана на рис. 44. В обычных

системах диагностика осуществляется путем непосредственного сравнения снимаемого сигнала с его заданным значением. В обучающихся системах создается подсистема обучения и корректировки.

Регулируемые параметры включают в себя не только те, с которых снимаются сигналы, но и те, с помощью которых реализуется стратегия диагностики на основании разработанной математической модели и алгоритма. Справочная подсистема реализует данные, накопленные

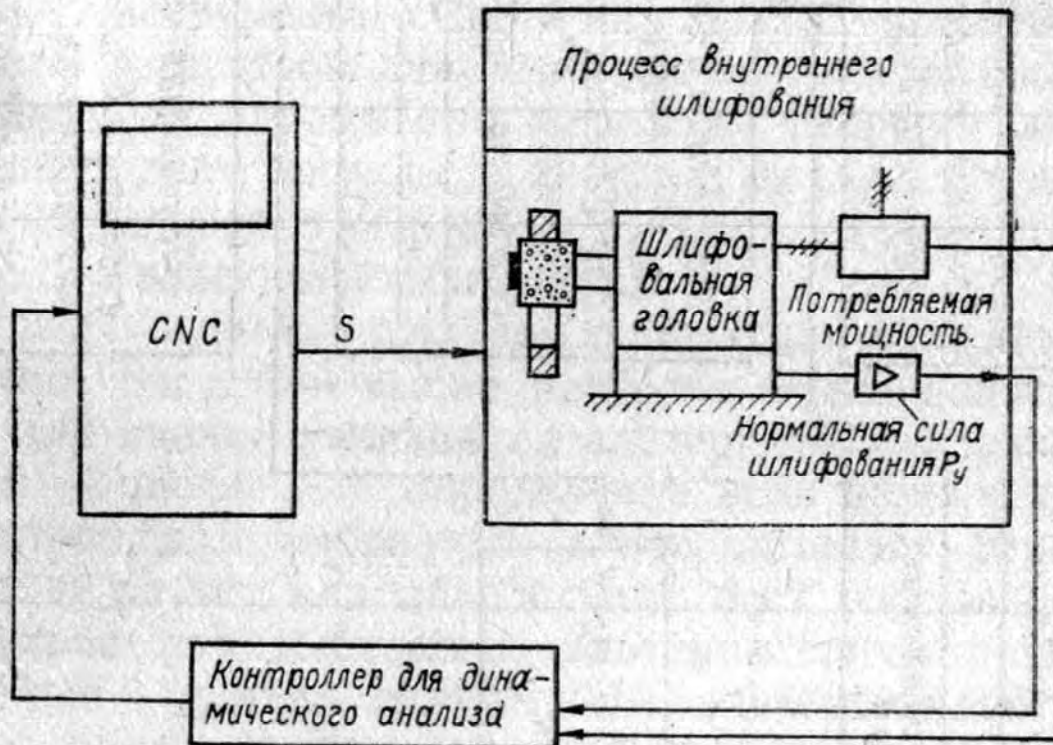


Рис. 43. Схема диагностики процесса внутреннего шлифования: S — подача

от непосредственного измерения параметров процесса резания, вносимые оператором изменения, и информацию из банка данных. Таким образом, справочная подсистема дает все необходимые данные для обучающей системы с высокой точностью и надежностью, учитывая как непосредственные измерения, так и знания оператора и опыт технологов.

