Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
Машинобудівний факультет
Кафедра «Інтегровані технології машинобудування» ім. М.Ф. Семка

Доброскок В.Л.

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

з дисципліни «Робочі процеси сучасних технологічних систем»

Харків

Лекция 1 ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

1. Концепция компьютеризированного интегрированного производства.
2. Концепция «Тощего производства» — «Lean Production».
3. Концепция CIM второго поколения.
4. Надежность технологических процессов.
5. Организационные структуры промышленного производства.
6. Вопросы для самостоятельного контроля.

Высокие технологии в машиностроении и их рабочие процессы необходимо рассматривать на общем фоне развития машиностроения и тех тенденций, которые возможно окажутся решающими для достижений XXI века.

Современное передовое производство следует характеризовать как гибкое рыночно ориентированное. Это означает, что рынок определяет требования не только к конечному продукту, но и к его производству практически на всех этапах разработки, освоения и т.д.

На рис. 1.1 показаны изменения в промышленном производстве в глобальном масштабе. Промышленные предприятия стали больше ориентироваться на требования рынка. Количество изделий и величина партии уменьшились до индивидуального изготовления заказа потребителя. *Своевременная поставка при сокращенной длительности производственного цикла и уменьшенных фондах или запасах полуфабрикатов или готовых изделий стала критерием эффективности производства.*

Комплексность продукции и производства возросла за прошедшие годы чрезвычайно сильно. Объем продукции, находящейся в эксплуатации, возрастает одновременно с увеличением доли нововведений на производстве и с общим техническим прогрессом. Малое количество деталей и партий, большое многообразие типов и вариантов, а также специфичные для каждого потребителя исходные данные повышают требования к продукции, управлению производством, широте и глубине проектирования.

Экономика с замкнутым циклом, которая осуществляет полный контроль материалов по виду и количеству и экологически бережное отношение к ним на всем протяжении срока службы изделия, одновременно сберегает насколько возможно собственные ресурсы, применяет индустриальное производство и его технику, делает его «уживчивым» с окружающей средой, стала главной задачей инженеров, физиков, химиков и технологов на производстве, встречает все большее понимание в обществе и находит отражение в принимаемых законах.

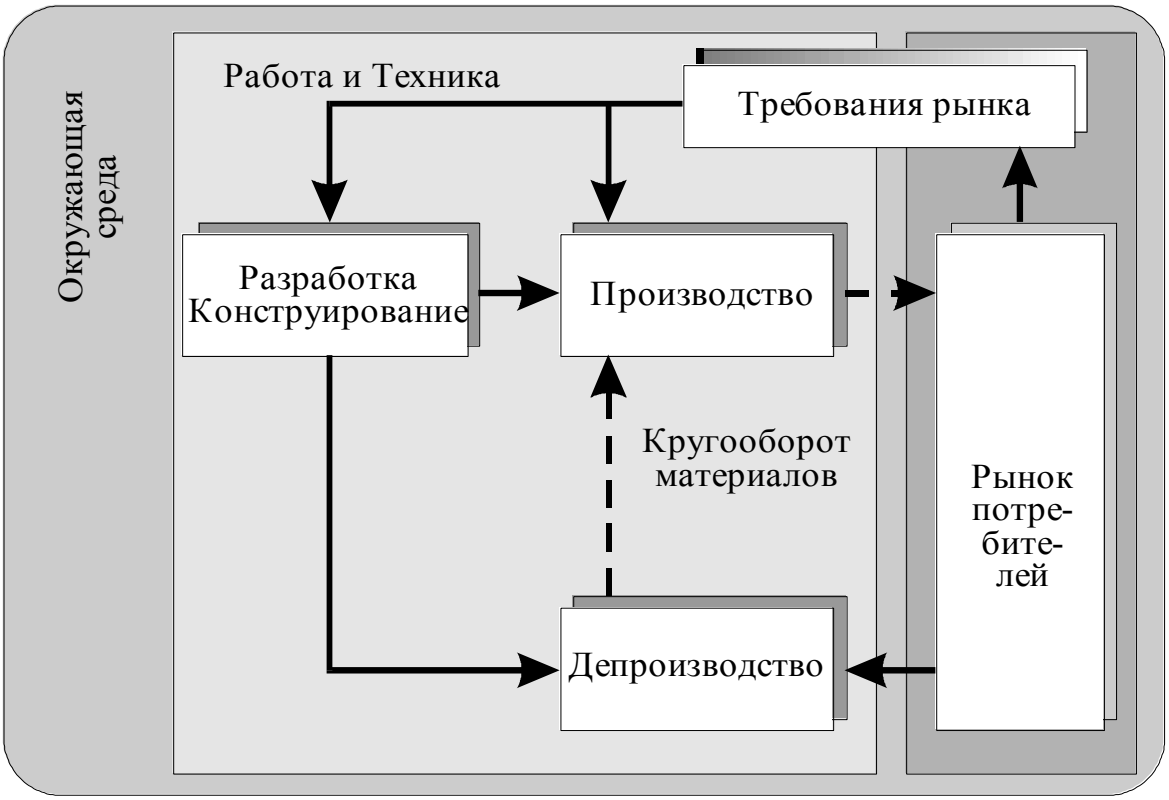


Рисунок 1.1 – К характеристике современного промышленного производства

Формируется иное понимание производства будущего: целостное рассмотрение и оптимизация потока материалов; исключение расточительных затрат ресурсов любого вида; непрерывная оптимизация производства; применение передовых технологий и ориентация на человека; минимизация расходов при эксплуатации готовой продукции.

Природоохранительные мероприятия ставят перед производителем новые задачи. Возврат старой, изношенной продукции, ее демонтаж и переработка, или, точнее, депроизводство, требует применения новой техники и методов работы. В некоторых отраслях промышленности уже созданы фабрики депроизводства, которые свою деятельность направляют на индустриальную вторичную переработку отслуживших изделий.

Производство рассматривается как система, эффективность которой зависит не только от кооперации и производительности отдельных производственных процессов, но и от отсутствия сбоев во всей системе и эффективности производственных цепочек во всей сети экономики с замкнутым циклом. Предприятия, которым полностью удается овладеть и оптимизировать такую систему во всем комплексе и сохранить окружающую среду, получают очень высокие шансы победить в условиях международной конкуренции.

На современных заводах доля затрат на заработную плату и выплат по социальному страхованию составляет сегодня около 50-70 % от общих

производственных расходов без затрат на материалы. Вследствие такого развития при изготовлении продукции стало занято меньше людей. Созидательная доля работ все больше смещается в сторону планирования и управления, т. е. все дальше отходит от непосредственного процесса изготовления. Еще в 60-е и 70-е годы соотношение основных рабочих к ИТР и управленческому аппарату составляло от 2:1 до 1:1. Однако инвестиции по модернизации производства концентрировались прежде всего на сокращении основных рабочих. В настоящее время вследствие широкого применения автоматизации - прежде всего CNC-техники - и логистики это соотношение сильно уменьшилось. *Происходит перемещение производственного персонала из области непосредственного изготовления в область планирования и управления или в сферу обслуживания средств производства*.

1.1. Концепция компьютеризированного интегрированного производства

Еще несколько лет назад придерживались того мнения, что конкурентоспособность производства в решающей мере может быть улучшена путем применения новых технологий, использования потенциала электроники.

Ориентирование на новые технологии и быстрый прогресс производственной техники привело к возникновению прогрессивной и гибкой концентрации производства, которая нашла свое выражение в концепции компьютеризированного интегрированного производства (CIM). Сокращение длительности производственного цикла, уменьшение фондов, запасов в соединении с изготовлением продукции по принципу «точно вовремя» дало производству определенные резервы. Одновременно производственные процессы и станки стали соединяться в сложные высокопроизводительные системы, в которых технологические и организационные цепочки все больше зависят друг от друга.

Электроника позволила осуществить гибкую автоматизацию путем применения CNC-техники, гибких систем изготовления и сборки. Одновременно с гибкой автоматизацией на ведущих предприятиях находят все большее применение системы обработки информации. Системы автоматизированного проектирования, автоматизированные системы технологической подготовки производства с полной интеграцией материальных, производственных и людских ресурсов являются стандартом для многих предприятий. Иное производство, без этих вспомогательных систем, было бы сегодня вообще трудно представить. Лишь в неосновных областях производства рабочие места, которые не удалось включить в централизованные системы планирования и управления, попадают в поле

действия персональных компьютеров.

Затраты на вычислительную технику сейчас настолько низки, как никогда прежде. Кроме того, использование стандартизации в производственных системах, во многих пакетах программ пользователя и на рабочих местах облегчает проведение комплексной компьютеризации при сравнительно низкой квалификации операторов, а также при постоянно растущем объеме специальных знаний.

Высокопроизводительные и гибкие производственные системы смещают свою деятельность из области непосредственного изготовления в область планирования и управления, т.е. в область накладных расходов. Автоматизация производственного снабжения и утилизации отходов требует сравнительно высоких первоначальных затрат и в конечном счете приводит к увеличению доли накладных расходов при снижении затрат на непосредственное изготовление продукции.

Инвестиции в гибкие производственные системы усиливают необходимость их максимального использования по времени и техническим возможностям. Ошибки и нарушения процесса быстрее приводят к простоям этой дорогой системы, чем при традиционном или ручном изготовлении. Согласно исследованиям многие ошибки и нарушения процесса изготовления вызваны не производственным оборудованием и не в цепочке непосредственного процесса обработки, а преимущественно в области планирования и снабжения. Таким образом, экономичность производственного оборудования может быть прямо или косвенно значительно улучшена путем повышения качества периферийных, т.е. предварительных и дополнительных работ. Решающую роль здесь играет то, удастся ли полностью оптимизировать производственные цепочки и сделать их безошибочными. Для многих предприятий это является огромной проблемой.

Для того, чтобы иметь конкурентоспособное производство, надо научиться обеспечивать работу сложных компьютеризированных производств с максимальной производительностью и качеством. Высокоразвитое прогрессивное производство с высококвалифицированным персоналом имеет дополнительные преимущества в том случае, если речь идет об освоении сложных комплексных процессов.

Таким образом, CIM может рассматриваться как глобальная ведущая концепция промышленного производства второй половины XX столетия.

Производительность, гибкость в производстве, качество продукции являются решающими слагаемыми успеха на мировом рынке. CIM значительно улучшает гибкость производства и ритмичность выпуска изделий, укорачивается длительность производственного цикла, сокращается время

конструкторской разработки.

Ее реализации способствовали:

Техника, оснащенная числовым программным управлением, которая позволила образовать гибкую производственную систему. Это прежде всего способность электронных систем управлять процессом, которая открыла возможность реализовать принцип гибкой автоматизации в индустриальном производстве.

Графическая обработка данных, которая открыла мир систем автоматизированного программирования и систем автоматизированной технологической подготовки производства и в конечном счете позволила использовать ЭВМ в разработке, конструировании и управлении.

Обработка административных данных, основанная на большом объеме информации, которая проникла в экономические расчеты производства, а затем в планирование и управление предприятиями. Была создана так называемая автоматизированная система технологической подготовки и контроля производства в области общего управления предприятием, экономного использования материалов и решения производственных заданий.

Наибольшего прогресса в освоении CIM достигли большие предприятия авиа- и автомобилестроения, электронной индустрии. В последнее время стали преуспевать многочисленные частные предприятия, которые очень далеко продвинулись в реализации CIM.

В то же время доля инвестиций в компьютеризированные системы производства довольно высока и постоянно увеличивается. Из всех технических инвестиций предпочтение отдается компьютеризированным системам производства. Производители станков и систем могут предлагать успешно на рынке свою продукцию, если она соответствует стандартам автоматизированного рабочего места.

Предприятия активно осваивают стратегию компьютеризированного производства, структура которого непрерывно совершенствуется. Переход от традиционного производства к автоматизированному происходит неудержимо и со все возрастающей скоростью.

Успехи были тем значительнее, чем настойчивее претворялись в жизнь передовые организаторские и технические концепции. В том случае, если успехи невозможно было определить в экономических масштабах одного предприятия, было общепризнанно, что *только CIM в состоянии активизировать обширный потенциал рационализации во всех областях производства.*

Высокая стоимость рабочей силы и непродолжительный рабочий день, а также постоянный контроль исполнения производственных заданий ускоряет

процесс применения автоматизированного производства. Однако полная автоматизация и компьютеризация производства является еще только теорией.

Несмотря на огромные достижения в области создания CIM, не все проблемы оказались решенными. Многие ожидали значительной прибыли от внедрения CIM, однако реальные затраты стирали грани получаемого эффекта. Фактические затраты и длительность реализации оказывались на практике совершенно не такими, как это предусматривалось. Только очень небольшое число проектов удалось реализовать в намеченные сроки и при запланированных объемах расходов. *Процесс внедрения такого производства протекает не настолько успешно, чтобы сегодня говорить о нем как о всеохватывающей реализации концепции.*

1.2. Концепция «Тощего производства» - «Lean Production»

«Lean Production» — *японская концепция автоматизированного компьютеризированного производства.* Девиз новой концепции имеет название «Lean Production», или в переводе «тощее, худое производство». Это понятие введено американскими авторами исследования, которые выявили *отставание европейской индустрии не вследствие высокой стоимости рабочей силы, короткой продолжительности рабочего времени и прочих определяющих условий, а из-за существенного отставания в технологическом времени изготовления, качестве изготовления и сборки*. Отставание имеется по продолжительности времени, затрат на разработку новой продукции. В случае «Lean Production» необходима только половина времени и затрат для создания новой продукции и требуется только половина людских и материальных ресурсов для того, чтобы ее изготовить. При этом задействуется половина арсенала средств производства и наполовину снижается количество дефектов. Эти показатели были определены при сравнении предприятий традиционного массового производства и «Lean Production».

В проведенных исследованиях сравниваются многочисленные показатели различных заводов Японии, США и Европы.

В среднем на японских предприятиях изготавливают легковые автомобили за половину времени, при этом допускается существенно меньше брака, чем на предприятиях США и Европы.

Отличительным признаком «Lean Production» является то, что в основе высокой производительности лежит согласованность и интеграция всех участвующих в процессе производства элементов. Последовательно оптимизируется ход процесса разработки, изготовления и связи с поставщиками. Короткое время разработки достигается благодаря сильному руководству проектом и согласованным коллективным действием

исполнителей.

«Одновременное проектирование» позволяет выполнять коллективную разработку. К разработке привлекаются поставщики и заказчики. Открытые и быстродействующие информационные коммуникации являются основополагающим рабочим принципом. Необходимо осознать, что *при этом происходит отказ от принципов разделения труда.*

Степень автоматизации при изготовлении продукции в «Lean Production» также достаточно высока, однако автоматизируются прежде всего простые процессы. Вследствие упрощения автоматизация становится безопасной и надежной.

Общая организация и технология этого производства становится мало-конфликтной и чрезвычайно чуткой ко всяким нарушениям. Так как одновременно с этим процессы переналадки по возможности сокращаются, автоматизируются или, по меньшей мере, выполняются параллельно, предприятие, работающее по концепции «Lean Production», приобретает высокую гибкость.

Изложенные принципы и реакция производства на отклонения от нормы предполагают децентрализацию ответственности, согласованные коллективные действия и персональную мотивацию. Именно в этом - решающее отличие от традиционной структуры производства. «Lean Production» более сильно ориентировано на работника, чем традиционное производство, где главная задача — получение максимальной производительности.

«Lean Production» с самого начала приобщает поставщиков к отработке всего производственного процесса. Японские предприятия имеют в среднем небольшое количество поставщиков. Поставщики также приобщаются к ответственности за расходы. Многочисленные, заранее оговоренные, условия поставки и тесная связь с поставщиками надежно оберегают службы снабжения основного предприятия от всяких неожиданностей.

Анализ принципов показывает, что интеграция производства и устранение непроизводительных потерь стоят на первом месте. Здесь системная технология уже сместила классическое разделение труда. Системы автоматического регулирования и высокая надежность способствуют значительному повышению производительности. Эти положения являются предпосылками для высокой эффективности автоматизированного производства.

Совокупность принципов «Lean Production» позволяет производить постоянное улучшение процесса производства в виде непрерывного (монотонного) или ускоренного (скачкообразного) снижения расходов путем сокращения расточительных (непроизводительных) затрат.

Ускоренный процесс освобождает краткосрочные резервы рационализации производства. С помощью этих процессов систематически изучается структура статей «чистой себестоимости». Все, что непосредственно не способствует изготовлению продукции, считается расточительными (непроизводительными) расходами и устраняется за исключением самой необходимой деятельности косвенных сотрудников. В этих процессах непосредственно отражаются и реализуются результаты усилий всей команды. В качестве критериев оценки используются длительность производительного цикла, сроки и затраты на изготовление, объем фондов и качество продукции.

Непрерывное совершенствование процесса производства в качестве основной стратегии улучшения эффективности выполнения заказов многие предприятия производят ступенчато. Они начинают с сегментирования (разделения) фирмы на самостоятельные рыночно ориентированные системы сбыта и изготовления. Следующим шагом является оптимизация отдельных производственных процессов. При этом должны использоваться методы и технологии будущей концепции производства. Повышение оперативной эффективности производства с помощью краткосрочно реализуемых мероприятий в отдельных проектах является третьим шагом.

В небольшой команде из сотрудников и плановиков под руководством одного руководителя согласно единому, четкому плану принимаются и анализируются производительные и непроизводительные действия. Команда старается найти мероприятия, способствующие скорейшему улучшению производства, и, по возможности, тотчас же претворить их в жизнь.

Сокращение сроков работ, простое протекание рабочих процессов, улучшение загрузки оборудования и оптимальная наладка станков стоят на переднем плане мероприятий оптимизации процесса производства в каждой области работ. Мероприятия, которые на пятый день еще не выполнены, требуют служебной объяснительной записки членов команды или руководства.

1.3. Концепция CIM второго поколения

Концепция CIM второго поколения базируется на сочетании достоинств концепции «тощего производства» и концепции CIM первого поколения, поскольку обе преследуют одни и те же цели, следуют одним и тем же принципам. Интеграция принципов этих концепций может привести к другим концепциям, способным обеспечить повышение эффективности производства на путях его приращения и децентрализации, *учета ведущей роли человеческого фактора, который не может быть заменен никаким уровнем развития ЭВМ.*

Эта концепция, конечно же, связана с надежностью технологических процессов, технологическими процессами на пределах возможного,

управлением комплексным протеканием процесса, способными к обучению эволюционными системами производства, использованием новых архитектур вычислительных средств. Системы пользования должны следовать децентрализованной структуре организации производства. Централизованная система выявляет более высокий процент помех и ошибок, чем децентрализованная, которую проще поменять, заменить, модифицировать. Высокоскоростные сети и распределенные базы данных делают возможным индивидуальное построение компьютерного обслуживания. Введение нейронных сетей и эволюционных алгоритмов позволяют наилучшим способом управлять процессами.

1.4. Надежность технологических процессов

Современное промышленное производство характеризуется тем, что большинство технологических процессов реализуется в области, граничащей с предельными возможностями.

Высокая производительность и качество, интенсивное использование оборудования - это те характеристики, которые принципиально исключают друг друга. Чем шире мы раздвигаем границы производительности и качества в технологическом процессе, тем ненадежнее он становится. С другой стороны, процессы в области высоких скоростей удается эксплуатировать и одновременно добиваться высокой экономии времени обработки и затрат. Классическое противоречие может быть решено путем управления технологическим процессом, технологической системой.

Технология обработки на высоких скоростях, интенсивно используемая при резании легких конструкционных материалов, как, например, алюминия, применима и для шлифования. На внутришлифовальном станке достигнута скорость резания 200 м/с инструментом из кубического нитрида бора. Станок, оборудованный шпинделем с магнитными подшипниками, работал в области 30000 - 60000 об/мин. В настоящее время могут быть приобретены шпиндели с числом вращения более 40000 об/мин, удовлетворяющие специальным требованиям данной обработки.

Высокая скорость резания и подача снижают машинное время. Подготовка инструментов, настройка станка и параметров процесса удлиняются, что влечет за собой увеличение подготовительно-заключительного времени. Вспомогательное время из-за улучшения динамики станка снижается. Амортизационные отчисления на механическое оборудование возрастают, стойкость инструментов снижается из-за значительных сил, вследствие чего расходы нужно анализировать в каждом отдельном случае.

Технологическую систему трудно использовать в оптимальных условиях.

С этой задачей человек не справляется. Выход из трудного положения предлагают современные измерительные и сенсорные системы, которые будут измерять и отслеживать качество процесса обработки.

1.5. Организационные структуры промышленного производства

Промышленное производство, динамично изменяющееся, требует столь же динамического изменения организационных структур. С учетом того, что производственные и технологические циклы сокращаются, техника производства и все процессы становятся комплексными, природные ресурсы сокращаются, возрастает роль ориентации на экологические факторы, возникает необходимость ухода от централизованных организационных структур на более строгой лестнице и линейной модели мышления поиска более динамичных, гибко приспосабливающихся современных структур.

Организация структуры в связи с неопределенностью технологий и рынка. *Первые формы создания приспосабливающихся организационных структур заимствованы от природы — фрактальные, стохастические, нечеткие, бионические*. В зависимости от степени комплексности производства, степени неопределенности технологии и рынка предпочтительной может оказаться одна из таких организационных форм, как иерархическая, модульная, кооперационная, виртуальная.

Иерархическая структура представляет доминирующий сегодня уровень организации.

Модульная организационная структура будет предпочтительной тогда, когда в условиях неопределенности рынка и технологии необходимо обеспечить комплексность изделия. Это означает переход к небольшим, хорошо управляемым участкам, автономным группам для гибкой организации труда. Принцип модулирования реализуется путем создания постоянных, долгосрочных организационных участков развития *ключевых и высоких технологий.*

Стратегические сети (кооперация) выгодны тогда, когда изделие имеет низкую комплексность. Связь между покупателем и поставщиком, а также кооперация конкурирующих предприятий являются примером для таких вертикальных и горизонтальных коопераций, которые приводят к совмещению технологических ресурсов.

Виртуальные союзы предпринимателей являются искусственными структурами, которые на основании богатой информации и учета максимальной выгоды потребителей реализуют интеграцию независимых предприятий в различных областях. Это открытые динамические структуры, обладающие максимальной гибкостью, хорошей приспосабливаемостью,

экстремальной ориентацией на потребителя при малых собственных затратах.

В этих организационных формах упрощается производственная иерархия, разделяется ответственность и компетентность, поощряются коллективная работа, повышение квалификации, нормой считается мобильность. Творчество, обновление, готовность к новой работе являются самым большим капиталом предприятия.

Сегментация. *Сегменты - это самостоятельные участки предприятия, которых должно быть столько, сколько требует технология или рынок, и оформляются в масштабах логистики или технологии*.

Сегментация производства означает разделение на технологические и ориентированные на продукцию аспекты. В одном производственном сегменте все функции интегрированы для того, чтобы определенное производство протекало по возможно кратчайшему пути и с высокой гибкостью.

Принцип сегментации и построения отдельных участков (звеньев) сравнительно прост. Отдельные звенья процесса отвечают за комплексное изготовление отдельной части или какой-либо сборочной единицы. Все звенья собраны в группы. Они несут ответственность за изготовление согласно критериям количества, времени, сроков и качества. Комплексная обработка уменьшает затраты на управление и логистику. Все звенья объединены в логистическую систему снабжения и устранения отходов материалов производственных ресурсов. Сведения о ресурсах, а также о качестве и сроках ремонта введены в состав сегмента. Сведения о хранении входных и выходных ресурсов являются постоянной составной частью сегмента, который отвечает за постоянную и своевременную поставку частей или сборочных единиц.

Для того, чтобы сократить время реакции, все планирующие и управляющие функции включаются в состав звена и сегмента. Сегменты имеют внутреннюю структуру, которую можно сравнить со структурой участка поставки промежуточной продукции. Эта структура делает возможным упрощение центральной системы планирования и управления в пользу децентрализации управления цехом.

Производственный сегмент - это самостоятельное организационное единство с закрытой системой автоматического регулирования для надежности поставок. Они ответственны за поставки в определенном объеме к определенному сроку и определенного качества.

Фрактальная (закрытая) структура. *Фрактал - это самостоятельно действующее производство, цели и мощности которого могут быть однозначно описаны*. Размещение самостоятельных фракталов в стоящей выше системе происходит благодаря ориентированию по цели коммуникации и информации. Отдельные фракталы квазисамостоятельные и квазидействующие

как отдельные организации, соединенные в сеть. Для координации активности фракталом определяются цели через «нервный центр», которые далее самостоятельно могут быть преобразованы и изменены. Отдельные фракталы могут распоряжаться отдельными ресурсами для самостоятельного их функционирования. Здесь начинаются решающие изменения в отношении проводимой центральной организации: компетентность планирования и создания персонала и инвестиций, самостоятельность в организации фабрики, самостоятельность в планировании сроков и мощностей, точно так же, как и в оперативном контроле. Фрактал может быть самостоятельным производством. Внутри такой фабрики может создаваться множество фракталов вплоть до единичного рабочего процесса. Эти взгляды открывают новые возможности для организации фабрики. Они разрушают старые структуры и заменяют их определением (концепцией), создающим децентрализованные решающие участки. Фрактальная фабрика может предоставлять и определенные сведения для обучающихся структур. В самостоятельно организующихся фракталах могут быть думающие системы, способные к обучению.

1.6. Вопросы для самостоятельного контроля

1. Дайте общую характеристику современного машиностроения.
2. В чем суть концепции CIM?
3. Дайте характеристику концепции "тощего производства".
4. Каковы черты концепции CIM-II?
5. Оцените роль надежности технологических процессов.
6. Дайте характеристику организационным структурам современного производства.
7. Дайте характеристику сегментированного производства.
8. Как Вы понимаете парадигмы производства будущего?
9. Оцените роль перспективных технологий в производстве будущего.
10. Оцените роль технического интеллекта в производстве будущего.

Лекция 2 ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИХ РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ

1. Высокие технологии в машиностроении.
2. Рабочие процессы ВТ.
3. Примерный порядок разработки рабочих процессов ВТ.
4. Вопросы для самостоятельного контроля.

2.1. Высокие технологии в машиностроении

Каждое изделие машиностроения, поставляемое в условиях жесткой конкуренции на внутренний и в особенности на внешний рынок, должно обладать новым уровнем свойств и отвечать все возрастающим требованиям, предъявляемым потенциальным потребителем к функциональным, экологическим и эстетическим свойствам.

Эти тенденции повышения требований потребителей к качеству изделий нашли свое отражение в международных стандартах серии ISO-9000. Получение такого уровня изделий все больше связывают с нетрадиционными конструкторскими и технологическими решениями, реализация которых не всегда возможна на основе использования технологии, оборудования, оснастки общего назначения и т. д., т. е. на основе всего того, что составляет суть традиционных технологий.