Третья подсистема осуществляет функцию обучения системы на основании сравнения данных, поступающих с измерительных датчиков с данными, приводимыми справочной подсистемой и на основании этого сравнения поступают рекомендации в корректирующую и обучающую подсистемы. Существуют два пути для обучения этой подсистемой. Один путь — изменение параметров математической модели, второй — изменение структуры самой модели. Последний путь наиболее труден, так как требует глубоких и точных знаний о процессе резания. Но создание гибких алгоритмов позволяет создать системы, максимально приближающиеся к реальным условиям

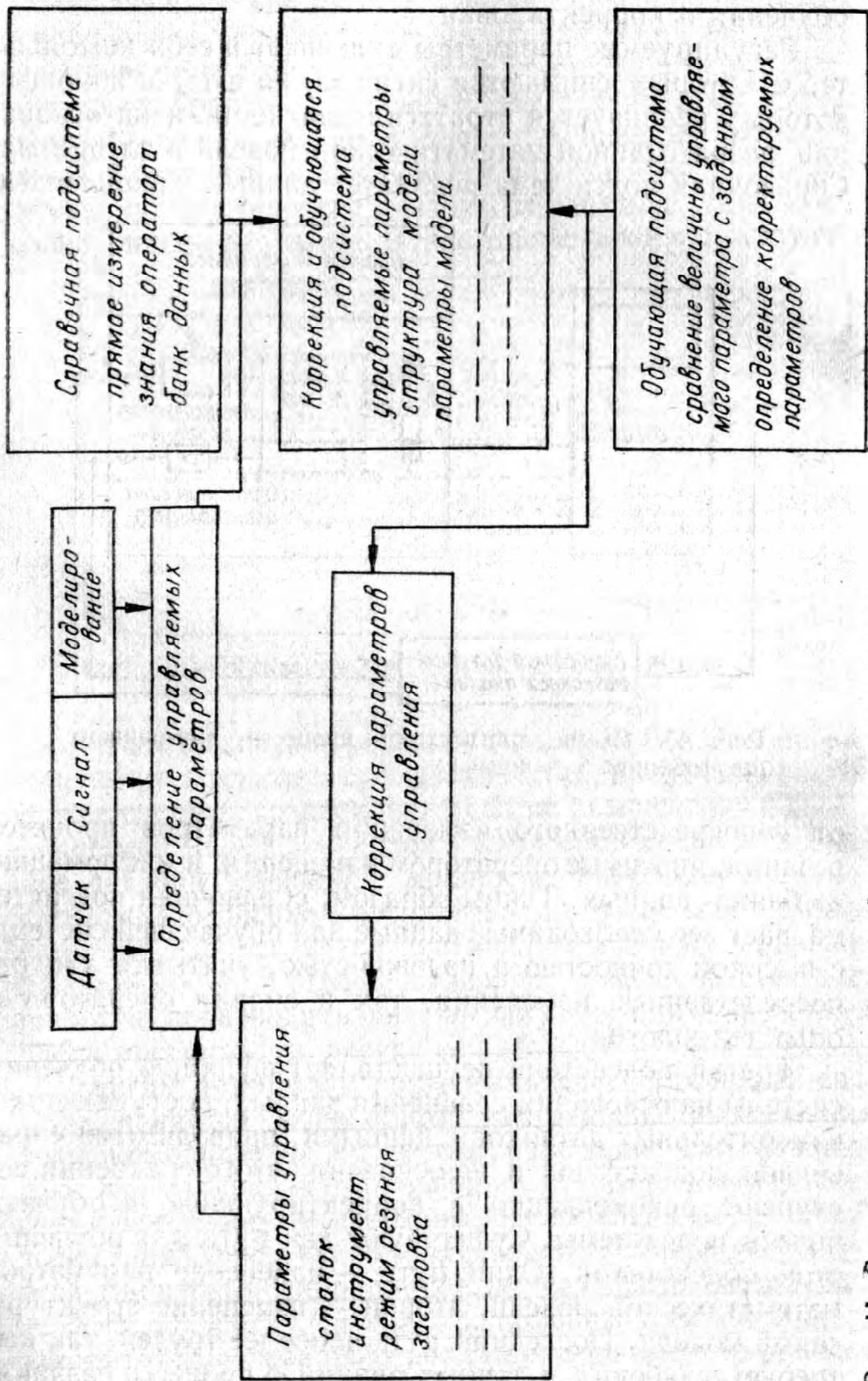


Рис. 44. Структурная схема обучающейся диагностической системы

для диагностики процесса. Другим направлением развития диагностических систем является их создание на основе заданных правил, вырабатывающих необходимые решения. Системы, созданные по такому принципу, называют интеллектуальными, так как они обладают элементами искусственного интеллекта, принимающего решения на основе поступающей в систему информации. Одной из главных задач такой системы является скорость ее реакции на возникающую внезапно информацию о поломке инструмента, станка или других происшествиях. Для того чтобы диагностическая система была высоконадежной, время для принятия решения должно составлять доли секунды, а иногда и миллисекунды. Эти системы принимают решение в той же последовательности, что и человек (в четыре этапа).

Первый — выбор всех возможных для решения альтернатив. Второй — выбор наиболее подходящего критерия для оценки имеющихся альтернативных решений. Третий — расчет или определение всех изменяющихся параметров для выбранных альтернативных решений. Четвертый — выбор полученного альтернативного решения, применяя правила принятия решения. Метод принятия решения может быть представлен в виде матрицы, в которой показана оценка всех ее элементов на основе выбранного критерия. Такая методика диагностики процесса резания идентична с проведением исследований самой системой. Причем такой подход позволяет применять как качественные, так и количественные оценки возникающей ситуации в процессе резания. Структурная схема интеллектуальной диагностической системы показана на рис. 45. Основой такой системы является матрица принятия решений, колонки которой представляют возможные критерии для оценки принятия решений, а ряды — возможные альтернативы решений. Любое решение может оцениваться всеми заданными критериями. Такая система состоит из следующих основных подсистем:

I — подсистема, основанная на выработанных правилах диагностики, определяет критерий, обеспечивающий связь между процессом резания и достижением цели, заданной на высшем иерархическом уровне системы.

II — математическая подсистема выбирает из матрицы решений возможные варианты решений с помощью полученных данных о процессе обработки.