В связи с этим все большее внимание специалистов привлекают нетрадиционные технологии, созданию которых предшествует накопление обширных данных фундаментальных и прикладных наук. В отличие от традиционных, чаще аналоговых, такие технологии называют «наукоемкими», «прецизионными», «ультрапрецизионными», «нанотехнологиями» и др. Эти названия новых технологий связаны с тем или иным признаком технологического процесса или свойствами изделия, который принят авторами в качестве определяющего, при этом во внимание чаще всего берется предельная точность, обеспечиваемая данным рабочим процессом. Термин «нанотехнология» используется для определения систем оборудования и технологий интегрированного производства, которые обеспечивают обработки с точностью порядка 1 нм. В более широком плане «нанотехнология занимается системами, новые функции и свойства которых зависят только от наноэффектов их компонентов», как звучит академическое определение понятия, которое дает союз немецких инженеров. Известно, например, что в мир микроизделий могут вести два пути: можно из массивной заготовки, например, из кремния шлифованием получать необходимое точное миниатюрное изделие. По этому принципу функционирует системная техника, которая в основном занимается

структурами размеров от мм до мкм. Другой возможный путь: берутся отдельные атомы, молекулы или частички из них, которые как кирпичики создают желаемую структуру. Этот принцип применяется в нанотехнологии, которая занимается структурами размером до нанометров (млн. доля мм). Таким образом, термины, применяемые к новым технологиям, не являются исчерпывающими, т. к. не отражают всей многосложности и емкости новых технологий, всего спектра и нового уровня функциональных и других свойств макро- и микроизделий.

Представляется, что независимо от используемой терминологии, все эти технологии объективно представляют собой составляющие единого, самостоятельного направления в рамках общей технологии машино- и приборостроения, суть которого более полно отражается в понятии высокие технологии.

Высокими следует считать такие технологии, которые, обладая совокупностью основных признаков — наукоемкость, системность, физическое и математическое моделирование с целью структурно-параметрической оптимизации, высокоэффективный рабочий процесс размерной обработки, компьютерная технологическая среда и автоматизация всех этапов разработки и реализации, устойчивость и надежность, экологическая чистота, — при соответствующем техническом и кадровом обеспечении (прецизионное оборудование, оснастка и инструмент, определенный характер рабочей технологической среды, система диагностики, компьютерная сеть управления и специализированная подготовка персонала), гарантируют получение изделий, обладающих новым уровнем функциональных, эстетических и экологических свойств.

Именно новый уровень функциональных, эстетических и экологических свойств изделий при соблюдении экономической целесообразности интересует потребителя. Именно этим гарантируется конкурентоспособность новой продукции.

Достижению такого уровня свойств подчинены все структурные составляющие высоких технологий (рис.2.1).

Наиболее общим и всеми воспринимаемым признаком высоких технологий является наукоемкость, отражающая то обстоятельство, что они базируются на новейших результатах фундаментальных и специальных прикладных исследований.

Системность предполагает диалектическую взаимосвязь, взаимодействие всех элементов технологической системы, всех основных процессов, явлений и составляющих. Системность особо важна как требование прецизионности и соответствие этим требованиям всех структурных элементов технологической

системы обработки и сборки (оборудование, инструмент, обрабатываемый материал, оснастка, измерения, диагностика, работа исполнительных органов).

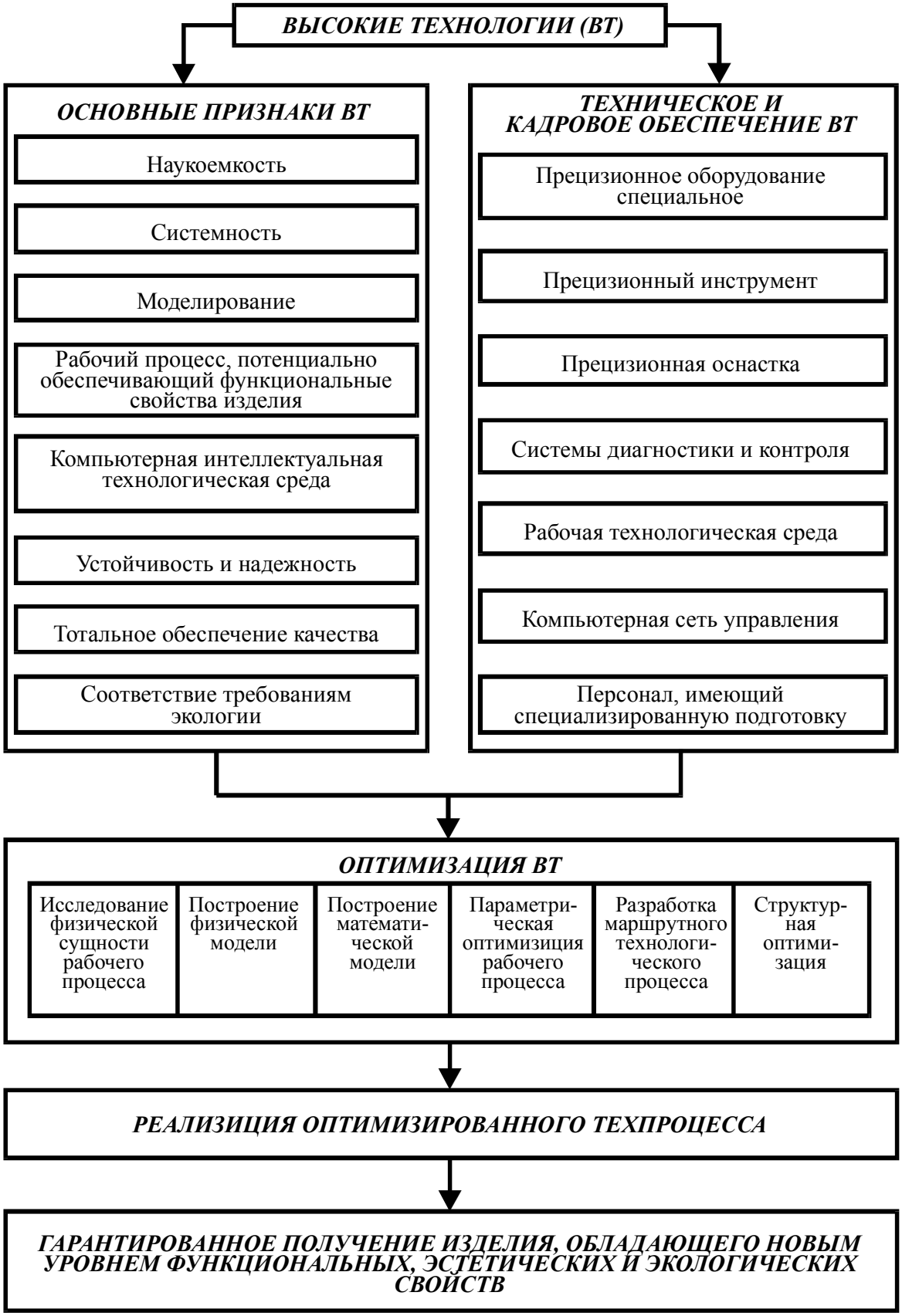


Рисунок 2.1 – Структура высоких технологий

Важнейшим признаком ВТ, безусловно, является рабочий процесс. Он доминирует во всей технологической системе и должен отвечать самым разнообразным требованиям, но, главное, быть потенциально способным обеспечить достижение нового уровня функциональных свойств изделия. Здесь богатыми возможностями обладают те устойчивые и надежные рабочие процессы, в которых эффективно используются физические , химические, электрохимические и другие явления в сочетании со специальными свойствами инструмента, технологической среды, например, криогенное резание, диффузионное формообразование изделий из алмазов и т. п.

Системный подход предполагает использование не отдельных математических моделей, а системы взаимосвязанных моделей с непременной параметрической и структурной оптимизацией. Например, параметрическая оптимизация преследует цель минимизации ряда характеристик процесса размерной обработки, прежде всего энергетических затрат, минимизации толщины срезов, силы резания и уровня температуры, интенсивности окислительных и диффузионных процессов и т. д.

Для высокой технологии нужна высокая степень («глубина») оптимальности для сравнительно узкого конкретного диапазона условий и требований. Базой такой оптимальности могут быть только глубокие специальные исследования в этой области, разработка автоматизированных систем научного обеспечения, включая использование мирового опыта, специальных методов оптимизации, методов достижения прецизионности, технологического обеспечения функциональных свойств и др.

Особое место занимает специально подготовленный персонал. Во взаимосвязанной системе человек – техника – организация человеческий фактор выдвигается на главенствующую роль и прежде всего в плане профессиональной подготовки, коммуникабельности, восприимчивости к новому, способности переучиваться.

Изложенное представление о высоких технологиях позволяет выделить их в качестве самостоятельного раздела технологии машиностроения. Область высоких технологий в этом плане безусловно обладает своей спецификой и многие общие принципы технологии машиностроения становятся крайне не достаточными, а потому затруднительно их использование. Например, принципиальным отличием высоких технологий от аналоговых технологий является их ориентированная на объект индивидуализация, целевой характер, более жесткая связь с требованиями, вытекающими из заданного уровня функциональных, эстетических и экологических свойств изделий.

2.2. Рабочие процессы ВТ

Не принижая важности других признаков ВТ и констатируя необходимость наличия всей их совокупности, необходимо выделить особую роль и значимость рабочих процессов, т.к. ожидаемый результат высоких технологий не может быть получен, если рабочий процесс потенциально не обеспечивает достижения необходимого уровня свойств изделия. Таким образом, рабочий процесс является базой создания высоких технологий.

Целевые рабочие процессы изготовления и сборки. Все существующие целевые рабочие процессы технологии машиностроительного производства можно разделить на восемь видов: деление- дозирование материала; соединение; формообразование; изменение механо- физико-химических свойств материала изделий; размерная обработка; сборка; контроль, диагностика, испытание.

Эти широко известные и повсеместно применяемые рабочие процессы, которые обычно используются в единой системе технологической подготовки производства, в большой степени отвечают традиционным требованиям и точностным характеристикам, параметрам качества поверхностного слоя и т. д., а, значит, и соответствующему уровню функциональных свойств.

Применительно к высоким технологиям требования к рабочим процессам, их роль и значимость не идентичны тем, которые приняты в традиционных (конвенциональных) технологиях.

Принципиальным отличительным признаком рабочих процессов ВТ является их индивидуализация, более жесткая связь с требованиями, вытекающими из заданного уровня функциональных, экологических эстетических свойств изделий.

При рассмотрении рабочих процессов следует отметить, что обработка резанием является превалирующей: в общей структуре оборудования около 98% занимают металлорежущие станки (78% для лезвийной и 20% для абразивной) и только 2% оборудования для электрохимической и электрофизической (ЭХО и ЭФО) и комбинированной обработки.

Различные процессы обработки резанием за счет их комбинирования и изменения режимов обладают широкими возможностями в обеспечении точности, повышении надежности и долговечности деталей машин.

В настоящее время в решении этой проблемы сформировались два направления рабочих процессов, ориентированных на:

1. Технологическое обеспечение параметров поверхностного слоя деталей машин, определяющих их функциональные свойства.

2. Непосредственное обеспечение функциональных свойств деталей машин.

Второе направление является перспективным, так как рассмотрение эксплуатации детали как последней операции технологической подготовки позволяет в значительной мере снизить себестоимость изготовления, обеспечивая надежность и долговечность.

Среди принципиально новых следует выделить вибрационное и ударно-импульсное резание, резание с опережающим пластическим деформированием, резание в оригинальных технологических средах, в т.ч. в среде охлажденных ионизированных газов, а также СОЖ под высоким давлением, «сухое» резание и резание с минимальной смазкой.

Новый уровень финишной обработки может быть достигнут на основе развития нового направления в размерной обработке – триботехнологии. За счет комбинированного воздействия алмазно-абразивного, деформирующего и антифрикционного инструмента обеспечивается управление как геометрическими, так и физико-химическими параметрами поверхности. При этом достигается повышение ресурса, например, пар трения в 3 – 10 раз.

Достижения размерной обработки связаны с применением таких рабочих процессов, как плазменно-механическая; гидролучевая, обеспечивающая высокую производительность особенно при обработке композиционных материалов и пластмасс (отсутствие температурного влияния, экологическая чистота и пожаробезопасность при резке пластмасс и композитов); комбинированные методы шлифования на основе использования традиционных, электроэрозионных и электрохимических, эрозионно-химических методов обработки, совмещение ультразвуковой и электроэрозионной обработки.

Лазерная обработка может превалировать над электронно-лучевой, а также возможно появление новых физико-химических методов обработки, использующих новые теплофизические явления, которые позволят обрабатывать композиционные материалы, керамику и др.

Классификация рабочих процессов по степени достигаемой точности и функциональных свойств. Различные рабочие процессы потенциально обеспечивают не одинаковый уровень свойств изделий. Применительно к промышленной продукции – деталям, узлам, приборам, оборудованию – значительная часть требований к качеству удовлетворяется путем непрерывного повышения точности изготовления.

В зависимости от предельно достижимой точности все рабочие процессы можно разделить на обычные, точные (прецизионные) и чрезвычайно точные (ультрапрецизионные) (рис. 2.2).

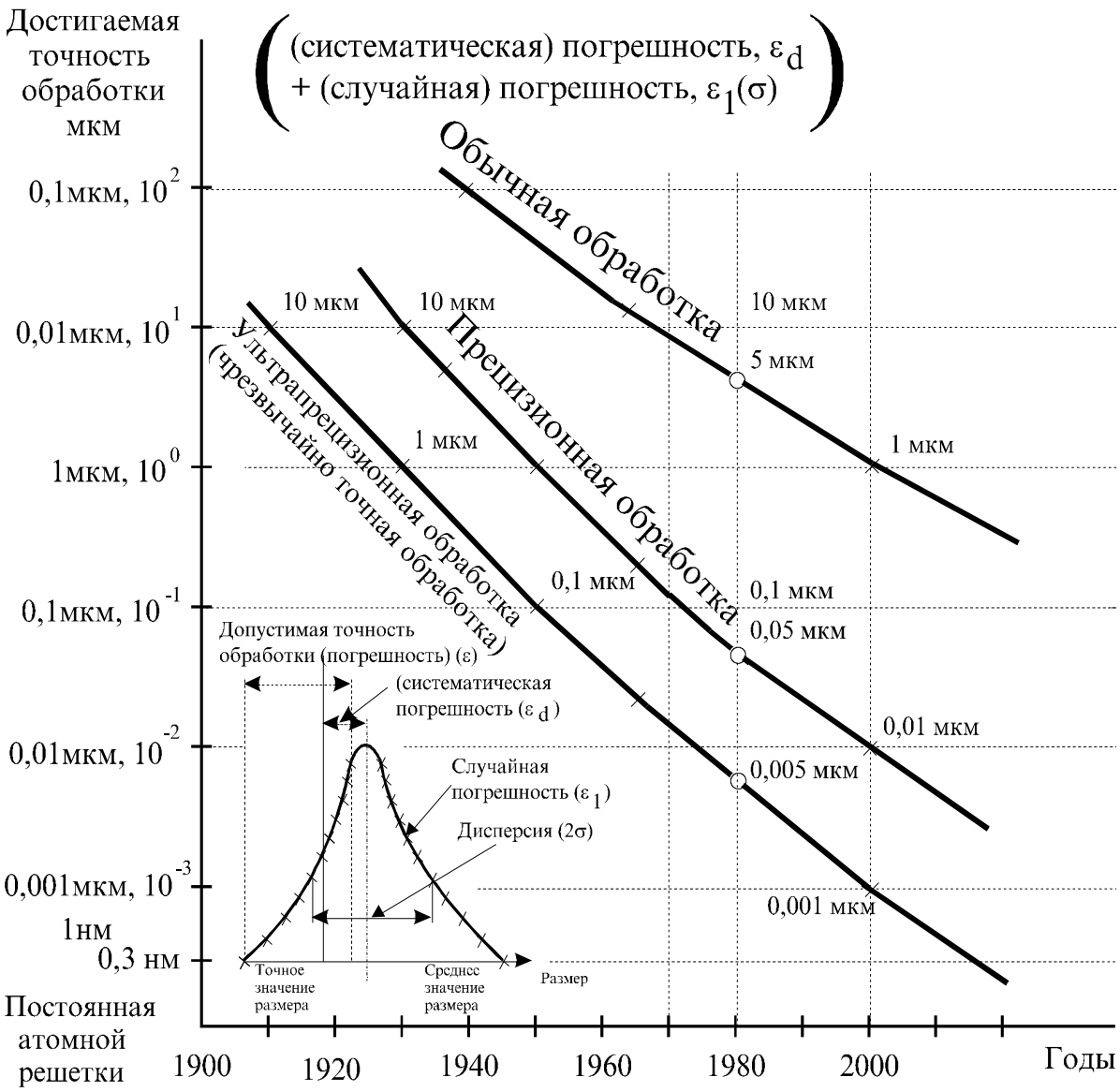


Рисунок 2.2 – Изменение достижимой точности обработки

Представленная схема иллюстрирует смещение в интервале1920 – 1980 гг предельно достижимых уровней точности для этих процессов:

- для обычных процессов – от 100 мкм до 5 мкм;
- для точных – от 10 мкм до 0,05 мкм;
- для чрезвычайно точных – от 1 мкм до 0,05 мкм.

Каждое десятилетие происходило повышение точности на один класс по ISO и шероховатости до 0,001 мкм. Таким образом, новое тысячелетие технология размерной обработки отмечает переходом от микрометрического к нанометрическому диапазону точности.

В соответствии с этим изменялись и совершенствовались и способы обработки материалов, при этом доминирующими оказались стремления технологическими методами управлять состоянием поверхности и материала поверхностного слоя. Сегодня можно утверждать, что технологи конструируют

поверхность изделия, формируя необходимые ее функциональные свойства.

При этом изменялись и сами принципы образования поверхностей изделий – от разделения объемов заготовки (деталь – стружка) до формообразования наращиванием, прибавлением (Rapid Prototyping, имплантация, покрытия)

Возможности рабочих процессов, на которых базируются нанотехнологии, приближаются к предельным, критическим, т. к. теоретическим ограничением точности при обработке материалов разделением кристаллической решетки являются размеры молекулы или атома вещества (0,2 –0,4 нм).

Таким образом, рабочие процессы ВТ необходимо рассматривать прежде всего с позиций обеспечения принципиально нового уровня функциональных свойств изделий, а их технологические характеристики – как средство их достижения.

2.3. Примерный порядок разработки рабочих процессов ВТ

Подчеркивая системность как один из основных признаков высоких технологий, необходимо рабочие процессы выделить как определяющий элемент всего технологического процесса в случае обработки материала резанием. Для того, чтобы технологический процесс обеспечивал необходимое качество, производительность, себестоимость и прибыль, технологическая система и рабочий процесс должны обладать характеристиками, соответствующими уровню требований по целому комплексу критериев.

Для технологической системы (станок, приспособление, инструмент, технологическая среда, измерительно-диагностическая система) к таким характеристикам можно отнести динамические, точностные, энергетические экономические, надежности.

Для рабочего процесса его характеристики должны отвечать таким критериям, как силовой, температурный, вибрационный, интенсивности физико-химического взаимодействия, устойчивости, экологический, экономический.

2.4. Вопросы для самостоятельного контроля

1. Охарактеризуйте роль и значение нетрадиционных технологий.
2. Раскройте смысл понятия «высокие технологии».
3. Назовите основные признаки высоких технологий.
4. Что Вы понимаете под техническим и кадровым обеспечением ВТ?
5. Каковы истоки высоких технологий?
6. Каковы требования к специалистам, занимающимся ВТ?

7. Дайте характеристику целевым рабочим процессам.
8. Приведите классификацию рабочих процессов по степени достигаемой точности.
9. Сгруппируйте виды обработки по степени достигаемой точности.
10. Дайте характеристику средств обеспечения рабочих процессов ВТ.
11. Дайте характеристику средств контроля поверхности и поверхностного слоя, применяемых в различных диапазонах точности обработки.
12. Оцените место рабочего процесса в высоких технологиях.
13. Каким критериям должен отвечать рабочий процесс ВТ?
14. Каков примерный порядок разработки рабочих процессов ВТ?

Лекция 3 РЕЗАНИЕ АЛМАЗНЫМИ ЛЕЗВИЙНЫМИ ИНСТРУМЕНТАМИ

1. Характеристика алмазного лезвийного инструмента.
2. Особенности контактных процессов.
3. Стружкообразование.
4. Силы резания.
5. Тепловые явления.
6. Износ и стойкость алмазных резцов.
7. Качество поверхности.
8. О выборе критерия износа алмазных резцов.
9. Перспективы развития и применения.
10. Вопросы для самостоятельного контроля.

Одним из важных направлений современной материалообработки является резание инструментами из природных алмазов и синтетических - классических сверхтвердых материалов. Процессы лезвийной обработки этими инструментами позволяют получить принципиально новые результаты в сравнении с традиционными.

Характерными для них являются высокая размерная стойкость режущего инструмента, в десятки, а иногда в сотни раз превышающая стойкость традиционного инструмента обычной твердости, гарантирующая повышенную точность при изготовлении деталей машин; высокая скорость резания и, следовательно, повышенная производительность обработки; высокое качество обработанной поверхности, количественные характеристики которой недостижимы другими методами обработки.

3.1. Характеристика алмазного лезвийного инструмента

В настоящее время в высоких технологиях обработки материалов применяется широкая гамма алмазных инструментов. Если монокристаллы природного алмаза в резании известны давно, то синтетические моно- и поликристаллы алмаза завоевали широкие области применения в 70-е - 80-е годы. Эти области не охватывают значительную часть обрабатываемых материалов на основе железа (примерно 80 % от применяемого количества материалов), но алмазным инструментам нет конкурентов в обработке материалов на не железной основе, таких как стеклопластики, высоколегированные алюминиевые сплавы (особенно с кремнием), композиционные материалы и волокна, композиционные древоматериалы, цветные металлы, керамика, стекло и др.

С учетом устоявшихся терминов и обозначений алмазные инструментальные материалы подразделяют на такие группы:

- PKD - поликристаллический алмаз, синтезированный при высоких давлениях и температуре;
- CVD или OPCVD - алмаз или поликристаллический алмаз, полученный химическим осаждением из газовой фазы при низком давлении (покрытие или пластины).

По аналогии с алмазами для сверхтвердых нитридов бора:

- CBN - кубический нитрид бора;
- PKB - поликристаллический кубический нитрид бора;
- CVD CBN - кубический нитрид бора, осажденных из газовой фазы.

На рис. 3.1 представлена относительная характеристика различных инструментальных материалов по твердости и прочности.

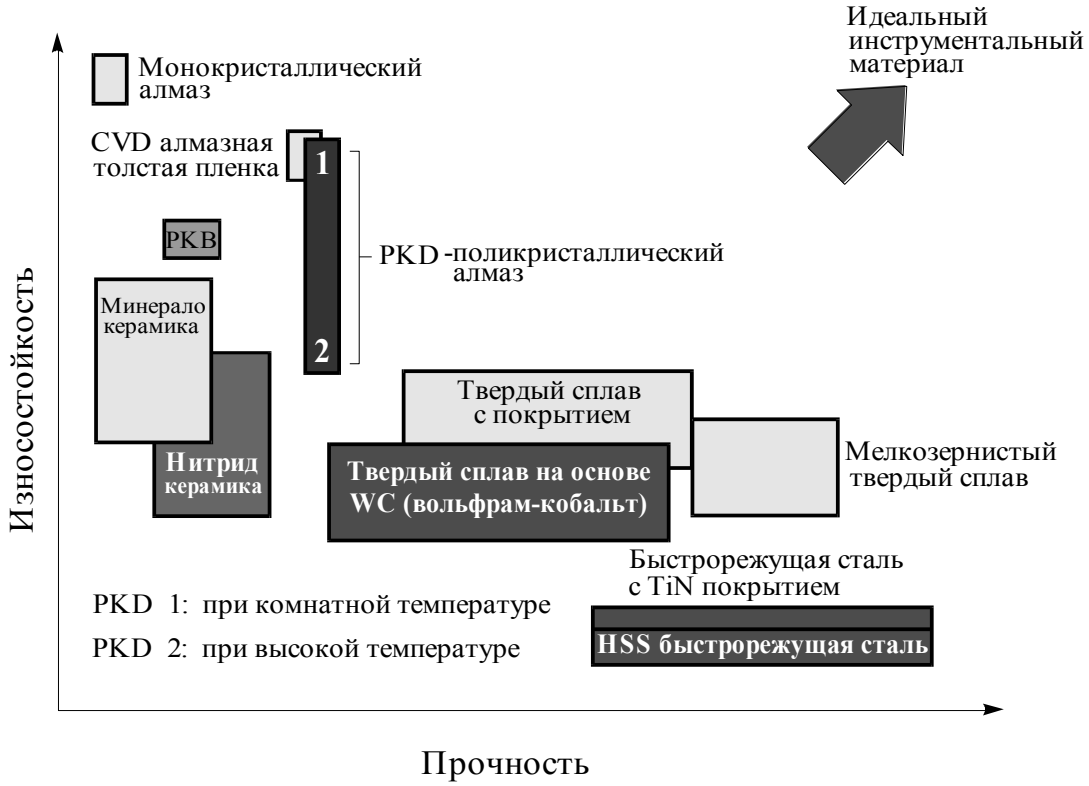


Рисунок 3.1 – Классификация инструментальных материалов

Идеальный инструментальный материал был бы, следовательно, в правой верхней части диаграммы, где он имел бы одновременно наивысшую прочность и твердость. На практике прочность и твердость конкурируют, так что инструментальные материалы, отличающиеся как, например, быстрорежущая сталь высокой прочностью, имеют сравнительно низкую твердость. Минералокерамика наоборот имеет высокое сопротивление к абразивному износу при одновременно ограниченной характеристике прочности. Твердые сплавы с хорошими показателями твердости и прочности занимают согласно

этой классификации среднюю позицию.

Чистый монокристалл алмаза, обладающий непревзойденной твердостью и износостойкостью, отличается хрупкостью и соответственно риском отказа при биении. Поликристаллы PKD (с включением кобальта) или CVD-алмаза («свободные от металла») имеют среднюю прочность.

Более низкая износостойкость поликристаллических алмазов PKD в сравнении с монокристаллом наблюдается при температурах свыше 700°C. Причиной этому, служит присутствие кобальта (катализатора) в PKD-структуре, который способствует «инверсии синтеза», сравнимой с трансформацией материала алмаза в графит при более низких температурах. Разумеется, уменьшение теплостойкости практически не встречается, так как ни при производстве инструмента, ни при применении его граница температуры 700°C не должна превышаться. Помимо того PKD достигает коэффициента вязкости определенных марок твердого сплава, так что этот инструментальный материал пригоден также для технологических операций с относительно высокими динамическими значениями силы резания.

Решающее значение для «употребляемости» инструментального материала играют тепловые свойства. В случае алмаза, как непревзойденного проводника тепла, быстрый отвод его из зоны резания в тело инструмента поддерживает соблюдение строгих условий резания, так же как и "щадящий" тепловой режим для алмаза.

Монокристаллы алмаза имеют очень большую твердость, низкие коэффициенты трения, высокую жесткость, номинальные параметры кристаллической решетки. Вместе с тем для такого режущего материала можно достигать требуемой остроты кромки с малым отклонением, необходимой для осуществления обработки при глубине резания меньше чем 10 мкм.

Монокристаллическая структура алмаза обладает явно выраженной анизотропией свойств в зависимости от ориентации. Для достижения высокой стойкости и эффективности работы этому обстоятельству должно придаваться особенное значение при производстве инструмента. Зависимо от ориентации в кристаллической решетке наблюдаются повышение стойкости режущей части. Речь идет о реализации предпосылок уменьшения износа режущей части уже при изготовлении инструмента, при его заточке и определении геометрии режущей части. При заточке режущей кромки возникает возможность получения различного угла закругления и это приводит к изменению формы обрабатываемой поверхности. Корректировка режущей части возможна и при дальнейшей переточке.