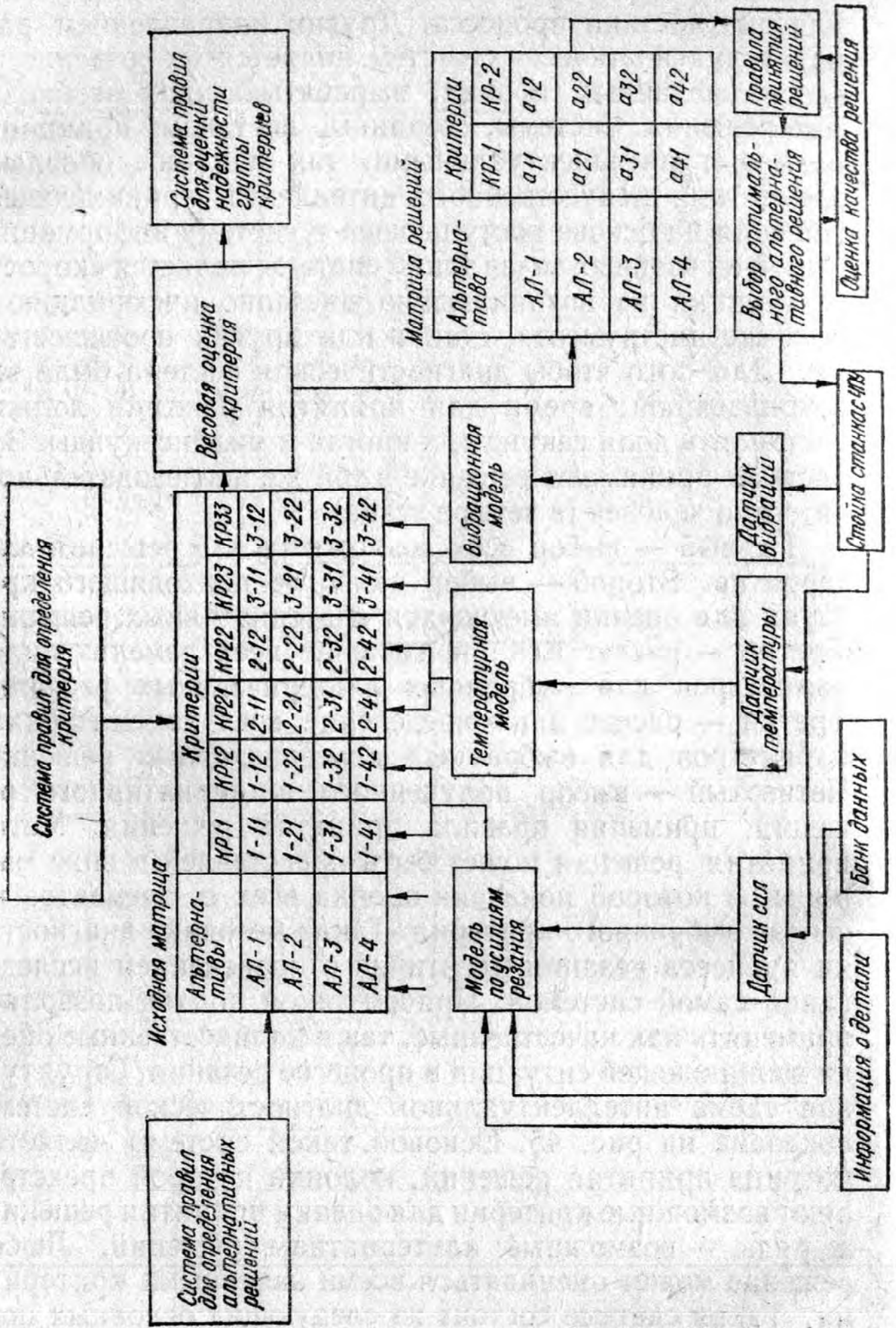


Рис. 45. Структурная схема интеллектуальной диагностической системы

III — подсистема, основанная на получении информации как непосредственно от датчиков системы, так и из банка данных и обеспечивающая матрицу решений необходимыми значениями ее параметров по различным критериям оценки.

IV — подсистема набора правил принятия решений — для выбора наилучшего варианта, она работает совместно с оценкой качества принятого решения и таким образом выбирает оптимальный вариант. Применяя такой подход, диагностика делается быстро в пределах времени, необходимого для отработки кадра на стойке станка с ЧПУ.

В целом система работает таким образом, что ее датчики передают информацию о силах резания, температуре инструмента, виброакустическом сигнале и других в три независимые математические модели системы, которые рассчитывают значения параметров, необходимых для матрицы решений. Величины этих параметров обозначают как a_{ijk} , где i — означает датчик, от которого пришла информация; j — к какому альтернативному решению она передается; k — относится к критерию оценки. В рассматриваемой системе устанавливается два критерия для матрицы решений и три для основной исходной матрицы. Исходная матрица решений имеет три математические независимые модели, решение которых требует более значительных затрат времени и поэтому они не применимы для быстрой диагностики процесса резания. Однако их решение имеет высокую точность и поэтому на их основе создается матрица принятия решения, двумя критериями которой, как правило, является себестоимость и производительность процесса обработки. На основании этих критериев производится оценка всех альтернативных решений и по выработанному правилу устанавливается необходимая подача или скорость резания. Диагностическая система, работающая по такому принципу, имеет ряд существенных преимуществ. Первое — время для принятия решения существенно сокращается благодаря созданию оптимальных значений матриц для принятия решений: исходной, выбирающей оптимальное число возможных решений и небольшой матрицы решений, быстро реагирующей на происходящие в процессе резания события. Второе — можно использовать для анализа процесса несколько независимых математических моделей, что позволяет с гораздо большей точностью и надежностью оценивать характер процесса металлообработки, чем на единственной модели, полу-

чающей информацию от одного датчика. Третье — блочное построение математических моделей и возможность их адаптации дает возможность создать интеллектуальный контроллер с большой гибкостью, производящий диагностику при широком применении режимов резания, инструмента, материала и размеров обрабатываемой детали. И, наконец, применение нескольких сенсоров позволяет получить максимум информации о процессе, а качество принимаемых решений намного выше, чем в системах с одним сенсором.