Поликристаллические синтетические алмазы отличаются микроскопической анизотропией материала, вызванной различной

кристаллографической ориентацией отдельных кристаллов, что приводит к переменному воздействию в границах контакта поликристалла с обрабатываемым материалом. Инструмент и деталь участвуют в процессе упругого и пластического деформирования, который зависит от соотношения их свойств. Инструмент изнашивается вследствие механического истирания стружкой по передней поверхности и по задней поверхности деталью: каждый кристаллит, деформирующий участки режущей кромки, по-разному упруго и пластично деформирует прилегающие объемы материала в граничном слое. Возникающее различие в формировании поверхности изделия оценивается в пределах от 5 до 50 нм в зоне допускаемой шероховатости. Наглядно это видно при лазерномикроскопической записи определенной площади поверхности в 3D- и соответственно 2D-описании шероховатости.

Таким образом, особые свойства алмаза как инструментального материала понуждают по иному подходить к конструированию и изготовлению лезвийного инструмента, изучению физической сущности алмазной лезвийной обработки.

3.2. Особенности контактных процессов

Закономерности контактных процессов в зоне резания алмазного и не алмазного инструментов существенно отличаются.

Главное влияние на процессы, происходящие в контакте алмазного инструмента с обрабатываемым материалом, оказывает его самая высокая твердость и низкий коэффициент трения с большинством материалов, а так же его высокая тепло- и температуропроводность.

Следовательно, более низкий уровень работы трения, меньшие затраты на пластическое деформирование и низкая температура в контактных слоях — одно из главных отличий, определяющих достоинства алмазного инструмента.

Природный алмаз имеет самый низкий коэффициент трения с металлами по сравнению с синтетическими алмазами АСПК и АСБ. Такое различие объясняется тем, что синтетические алмазы в отличие от природных имеют на поверхности поры (несплошность поверхности), вызванные выпадением частей кристаллитов, а так же металлические включения. У АСБ пор и включений больше, чем у АСПК. Эти поры заполняются обрабатываемым металлом, что естественно ухудшает условия трения.

Превалирование внешнего трения над внутренним является одной из главных особенностей контактных процессов алмазов с большинством металлов.

Исключение составляют титан, цирконий и некоторые другие, при контактировании с которыми поверхность алмаза покрывается прочно

удерживающейся пленкой трущегося металла. Это, по-видимому, связанно с высокой активностью их ювенильных поверхностей, в результате чего образуется прочная химическая связь металла с поверхностью алмаза, предопределяющая внутреннее трение в контакте, что оказывает существенное влияние на стружкообразование при алмазной обработке.

3.3. Стружкообразование

Стружкообразование при алмазном точении в сравнении с тонким точением твердосплавным или другим инструментом характеризуется меньшим уровнем деформации срезаемого слоя. Это подтверждается меньшей усадкой стружки, большим значением углов сдвига, снижением уровня сил и работы резания.

Изучение шлифов стружек, полученных при точении латуни резцами из твердого сплава, алмаза природного и синтетического, выявило существенные различия. Если при точении твердым сплавом в прирезцовом слое стружки наблюдается зона вторичной деформации, при этом поверхности сдвига изгибаются, становясь параллельными передней поверхности резца, что свидетельствует о сильном пластическом течении в тонких слоях стружки, то при алмазном точении такие признаки практически отсутствуют. В этом случае элементы стружки крупнее, т. е. менее деформированы. Углы сдвига так же больше. Все это позволяет сделать вывод о приближении при алмазном точении к условиям «чистого среза» — резания как бы без зоны вторичной деформации стружки. При точении синтетическим алмазом стружка несколько отличается от стружки, полученной природным алмазом, что объясняется структурными особенностями и наличием на поверхности резца из синтетического алмаза пятен трущегося металла. Однако количественные и качественные характеристики процесса точения резцами из синтетических и природных алмазов весьма близки.

Влияние глубины резания на усадку стружки при тонком и при алмазном точении практически отсутствует, что свидетельствует о весьма малой роли ширины среза в контактных процессах.

3.4. Силы резания

Силы резания при алмазном точении характеризуются существенно меньшим уровнем, чем при тонком точении твердым сплавом. Главными факторами, влияющими на снижение сил при алмазном точении, являются меньший коэффициент трения и малый радиус округления режущей кромки у алмазного резца.

Силы резания при алмазном точении в 2÷4 раза меньше, чем при тонком

точении. Для резцов из природных алмазов они меньше, чем из синтетических алмазов. Это предопределяется меньшим коэффициентом трения и меньшим радиусом округления режущей кромки.

Важной особенностью алмазного точения является сравнительно малое изменение сил резания при износе резца. Интенсивность увеличения сил резания с износом твердосплавного и алмазного резцов различна. При износе алмазного резца силы резания возрастают значительно меньше, главным образом, в начальный период. Чем больше износ инструментов, тем это различие больше. Все это свидетельствует о том, что у алмазных резцов износ не приводит к такому интенсивному увеличению радиуса округления режущей кромки, как это имеет место у твердосплавных или быстрорежущих инструментов.

С износом алмазного резца силы на задней поверхности увеличиваются, однако удельные нагрузки не растут, а падают, так как площадка износа увеличивается быстрее, чем сила резания. Поэтому создание на задней поверхности резца небольших разгрузочных фасок повышает работоспособность инструмента.

3.5. Тепловые явления

Меньшая в сравнении с тонким точением работа резания при алмазном точении предопределяет и меньшее тепловыделение. Высокая теплопроводность алмазных резцов обеспечивает низкий уровень температуры в зоне резания при точении цветных металлов, пластмасс и ряда других материалов. Опыт работы показывает, что даже при высоких скоростях температура в зоне резания редко превышает 200°С, что позволяет говорить о процессе алмазного точения как о «холодном». Исключение составляют титановые и некоторые другие сплавы, при обработке которых температура в зоне резания достигает больших значений.

В отличие от традиционного точения, где главным источником тепла является деформации и трение в процессе стружкообразования на передней поверхности резца, при алмазном точении с малыми толщинами среза до $a = 0{,}02$ мм главным источником тепловыделения является трение по задней поверхности. Поэтому тепловой поток будет направлен не со стороны передней, а со стороны задней поверхности.

При обработке цветных металлов большая часть тепла направляется в стружку и обрабатываемую деталь. В резец, как правило, идет небольшое количество тепла, т.к. теплопроводность оправок стандартных алмазных резцов намного ниже алмаза и обрабатываемого материала. При обработке материалов, имеющих низкую теплопроводность (пластмассы, титановые

сплавы), количество тепла, уходящего в резец, увеличивается. В этих случаях для лучшего отвода тепла можно использовать оправки резцов из теплопроводных материалов. Температура поверхности детали при алмазном точении цветных металлов редко превышает 100°С. Это значит, что термические изменения в поверхностном слое детали минимальны или исключены.

Низкая теплонапряженность при алмазном точении, невысокий уровень температур детали и инструмента позволяют обеспечить высокую точность обработки при сохранении высокого качества.

3.6. Износ и стойкость алмазных резцов

При точении меди, латуни, алюминия, пластмасс и других материалов стойкость алмазных резцов может достигать нескольких сотен часов, что во много раз превышает возможности всех известных инструментальных материалов. Это позволяет производить обработку деталей без подналадки и регулировки инструмента по несколько смен подряд, что очень важно в автоматизированном производстве. Высокая стойкость, в том числе и размерная, делает алмазный инструмент незаменимым в высоких технологиях. Вместе с тем при обработке различных групп материалов алмазные резцы изнашиваются по-разному, в связи с чем обрабатываемые материалы условно можно разделить на три группы.

Первая группа охватывает такие материалы, при обработке которых регулярный, монотонный, нарастающий износ практически отсутствует. Резцы здесь выходят из строя по случайным причинам: остановка станка, его вибрации, случайные включения в металле, удары и т. д. Сюда относятся медь, латуни и бронзы, не имеющие твердых включений, алюминий и его сплавы, не имеющие абразивных включений, магний, драгоценные металлы, пластмассы без твердых наполнителей и т. п.

Вторая группа охватывает металлы и неметаллические материалы, содержащие твердые включения. Обработка материалов этой группы характеризуется медленным регулярным изнашиванием инструмента. Однако износ инструмента здесь не связан с температурой в зоне резания, так как ее уровень низкий и недостаточный для термоактивируемого износа. Ко второй группе можно отнести цветные металлы и сплавы, содержащие твердые включения, пластмассы с твердыми наполнителями, керамические материалы и др.

К третьей группе нужно отнести материалы, обработка которых вызывает возникновение высоких температур: 700÷900°С, то есть таких, при которых алмазный резец интенсивно изнашивается. К таким материалам можно

отнести титан и его сплавы, цирконий, вольфрам, твердые сплавы и др. Здесь интенсивность износа выше, чем при обработке материалов второй группы.

Необходимо отметить, что преимуществ при алмазном точении черных металлов, как правило, не наблюдается, т. к. обрабатываемую поверхность формирует не режущая кромка алмазного резца, а нарост, который не обеспечивает высокое качество обработки.

3.7. Качество поверхности

Качество поверхности при точении резцами из природных и синтетических алмазов предопределяется особенностями процесса резания, рассмотренными выше. Следует отметить, что в формировании поверхностного слоя и обработанной поверхности роль физических факторов (адгезионное взаимодействие, температурное влияние, фазово-структурные изменения и т. п.) значительно меньше, чем при точении другими инструментальными материалами. Поэтому при алмазном точении на первое место выходят факторы, влияющие на образование микронеровностей чисто геометрически. Фазово-структурные изменения в поверхностном слое детали зачастую отсутствуют, т. к. уровень температур при обработке материалов первой и второй групп низкий т. к. обрабатываемую поверхность формирует не режущая кромка алмазного резца, а нарост , который не обеспечивает высокое качество обработки.

В то же время при тонком точении твердосплавным инструментом высота микронеровностей, в образовании которых большую роль играет физический фактор, значительно выше. В интервале скоростей резания, в котором наблюдается особенно сильное взаимодействие твердосплавного резца с обрабатываемым материалом, различия алмазного «холодного» и тонкого «горячего» точения особенно велики.

3.8. О выборе критерия износа алмазных резцов

Выбор критерия износа алмазных резцов регламентируется, в основном, двумя факторами: качеством обработанной поверхности и себестоимостью обработки. При необходимости обеспечивать высокое качество обработанной поверхности (Ra = 0,3 мкм) величина износа может ограничиваться значениями 0,05÷0,1 мм.

При необходимости обеспечить обработку декоративных поверхностей так же рекомендуется допускать малую величину износа резца — не более 0,05 мм.

При точении материалов первой группы даже такой малый критерий износа обеспечивает высокую стойкость инструмента, составляющую десятки и

сотни часов машинного времени. Таким образом, при точении материалов первой группы критерий износа определяется требуемой шероховатостью обработанной поверхности.

Если требуемая шероховатость обработанной поверхности не лимитируется износом инструмента, то следует допускать наибольшее значение критерия износа — 0,5 мм. Чем больше допустимый износ, тем меньше количество дорогостоящих переточек инструмента до полного использования алмазного резца. При критерии износа $h_з = 0{,}5$ мм число переточек алмазного резца может составлять 2÷4. С уменьшением допустимого износа по задней поверхности число переточек увеличивается, однако суммарный путь резания (ресурс инструмента) не растет, а падает. Поскольку для данной группы материалов, как правило, износ инструмента не лимитирует шероховатость обработанной поверхности, то рекомендуется в качестве критерия износа принимать hз = 0,25÷0,5 мм.

3.9. Перспективы развития и применения

Достоинства алмазного лезвийного инструмента, иллюстрированные в этой главе на примере алмазного точения, безусловно прочат ему дальнейшее развитие и расширение объемов потребления. Высокопрецизионная обработка изделий становится все более востребуемой, а, значит, это будет стимулировать работы по совершенствованию синтеза монокристаллического алмаза, т. к. применяемые природные монокристаллы имеют ограничения и по размерам и по стоимости.

Многообещающим является направление получения алмазных покрытий (пленок) на различных подложках толщиною менее30 мкм, а также более толстых образований, получаемых методом CVD - химического осаждения при низких температурах. Такое осаждение дает направленную плотную структуру с благоприятными управляемыми условиями роста кристаллитов. Такой CVD-алмаз имеет то неоценимое достоинство, что в его структуре отсутствуют какие-либо металлические включения, а теплопроводность достигает уровня природного монокристалла. Высокие термоустойчивость и износостойкость "чистых" алмазов открывают перспективы их эффективного применения при обработке абразивосодержащих материалов.

Можно констатировать, что дальнейшее развитие промышленного производства, требуемые высокие скорости, производительность и качество обработки, появление все новых и новых труднообрабатываемых материалов будут усиливать потребность в алмазной обработке, создании новых инструментов и технологий их применения. Алмазная обработка без сомнения и в будущем останется ключевым фактором для создания высоких технологий,

достижения нового уровня производства наукоемкой продукции.

3.10. Вопросы для самостоятельного контроля

1. Дайте характеристику и приведите обозначение алмазных сверхтвердых материалов.
2. Какие требования предъявляются к качеству рабочей части алмазного лезвийного инструмента?
3. Охарактеризуйте те свойства алмазов, которые выделяют их из всех инструментальных материалов.
4. Каковы особенности трения алмаза с металлами?
5. Как влияют условия трения на его коэффициент?
6. Каковы особенности стружкообразования при алмазном точении?
7. Как влияют режимы резания не деформацию стружки?
8. Почему при алмазном и тонком точении составляющие силы резания различны?
9. Почему радиальная составляющая силы резания больше, как правило, тангенциальной?
10. Каков уровень сил на задней поверхности алмазного резца?
11. Каково влияние режимов обработки на составляющие силы резания?
12. Каковы особенности тепловых явлений при алмазном точении?
13. Какова особенность влияния скорости на температуру резания?
14. Как распределяется тепло, возникающее в процессе алмазного точения?
15. Каковы механизмы износа и стойкость алмазных резцов при обработке различных групп материалов?
16. Сравните влияние скорости резания на ресурс алмазных резцов при обработке различных материалов.
17. Показатель относительной стойкости алмазных резцов при обработке абразивных материалов. Как Вы понимаете его сущность?
18. Почему интенсивно изнашиваются алмазные резцы при обработке стали?
19. Как влияют режимы резания и износ алмазного резца на шероховатость обработанной поверхности?
20. Назовите принципы выбора критерия износа алмазных резцов.
21. Каковы особенности конструкции и геометрии режущей части алмазных резцов?

Лекция 4 РЕЗАНИЕ ЛЕЗВИЙНЫМИ ИНСТРУМЕНТАМИ ИЗ СВЕРХТВЕРДЫХ НИТРИДОВ БОРА

1. Контактные процессы.
2. Особенности стружкообразования.
3. Силы резания.
4. Тепловые явления.
5. Износостойкость инструмента.
6. Качество поверхности.
7. Резание при периодических нагрузках.
8. Применение инструмента из сверхтвердых нитридов бора
9. Вопросы для самостоятельного контроля.

Одной из основных предпосылок повышения качества деталей и точности обработки труднообрабатываемых конструкционных материалов является создание и эффективное применение новых сверхтвердых материалов на основе плотных модификаций нитрида бора. При этом расширяются технологические возможности металлообработки, полнее используется станочный парк, повышается отдача наукоемких технологий, появляются основы для высокопрецизионных рабочих процессов.

Сверхтвердые материалы на основе сверхтвердых модификаций нитрида бора, несколько уступая алмазу по твердости, характеризуются высокой термостойкостью, достигающей 1500°С, высоким сопротивлением термическим ударам и циклическим нагрузкам, а так же слабым химическим взаимодействием с железом.

Как подтверждает широкая практика, наиболее эффективно применение лезвийного инструмента из нитрида бора при обработке закаленных сталей, чугунов различной твердости, наплавленных материалов, труднообрабатываемых высоколегированных сталей и сплавов. Здесь преимущества сверхтвердых нитридборных материалов реализуются наиболее полно.

Процесс резания лезвийным инструментом на основе сверхтвердых модификаций нитрида бора существенно отличается от процесса резания алмазным инструментом, что предопределяется его особыми физико-механическими свойствами.

4.1. Контактные процессы

Основным отличием контактных процессов при взаимодействии алмазного и нитридборного инструментов с обрабатываемым материалом

является характер трения. Если трение алмаза по большинству обрабатываемых материалов подчиняется законам внешнего трения, то трение нитридборного инструмента законам внутреннего трения, так как на его поверхности образуется пленка обрабатываемого металла, которая прочно удерживается. Как известно, закономерности внешнего и внутреннего трения различны.

Рост скорости сильно уменьшает величину коэффициента трения нитрида бора с металлами, так как с ростом скорости повышается температура на поверхности трения, уменьшается адгезионное взаимодействие, снижается прочность связи металл-металл. Температура в контакте может достигать 1000°С и более, когда поверхностные слои металла размягчаются и легко деформируются. Поэтому на интенсивность снижения коэффициента трения влияет и теплопроводность инструментального материала: чем она ниже, тем ниже коэффициент трения при прочих равных условиях. Так, при трении алмаза с латунью (внешнее трение) влияние скорости практически отсутствует, в то время как при трении нитрида бора с латунью (внутреннее трение) скорость как тепловой фактор оказывает большое влияние на коэффициент трения. Менее теплопроводный Гексанит-Р в контакте с латунью при меньших скоростях достигает максимума коэффициента трения.

Для пары нитрид бора – сталь с ростом удельного давления растет сила трения, а значит, температура, что снижает коэффициент трения. При этом сохраняется известная в резании металлов закономерность - произведение коэффициента трения на удельное давление — величина постоянная, т. е. q = const, что имеет место только при внутреннем трении.

4.2. Особенности стружкообразования

Для рассматриваемого процесса характерна меньшая степень деформации срезаемого слоя вплоть до отрицательной усадки стружки.

С увеличением скорости резания качественное изменение основных характеристик процесса стружкообразования одинаковое. С ростом скорости до v_{23} увеличивается усадка стружки, относительный сдвиг, длина пластического контакта, уменьшается угол сдвига, а степень деформации стружки возрастает. Дальнейшее увеличение скоростей от v_{12} до v_{23} резко, от v_{23} - в меньшей мере уменьшает усадку стружки, относительный сдвиг и длину пластического контакта, повышая угол и снижая деформацию. Величина угла сдвига может достигать 50°, что соответствует «отрицательным» значениям усадки стружки.

Выявлены три характерных диапазона влияния скорости резания на 'усадку стружки: до границы первого и второго диапазонов (v_{12}) коэффициент утолщения стружки растет, до границы второго и третьего (v_{23}) с ростом скорости — круто падает, а в третьем диапазоне, при больших скоростях

резания — убывает монотонно. Его падение при $v > v_{12}$ объясняется изменением коэффициента трения между стружкой и передней поверхностью с ростом температуры.

Значительную роль в изменении коэффициента утолщения стружки играет налип. Так, с ростом скорости резания до v_{23} увеличивается до максимальных значений действительный передний угол инструмента, степень деформации срезаемого слоя уменьшается, коэффициент утолщения стружки достигает минимума. При $v > v_{23}$ налип исчезает и скорость резания влияет на коэффициент утолщения стружки через тепловой фактор.

4.3. Силы резания

Резание закаленных сталей лезвийным инструментом из нитрида бора сопровождается более низким уровнем сил резания по сравнению с обработкой традиционным инструментом. Из-за, как правило, малых толщин среза важную роль, а во многих случаях определяющую, играют силы на задней поверхности инструмента. Их величина может превышать силы на передней поверхности, определяющие стружкообразование.

Исследование сил, действующих на переднюю и заднюю поверхности резцов из нитрида бора при точении закаленных сталей, показали, что удельные нагрузки на задней поверхности больше, чем на передней, и что удельная работа стружкообразования при малых толщинах среза меньше работы трения на задней поверхности инструмента, что так же является одной из особенностей процесса резания.

4.4. Тепловые явления

Изучение тепловых явлений при резании закаленных сталей резцами из нитрида бора представляет определенные сложности, связанные с невозможностью использовать метод естественной термопары из-за низкой электропроводности инструмента. Используя метод искусственной термопары с другими методами, например, методом термоиндикаторов, можно достаточно достоверно определить температурное поле в инструменте, детали и стружке.

Температура резания у резца из Гексанита-Р при одинаковых скоростях резания всегда выше, что объясняется меньшей его теплопроводностью по сравнению с Эльбором-Р. Уровень температуры зависит так же и от диаметра растачивания. Чем меньше диаметр, тем выше температура резания при остальных равных условиях. Увеличение сечения среза традиционно увеличивает температуру резания, однако, особенностью является то, что глубина резания влияет больше, чем подача.

Большая часть тепла идет в стружку, в результате чего она сильно

нагревается. Раскаленная стружка может представлять опасность. С ростом скорости резания растет температура стружки, что подтверждается ее рентгеновским анализом, который показывает увеличение остаточного аустенита.

Из-за малого времени воздействия высокой температуры на контактируемую поверхность (0,0002÷0,0003 с) глубина ее проникновения невелика — несколько микрометров. На расстоянии в 20 мкм зафиксирована температура всего 160 град. Локальность и кратковременность воздействия высокой температуры на обработанную поверхность является причиной торможения фазовых переходов, которые здесь меньше, чем при процессе шлифования.

4.5. Износостойкость инструмента

Установление физических и технологических явлений и закономерностей, предопределяющих работоспособность инструмента из нитрида бора, является важным этапом в создании исходной базы, методологии и автоматического выбора оптимальных условий резания и эффективной эксплуатации инструмента из сверхтвердых материалов. Для этого нужно знать условия протекания и природу износа его рабочих поверхностей, т. к. именно износ определяет работоспособность инструмента и является причиной, ограничивающей его дальнейшее применение. В свою очередь износ является важным фактором, оказывающим большое влияние на стружкообразование, силы резания, теплонапряженность процесса и качество обработанной поверхности.

При лезвийной обработке закаленных сталей резцами из нитрида бора последние подвергаются всем видам износа: абразивному, диффузионному, химическому, окислительному. Однако, в суммарный износ в различные периоды эксплуатации инструмента вклад каждого из этих видов неодинаков. Интенсивность износа различна и зависит от условий резания.

Комплексное проведение стойкостных испытаний, изучение изношенных поверхностей резцов при помощи сканирующего микроскопа, рентгеновского микроанализа и измерения радиоактивности позволили вскрыть физические особенности развития износа. Интенсивность износа резцов из ПСТМ определяется, прежде всего скоростью резания: при малых скоростях вследствие динамической неустойчивости процесса резания интенсивно изнашивается задняя поверхность; при оптимальных скоростях резания износ снижается, т. к. наличие заторможенного слоя на передней поверхности уменьшает его; при высоких скоростях резания интенсивность износа резко возрастает, т. к. на резце отсутствует защитный слой металла,

предопределяющий характер контактного взаимодействия резца с заготовкой, а высокие температуры вызывают фазовые превращения и снижение прочностных характеристик ПСТМ.

Оптимальная работоспособность инструмента из нитрида бора при точении закаленных сталей реализуется в сравнительно узком диапазоне скоростей резания и, следовательно, температур.

Как бы не изменялись условия обработки — подача, глубина резания, геометрические параметры инструмента — оптимальной скорости резания соответствует постоянная оптимальная усадка, равная 1,25. Установленная связь усадки стружки и оптимальной скорости резания, т. е. температуры, позволяет резко сократить стойкостные испытания и по усадке стружки 1,25 определять оптимальную скорость для данных условий резания.

Большое влияние на износостойкость резцов из нитрида бора оказывают фазово-структурные особенности инструмента. При точении закаленной стали резцами из нитрида бора на основе сфалерита — Эльбор-Р оптимум в зависимости длины пути резания от скорости сдвинут в сторону больших ее значений. А оптимум для резцов на основе вюрцита — Гексанит-Р сдвинут в сторону меньших скоростей резания. Это объясняется различием в физико-механических свойств Эльбора-Р и Гексанита-Р, и, в первую очередь, различной термостойкостью, теплопроводностью, различными прочностными показателями.

При растачивании закаленных сталей на дооптимальных и оптимальных скоростях резания износ резцов из ПСТМ происходит в основном по задней поверхности, а увеличение скорости резания приводит к износу резца как по задней, так и по передней поверхностям. Поэтому в качестве критерия затупления резцов из нитрида бора при растачивании стали ШХ15 следует принимать износ по задней поверхности не более 0,4 мм. При необходимости обеспечивать высокое качество обработанной поверхности критерий износа может изменяться.

Проведенные исследования позволили установить более высокую степень влияния режимов резания на работоспособность резцов из ПСТМ при растачивании, чем при точении из-за повышенной чувствительности процесса к изменению режимов обработки.

4.6. Качество поверхности

Особенности стружкообразования, обусловленные низким коэффициентом трения и большим углом сдвига, большими давлениями и высокой температурой в зоне резания, локальность и кратковременность ее воздействия на обработанную поверхность, ее проникновение на

незначительную глубину оказывают влияние на шероховатость обработанной поверхности, ее наклеп, уровень и знак остаточных напряжений.

Благодаря высокому качеству процесс лезвийной обработки нитридборным инструментом является конкурентоспособным абразивной обработке. На формирование микронеровностей обработанной поверхности наибольшее влияние оказывают режимы резания и износ инструмента, а также твердость обрабатываемого металла.

С ростом скорости резания шероховатость поверхности уменьшается: в области малых скоростей резания (дооптимальных) интенсивно, а в области оптимальных и выше оптимальных незначительно. Такое влияние скорости резания на шероховатость объясняется тем, что при малых скоростях процесс резания, как отмечалось раньше, не стабильный — динамически не устойчив, т.к. температура в зоне резания еще не высокая. Отсюда большие силы, большая усадка и неблагоприятные условия стружкообразования. С ростом скорости процесс резания стабилизируется и шероховатость уменьшается. При обработке сталей HRC 63-65 на станках повышенной точности достигается шероховатость R_a = 0,35 мкм, а на станках обычной точности R_a = 0,4÷0,5 мкм. Увеличение шероховатости с уменьшением твердости обрабатываемого материала можно объяснить застойными явлениями (наростом) на передней поверхности инструмента, которые интенсифицируются со снижением твердости.

При лезвийной обработке закаленных сталей резцами из ПСТМ в поверхностном слое формируются сжимающие остаточные напряжения, повышающие износостойкость деталей машин. Выявлен одинаковый характер зависимостей остаточных напряжений и микротвердости от режимов резания при точении и растачивании. Различия лишь количественные: большее влияние глубины резания, повышенный уровень сжимающих напряжений и меньшая глубина их залегания при растачивании.

Установлено, что при растачивании резцами на основе нитрида бора закаленной стали максимальные сжимающие напряжения выше и локализуются ближе к поверхности детали из-за силовых и температурных особенностей обработки. Решающее влияние на остаточные напряжения при растачивании оказывает силовой фактор, формирующий их сжимающий характер. Высокая температура, возникающая при резании, действует кратковременно и, проникая на незначительную глубину, не вызывает существенных фазовых превращений в поверхностном слое.