Развитие диагностических систем должно состоять в том, чтобы они сами автоматически производили необходимые исследования и поиски. Для этой цели они должны опираться как на имеющийся технологический опыт, так и накапливать результаты предыдущей диагностики. Такие системы должны прогнозировать по имеющейся ситуации возможные нарушения процесса резания с тем, чтобы к минимуму свести время на их устранение. Информация диагностических датчиков может быть как бинарной (да — нет), так и аналоговой с последующим цифровым преобразованием. Все их сигналы преобразуются и оцениваются в буфере. Новые сигналы постепенно вытесняют старую информацию, находящуюся в буфере.

Результаты производимой диагностики сравниваются с историей развития различных отказов, случившихся ранее и записанной в памяти системы, что позволяет выявить основные причины возникновения отказов. После ряда таких примеров вырабатываются определенные правила, которые и позволяют создать высокоэффективную прогнозирующую диагностическую систему.

Список литературы

1. Антипов В. И. Приборы и средства контроля на выставке КОМЕТ-87 // Станки и инструмент.— 1988.— № 6.— С. 36—38.
2. Армарего И., Дж. А. Браун Р. Х. Обработка металлов резанием.— М. : Машиностроение, 1977.— 325 с.
3. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов.— М. : Машиностроение, 1975.— 344 с.
4. Вальков В. М. Контроль в ГАП.— Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1986.— 232 с.
5. Волосов С. С. Активный контроль размеров.— М. : Машиностроение, 1984.— 222 с.
6. Диагностирование машин-автоматов и промышленных роботов. / Под ред. Е. Г. Нахапетян, Е. А. Цуканова // Сб. ст. ин-та машиноведения АН СССР.— М. : Наука, 1983.— 153 с.
7. Диагностирование оборудования комплексно-автоматизированного производства / Под ред. Е. Г. Нахапетяна.— М. : Наука, 1984.— 175 с.
8. Динамические методы испытаний и диагностирования машин-автоматов и автоматических линий / Под ред. Е. Г. Нахапетян // Сб. ст. ин-та машиноведения АН СССР.— М. : Наука, 1981.— 142 с.
9. Жарков И. Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом.— Л. : Машиностроение, 1986.— 180 с.
10. Лазарев Г. С. Автоколебания при резании металлов.— М. : Вища шк., 1971.— 243 с.
11. Лоладзе Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента.— М. : Машиностроение, 1982.— 320 с.
12. Марков Н. Н. Роль ВНИИ измерений в метрологическом обеспечении машиностроения // Измер. техника.— 1985.— № 9.— С. 40—43.
13. Нахапетян Е. Г. Диагностирование оборудования гибкого автоматизированного производства.— М. : Наука, 1985.— 225 с.
14. Невельсон М. С. Автоматическое управление точностью обработки на металлорежущих станках.— М. : Машиностроение, 1982.— 132 с.
15. Осипов С. С., Шрайбан И. С. Устройства контроля состояния режущего инструмента в процессе резания // Станки и инструмент.— 1987.— № 8.— С. 22—25.
16. Основы создания гибких автоматизированных производств / Л. А. Пономаренко, Л. В. Адамович, В. Т. Музычук, А. Е. Гридасов ; Под ред. Б. Б. Тимофеева.— К. : Техніка, 1968.— 144 с.
17. Остафьев В. А. Расчеты динамической прочности режущего инструмента.— М. : Машиностроение, 1979.— 169 с.
18. Подураев В. Н., Борзов А. А., Горелов В. А. Технологическая диагностика резания методом акустической эмиссии.— М. : Машиностроение, 1988.— 56 с.
19. Родин П. Р. Металлорежущие инструменты.— К. : Вища шк., 1974.— 400 с.