Величина и знак остаточных напряжений зависят от скорости резания, подачи, геометрии резца и других условий, влияние которых проявляется в изменении роли силового и температурного факторов. Превалирующее

действие первого приводит к возникновению в поверхностных слоях сжимающих остаточных напряжений, второго - растягивающих. Это подтверждается и при растачивании стали ШХ15 резцами из ПСТМ. Увеличение скорости резания приводит к снижению сжимающих остаточных напряжений, т. к. оно сопровождается повышением температуры в поверхностном слое.

Увеличение подачи снижает коэффициент утолщения стружки, так как при увеличении толщины срезаемого слоя и температуры на контактных поверхностях инструмента уменьшается коэффициент трения.

Влияние глубины резания объясняется ростом ширины среза и более тяжелыми условиями стружкообразования, изменяющими контактные процессы и несколько повышающими коэффициент утолщения стружки. Деформация срезаемого слоя при растачивании выше, чем при точении.

Определение рациональных режимов резания при использовании инструмента из ПСТМ и, в частности, из нитрида бора более актуально, чем при использовании традиционного инструмента. Это объясняется особенностями процесса резания и, в первую очередь, следующими факторами:

- большей напряженностью и интенсивностью процесса резания;
- более высокими требованиями к качеству обработанной поверхности;
- более высокими требованиями к работоспособности режущего инструмента;
- узким интервалом скоростей резания, в котором наиболее полно реализуются преимущества инструмента из ПСТМ;
- высокой стоимостью инструмента из ПСТМ.

4.7. Резание при периодических нагрузках

Периодическими принято называть поверхности, профиль которых состоит из периодически повторяемых одинаковых участков. Свойства периодичности особенно четко проявляются у полигонных (многогранных) поверхностей. Детали с такими поверхностями широко применяются в машиностроении. Разработаны эффективные технологии обработки полигонных деталей и универсальные токарные и шлифовальные станки, на которых с одной установки можно обрабатывать круглые и полигонные наружные и внутренние поверхности.

Кинематические и геометрические условия резания при растачивании на разных участках полигонного профиля существенно различаются. Это одна из важных особенностей растачивания полигонных отверстий. Полученные эпюры распределения кинематических углов и скорости резания по полигонному профилю позволяют обоснованно назначать рациональные передний и задний

статические углы и аргументировано объяснять различные стороны процесса резания.

Доказано, что эффективная обработка полигонных отверстий закаленных сталей может осуществляться только резанием инструментом на основе сверхтвердого нитрида бора.

Установлено, что в зависимости от угла поворота полигонной поверхности значительно изменяются кинематические углы и скорость резания, вследствие чего происходит изменение равнодействующей силы резания (по величине и направлению) и шероховатости обработанной поверхности.

4.8. Применение инструмента из сверхтвердых нитридов бора

Исследования и практика применения инструмента из сверхтвердых нитридов бора показывают, что технологические процессы, базирующиеся на его использовании, позволяют:

• снизить шероховатость обработанной поверхности до Ra = 0,08 мкм и достичь точности обработки 5÷6 квалитета;

• исключить структурные изменения в поверхностном слое обрабатываемых материалов;

• изменить традиционный технологический процесс изготовления деталей из закаленных сталей (построить его по схеме: прецизионные заготовительные операции - термообработка - финишная обработка);

• повысить производительность обработки в 2÷5 раз по сравнению со шлифованием;

• заменить твердые сплавы, содержащие вольфрам, на операциях чистового и получистового точения.

Особенно перспективным следует считать применение инструмента из нитрида бора при лезвийной обработке чугунов, причем, и сырых и труднообрабатываемых — закаленных.

4.9. Вопросы для самостоятельного контроля

1. Назовите основные требования к инструментальным материалам. Каковы преимущества сверхтвердых инструментальных материалов на основе нитридов бора?
2. Каковы основные области применения нетридборных сверхтвердых инструментальных материалов?
3. В чем состоят особенности лезвийной обработки закаленных сталей резцами из ПСТМ?
4. В чем проявляются особенности стружкообразования при точении и растачивании закаленных сталей резцами из кубического нитрида бора?

5. Как влияют режимы резания на характеристики стружкообразования при точении закаленных сталей резцами из сверхтвердых нитридов бора?
6. От каких параметров зависит температура в зоне резания при точении? Что такое оптимальная температура резания?
7. Влияние параметров обработки на стойкость инструмента и длину пути резания при точении и растачивании закаленных сталей резцами из Эльбора-Р и Гексанита-Р?
8. Как влияют технологические режимы на качество поверхностного слоя, обрабатываемой поверхности при точении и растачивании закаленных сталей?
9. В чем заключается особенность обработки полигонных поверхностей из закаленных сталей?
10. Каковы характерные скоростные диапазоны при точении и растачивании закаленных сталей инструментами из ПСТМ?
11. Оцените достоинства и перспективы технологических процессов обработки, базирующихся на использовании инструментов из сверхтвердых нитридов бора.

Лекция 5 РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

1. Характеристика сверхтвердых материалов.
2. Физические предпосылки эффективности процесса алмазного шлифования СТПМ.
3. Основные закономерности разрушения СТПМ в процессе алмазного шлифования.
4. Взаимосвязь выходных показателей шлифования и параметров рабочей поверхности кругов.
5. Структурно-топографическая приспосабливаемость РПК и оптимизация процесса.
6. Комплексное управление рабочим рельефом и профилем рабочей поверхности круга.
7. Закономерности алмазного шлифования СТПМ с управлением РПК и универсальность его принципов.
8. Перспективы развития процесса шлифования с комплексным управлением РПК.
9. Вопросы для самостоятельного контроля.

Введение сверхтвердых износостойких инструментов в технологические процессы обработки самых различных материалов позволило достигнуть принципиально нового высокого уровня точности, шероховатости и состояния материала поверхностного слоя изделий. Создание и организация массового производства инструмента и других изделий из сверхтвердых поликристаллических материалов (СТПМ) потребовали изучения их структуры, свойств, изыскания высокопроизводительных методов и современной технологии обработки.

Обладая самой высокой в природе твердостью, жесткостью, износо- и теплостойкостью, эти материалы составляют особую группу труднообрабатываемых. Поэтому степень реализации уникальных свойств СТПМ в изделиях различных отраслей народного хозяйства во многом определяется решением проблемы их обрабатываемости.

Речь идет о повышении эффективности и расширении областей применения лезвийных режущих инструментов и других изделий из синтетических сверхтвердых поликристаллических материалов, обеспечении конкурентоспособного уровня их функциональных свойств на базе создания научных основ обрабатываемости СТПМ алмазным шлифованием и расширения его технологических возможностей.

Рабочий процесс высокой технологии создан на базе впервые выполненного комплексного системного исследования обрабатываемости особой группы сверхтвердых поликристаллических материалов на основе алмаза и плотных модификаций нитридов бора алмазным шлифованием. Принципиальной отличительной особенностью его является отсутствие требуемого теорией шлифования превышения твердости материала инструмента над твердостью обрабатываемого материала, что в сочетании с особенностями алмазной структуры СТПМ обуславливает специфику его сущности, не отражаемую закономерностями, установленными для шлифования материалов обычной твердости.

5.1. Характеристика сверхтвердых материалов

К особой группе сверхтвердых относят материалы преимущественно с ковалентными направленными связями и микротвердостью более 20,0 ГПа. Под это определение подпадают десятки веществ, но наибольший интерес представляют поликристаллические материалы на основе алмаза и плотных модификаций нитридов бора, существенно превышающие по твердости все остальные.

К настоящему времени различными фирмами США, Японии, стран ЕС и СНГ создано большое количество разновидностей СТПМ.

В классификации в качестве основных признаков приняты вид сверхтвердой основы — алмазная или нитридборная — и структура продукта синтеза или спекания, так как именно эти признаки определяют эксплуатационные свойства, области применения и обрабатываемость, т. е. являются важнейшими для потребителя.

В соответствии с этим все СТПМ разделены на пять групп:

I группа — сверхтвердые поликристаллические материалы на основе алмаза (АСБ, АСПК, СВ, СКМ - Р - СНГ; Мегадаймонд – США; Новотипс – ФРГ);

II группа — сверхтвердые поликристаллические материалы на основе плотных модификаций нитридов бора (Эльбор-Р, Гексанит-Р, киборит, Белбор, ПТНБ - СНГ; амборит – ЮАР);

III группа — сверхтвердые поликристаллические композиционные материалы (СВАБ – СНГ; компакт – Япония);

IV группа — синтетические поликристаллические двухслойные композиционные материалы с рабочим слоем из алмаза (ДАП, АТП, диамет – СНГ; компакс, стратопакс – США; полиблок – ФРГ; синдит – ЮАР);

V группа — синтетические поликристаллические двухслойные композиционные материалы с рабочим слоем из плотных модификаций

нитридов бора (сумиборон – Япония; амборит – ЮАР, томал – СНГ).

Анализ структуры и свойств СТПМ подтверждает существенное отличие их от свойств традиционных материалов. Это означает, что и подход к решению проблемы их обрабатываемости должен быть тоже нетрадиционным.

5.2. Физические предпосылки эффективности процесса алмазного шлифования СТПМ

Проблема обрабатываемости сверхтвердых материалов своими истоками уходит в глубокую древность, когда по крупицам накапливался опыт огранки природных алмазных кристаллов в бриллианты. В зависимости от того, какое разрушающее воздействие преобладало в исследованиях, созданы концепции механического, термохимического, химического, диффузионного, адгезионного и другого разрушения алмаза. Массовое производство синтетических поликристаллических алмазов и других сверхтвердых материалов потребовало отхода от традиционной технологии, базирующейся на процессе огранки с помощью чугунных дисков, шаржированных алмазным порошком.

Существующие способы обработки СТПМ не соответствуют критериям требований, предъявляемых по производительности, себестоимости, устойчивости, уровню сил резания и температуры, качеству. Это требует создания нового рабочего процесса, способного обеспечить требуемые функциональные, экономические, эстетические и экологические свойства изделий из СТПМ.

Учитывая потребности крупносерийного и массового производства инструмента и тот факт, что технологии инструментального производства базируются на операциях шлифования, а также результаты проведенного сравнения существа и выходных показателей различных методов обработки СТПМ и природных алмазов, в качестве базового процесса для изучения их обрабатываемости и изыскания на этой основе высокоэффективных способов обработки целесообразно принять алмазное шлифование как обладающее наибольшими технологическими возможностями.

Продуктивной оказалась концепция такого подхода к изучению обрабатываемости, который базировался на исследовании структурных аспектов механики и физики микроразрушения СТПМ в процессе алмазного шлифования, динамики его явлений и выходных показателей, связанных с аномальными изменениями режущего рельефа алмазных кругов, определением условий, обеспечивающих стабилизацию процесса шлифования путем управления рельефом, продольным и поперечным профилем рабочей поверхности круга. На такой широкой комплексной основе велся поиск основных физических и технологических закономерностей алмазного

шлифования СТПМ и создание эффективных рабочих процессов их обработки.

Наиболее принципиальные положения, отличающие процесс алмазного шлифования СТПМ от процессов шлифования материалов обычной твердости, имеют общую физическую основу: специфическую структуру - алмазная кристаллическая решетка - и уникальные физико-механические свойства алмазов и других сверхтвердых материалов, определяющие их взаимодействие с алмазным кругом.

В силу одинаковой кристаллической структуры, равенства твердости, прочности интенсивность обработки СТПМ низка и не сопоставима с интенсивностью алмазного шлифования конструкционных, инструментальных и других материалов обычной твердости.

Предложен новый подход в теории резания, базирующийся на следующем:

• физическом представлении о том, что основной съем шлифуемого СТПМ осуществляется не в результате внедрения в него алмазных зерен и их относительного перемещения, а преимущественно вследствие хрупкого микроразрушения в процессе массового высокоскоростного воздействия субмикрокромок алмазных зерен круга и создания в локальных объемах, примыкающих к пятнам упругого контакта, напряжений, превышающих предел прочности, а также вследствие волновых процессов и циклических нагрузок;

• на представлении о специфичности функционирования совокупности элементов "шлифуемый СТПМ - алмазное зерно - связка круга" как единой системы;

• на определении алмазного шлифования как структурно-чувствительного процесса управляемого взаимного микроразрушения обрабатываемого СТПМ и алмазных зерен круга.

5.3. Основные закономерности разрушения СТПМ в процессе алмазного шлифования

Резание есть процесс управляемого микроразрушения обрабатываемого материала под воздействием режущего клина инструмента в соответствующей технологической среде.

Микроразрушение СТПМ и алмазных зерен изучалось при резании единичными алмазными зернами и сравнении установленных закономерностей с суммарной работой зерен круга. Основой разделения объемов обрабатываемого материала являются элементарные акты разрушения прочных физико-химических связей между атомами. Алмаз обладает самыми высокими теоретической прочностью, поверхностной энергией и модулем упругости, что делает указанный разрыв связей затрудненным. Однако поверхностные и

внутренние дефекты кристаллитов, металлические и другие включения, межкристаллитные границы и поры играют роль концентраторов напряжений и способствуют хрупкому разрушению при напряжениях, существенно ниже теоретических.

Высокоскоростное контактное воздействие зерен круга способно создавать огромное количество поверхностных дефектов в кристаллитах обрабатываемого СТПМ и порождать сложное напряженное состояние.

Статистическая оценка элементов субмикропрофиля алмазных зерен по снимкам, полученным с помощью просвечивающего электронного микроскопа показала, что при разрешении порядка 200 режущий профиль зерна представляет собой ломаную линию с исчезающе малыми радиусами у вершины углов. Размеры длин микрокромок колеблются в основном в пределах 0,2-1,00 мкм, а углы выступов и впадин превышают 90. Моделируя микровыступ параболоидом с условным радиусом округления, определили размеры пятен упругого контакта алмазного параболоида с алмазным полупространством. Они показывают, что даже при значении в несколько микрометров и нагрузке на единичный выступ 20 Н размер пятна упругого контакта на 2÷3 порядка меньше характерных размеров кристаллитов, составляющих поликристалл.