20. Сарвин А. А. Системы бесконтактных измерений геометрических параметров.— Л. : Изд-во ЛГУ, 1983.— 144 с.

21. Томсон Е., Кобаяши Ш., Янг Ч. Механизм пластической деформации в металлообработке.— М. : Машиностроение, 1972.— 485 с.

22. Физические основы процесса резания металлов // В. А. Остафьев, И. П. Стабин, В. С. Антониук и др.— К. : Вища шк., 1976.— 136 с.

23. Харизоменов И. В. Бесконтактный контроль размеров в станкостроении (фотометрические методы).— М. : Машиностроение, 1975.— 210 с.

24. Хартли Дж. ГПС в действии : Пер. с англ.— М. : Машиностроение, 1987.— 328 с.

25. Developments and Trends in Monitoring and Control of Maching Process / H. K. Toenshoff, J. P. Wulfsberg, H. I. I. Kols and st. // CIRP ANNALS, Paris, 1988.— Vol 37/2.— P. 611—622.

Оглавление

	Стр.
Предисловие	3
Глава 1. Современные направления развития диагностики процесса металлообработки	5
1. Основные методы диагностики технологических процессов	6
2. Математические модели и их основные свойства	12
3. Выбор контролируемых параметров при диагностике состояния технологического процесса	19
Глава 2. Основные параметры диагностируемого процесса металлообработки	27
1. Физические явления, сопровождающие процесс металлообработки	28
2. Определение энергетических затрат при резании металлов	33
3. Тепловые и электромагнитные явления в процессе металлообработки	42
4. Динамические параметры процесса обработки резанием	52
5. Процесс изнашивания и разрушения режущего инструмента	57
6. Анализ процесса резания как источника диагностической информации	63
Глава 3. Технические средства диагностики процесса металлообработки	68
1. Измерительные преобразователи диагностирования процесса обработки деталей	69
2. Приборы и устройства для контроля состояния режущего инструмента	90
3. Приборы и устройства для контроля геометрических размеров обрабатываемых деталей	98
4. Контрольно-измерительные приборы и устройства диагностических систем металлообработки	112
5. Контрольно-измерительные машины в системах диагностики процессов металлообработки	115
Глава 4. Алгоритмическое и программное обеспечение систем диагностики и управления процессом металлообработки	120
1. Анализ современных микропроцессорных систем ЧПУ технологическим оборудованием	120
2. Технические средства для сопряжения устройств контроля процесса резания с процессором системы ЧПУ	125
3. Интерфейсное устройство ввода дискретных и аналоговых сигналов в микро-ЭВМ	127
4. Текущая коррекция режимов обработки на основе диагностики процесса резания	130
5. Методология разработки полипараметрических динамических систем	139
	151

Научное издание

Остафьев Владимир Александрович
Антонюк Виктор Степанович
Тымчик Григорий Семенович

Диагностика процесса металлообработки

Редактор *Л. М. Друзенко*
Оформление художника *Ю. М. Ушенко*
Художественный редактор *В. С. Шапошников*
Технический редактор *Л. И. Лёвочкина*
Корректор *А. Н. Радченко*

ИБ № 4068

Сдано в набор 27.08.90. Подписано в печать 03.01.91. Формат 84×108^{1/32}
Бумага типографская № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл
печ. л. 7,98. Усл. кр.-отт. 8,3. Уч.-изд. л. 8,53. Тираж 1500 экз. Зак. 0—2910
Цена 1 р. 40 к.

Издательство «Тэхника». 252601 Киев, 1, ул. Крещатик, 5.

Отпечатано с матриц Головное предприятие РПО «Полиграфкнига» в
Нестеровской городской типографии, г. Нестеров, Львовской обл.,
ул. Горького, 8. Зак. 564.