Сущность этого физического представления состоит в том, что выступающие элементы субмикрорельефа номинально контактирующей поверхности зерна определяют дискретность действительного контакта и малые размеры его пятен. Это приводит к высокой сосредоточенности прилагаемой нагрузки, формированию напряженного состояния локальных объемов кристаллитов, прилегающих к пятну контакта, отделению в результате разрушения от поликристалла весьма малых объемов с высокой степенью дисперсности.

Свойства поликристалла, наличие межзеренных границ, металлических включений способствуют локализации трещин у поверхности, что подтверждается изучением электронно-микроскопических снимков.

При взаимодействии алмазного зерна с СТПМ на основе нитрида бора или с «мягкими» кристаллографическими направлениями алмаза может иметь место внедрение его микрокромок в обрабатываемую поверхность.

При внедрении алмазного зерна в обрабатываемую поверхность СТПМ условием интенсивного микроразрушения и эффективности процесса шлифования является малая величина углов при вершине зерен (порядка 20÷30), нормальная нагрузка на зерно должна быть максимально допустимой, обусловленной жесткостью станка, прочностью поликристалла и алмазных зерен.

Оценка роли микроструктуры и термоактивируемых процессов в микроразрушении СТПМ была направлена на выявление распределения металлофазы, возможности проявления пластической деформации, окисления, межкристаллитных термонапряжений, термоусталостной прочности.

Общий вывод сводится к тому, что термически активируемые процессы могут способствовать интенсификации микроразрушения поликристаллов на основе алмаза и нитридов бора при алмазном шлифовании. Хотя самостоятельный их вклад в удаление припуска следует квалифицировать как незначительный, но, усиливая или подавляя те или иные термически активируемые процессы, можно интенсифицировать микроразрушения прежде всего на атомном уровне и тем самым существенно влиять на качество обработанной поверхности и состояние поверхностного слоя. Речь идет о том, что изменением условий контактирования алмазных зерен с обрабатываемым алмазным поликристаллом можно добиваться трансформации механизма хрупкого разрушения (съема) алмазных кристаллов в физико-химические механизмы, позволяющие приблизить процесс такой обработки к уровню прецизионной и ультрапрецизионной.

Субмикрорельеф алмазных зерен играет решающую роль в формировании зон хрупкого микроразрушения, определяющих основной съем в процессе высокоскоростного контактного взаимодействия равнотвердых материалов, имеющих алмазную структуру (алмазные зерна круга и обрабатываемый СТПМ). Выступающие элементы субмикрорельефа зерна определяют дискретность действительного контакта и размеры его пятен, которые на несколько порядков меньше размеров отдельных кристаллов, составляющих поликристалл. Это приводит к высокой сосредоточенности прилагаемой нагрузки, формированию сложного напряженного состояния в локальных объемах кристаллов, отделению в результате разрушения от поликристалла весьма малых объемов с высокой степенью их дисперсности.

Термоактивируемые процессы играют вспомогательную роль в съеме обрабатываемого СТПМ. Суть его состоит в том, что под влиянием температуры шлифования может происходить окисление, диссоциация кристаллической решетки алмаза и плотных модификаций нитридов бора, трансформация ее в другие типы решеток с меньшей прочностью межатомных связей. Возможно протекание пластической деформации в тончайших слоях, возникновение межкристаллических напряжений из-за анизотропии свойств кристаллитов и многофазности поликристаллов, что в совокупности может лишь способствовать интенсификации съема. Усиливая или подавляя те или иные термоактивируемые процессы, можно на атомном уровне влиять на качество обработанной поверхности и состояние поверхностного слоя.

5.4. Взаимосвязь выходных показателей шлифования и параметров рабочей поверхности кругов

Динамика физических явлений, рельефа круга и выходных показателей алмазного шлифования СТПМ существенным образом отличаются от наблюдаемого при обработке материалов обычной твердости. Интенсивность съема АСПК в 1000 раз ниже, чем керамики, но существенно выше известного по литературным данным. Однако в реальном процессе эти потенциальные возможности реализуются лишь в начальном периоде шлифования.

В начальный период шлифования, когда круг вступает в работу, имея исходный профиль, с обрабатываемым СТПМ контактируют алмазные зерна, которые имеют наибольшую высоту выступания. Из-за полного отсутствия внедрения или из-за его незначительной величины на это небольшое число контактирующих зерен приходится вся нагрузка. В этих условиях хрупкий характер микроразрушения зерен, имеющих исходный развитый рельеф и острые выступающие микрокромки, приводит к самозатачиванию зерен, что подтверждено снимками поверхности зерен круга, работавших непродолжительное время. Однако этот период краток, после чего интенсивность хрупкого микроразрушения снижается и наблюдается переход к формированию площадок износа.

Это вызывается изменением поверхности контактирования зерен с обрабатываемым СТПМ, увеличением числа контактирующих зерен, а значит, снижением нагрузки, воспринимаемой отдельными зернами. При меньшей величине вылета зерна затрудняется реализация механизма хрупкого разрушения. В действие вступает процесс трения и термоактивируемые явления, его сопровождающие. Естественно, что интенсивность потери массы зерна и их высоты выступания становятся существенно меньше, чем в случае преимущественной реализации механизмов хрупкого разрушения. Этот переходный период от самозатачивания к полной потере остроты также непродолжителен и его значение в каждом случае определяется теми же факторами, что и факторами первого периода. На электронных снимках поверхности таких зерен наблюдаются как плоские площадки износа, так и достаточно развитые. Для третьего периода на электронных снимках эти поверхности выглядят весьма гладкими. Скорость потери высоты выступания зерен над связкой существенно приближается к незначительной величине в сравнении с установленными в начальный и переходный периоды

Алмазное шлифование СТПМ есть структурно-чувствительный процесс. В условиях невыполнения требуемого теорией резания превышения твердости инструмента в процессе обработки обеспечивается сложный комплекс избирательных разрушающих воздействий на структурные составляющие

шлифуемого СТПМ и РПК алмазного круга, совокупным результатом которых является экономически целесообразный уровень выходных показателей.

На основании экспериментально-аналитического изучения разрушения элементов системы "СТПМ - алмазное зерно - связка", проведенного корреляционного анализа тесноты связи параметров рельефа алмазного круга с физическими характеристиками, исследования переходного и самоустановившегося периода шлифования выявлено определяющее влияние высоты выступания зерен на природу и интенсивность их износа (разрушения), на интенсивность съема шлифуемого СТПМ.

5.5. Структурно-топографическая приспосабливаемость РПК и оптимизация процесса

Минимизация износа, стабильный характер трения и высокая устойчивость всех показателей взаимодействия с СТПМ в период самоустановившегося режима шлифования свидетельствуют о наличии основных признаков структурно-топографической приспосабливаемости.

Сущность структурно-топографической приспосабливаемости состоит в том, что топография, структура и свойства дискретной алмазной поверхности круга в процессе высокоскоростного контактирования с СТПМ перестраиваются в направлении, энергетически более выгодном в сравнении с исходным состоянием. Она протекает в два этапа. На первом, охватывающем начальный и переходный режимы шлифования, доминирует топографическая приспосабливаемость, содержанием которой является трансформация развитой поверхности зерен в уплощенную с устойчивым субмикрорельефом, снижение высоты выступания зерен над связкой и увеличение числа контактирующих зерен. На втором этапе, охватывающем переходный и самоустановившийся режимы шлифования, топографическая приспосабливаемость дополняется структурной, когда в тонких слоях, примыкающих к уплощенным поверхностям зерен, формируются энергетически устойчивые структуры, способные сохраняться длительное время. Наступающая стабилизация режущего рельефа в этом случае не обеспечивает требуемых выходных показателей шлифования. Поэтому аномально быструю структурно-топографическую приспосабливаемость рабочей поверхности кругов следует рассматривать как явление, затрудняющее, а чаще исключающее реализацию физических предпосылок высокой эффективности алмазного шлифования сверхтвердых материалов.

Аномально высокая скорость изменения физических явлений и выходных показателей шлифования СТПМ есть результат специфического проявления структурно-топографической приспосабливаемости РПК при

высокоскоростном и высоконагруженном контактировании с равнотвердой поверхностью СТПМ. Она состоит в последовательной смене характера и интенсивности износа зерен, формировании устойчивой конфигурации и вторичных структур контактирующих поверхностей зерен, включения в работу все большего их числа, перераспределении и уменьшении удельных нагрузок, трансформации механизма хрупкого микроразрушения в механизмы физико-химические.

Общим условием эффективности алмазного шлифования СТПМ является предотвращение проявления структурно-топографической приспосабливаемости и сохранение в процессе всего периода обработки такого состояния рабочей поверхности круга, когда совокупность ее режущих алмазных элементов способна передавать прилагаемую нагрузку на весьма малые участки обрабатываемой поверхности.

Методология управления режущими свойствами кругов в процессе шлифования СТПМ, создания новых способов шлифования базируется на выборе оптимальных характеристик инструмента и режимов обработки; формировании и поддержании в течение всего периода шлифования энергетически неустойчивых состояний алмазных зерен путем дозированного избирательного разрушающего воздействия на связку; направленном предотвращении структурной и топографической приспосабливаемости рабочей поверхности кругов; стабилизации оптимальных выходных показателей шлифования.

5.6. Комплексное управление рабочим рельефом и профилем рабочей поверхности круга

В соответствии с методологией предотвращения структурно-топографической приспосабливаемости связка круга рассматривается как самостоятельный главный объект дозируемых избирательных разрушающих воздействий с целью управления его режущей способностью. Это важное положение позволило сформулировать принцип комплексности управления режущим рельефом, поперечным и продольным профилем. Определены требования к методам формообразования поверхности кругов и лежащих в их основе разрушающих воздействий. В качестве базового был принят электрохимический, поскольку близкие к нему по своим достоинствам электрофизические и комбинированные все же уступают ему по чувствительности, широте диапазона, интенсивности, температурному режиму, поражению зерен.

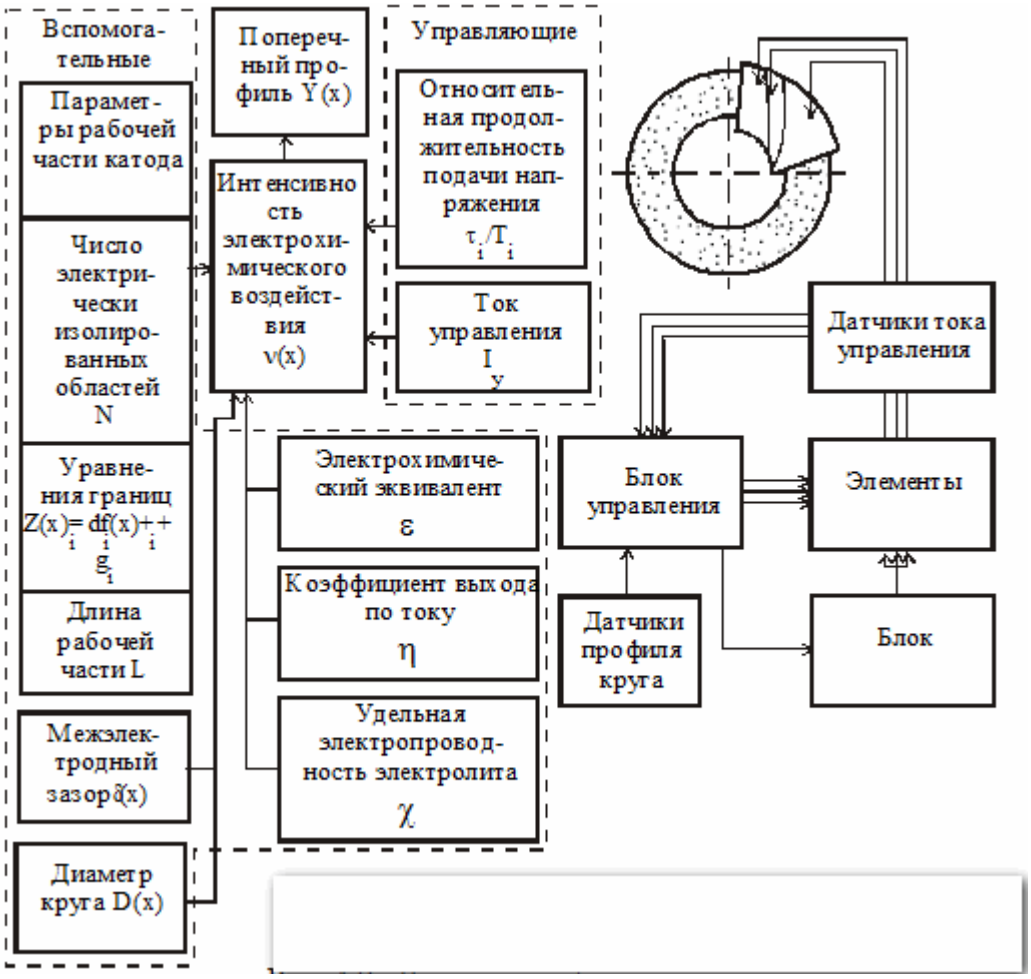


Рисунок 5.1 – Параметры и блок-схема управления рельефом и поперечным профилем круга

Задача управления рельефом сводится к согласованию интенсивности принудительного съема связки v_c и интенсивности линейного износа алмазных кругов $v_з$, а также к определению условий, исключающих обвальные выпадения из связки неработавших зерен. Три соотношения этих интенсивностей $v_з < v_c$, $v_з = v_c$ и $v_з > v_c$ определяют неизбежное проявление структурно-топографической приспосабливаемости рабочей поверхности круга, стабилизацию оптимального развитого рельефа или нерациональный избыточный расход алмазов.

Задача управления поперечным профилем рабочей поверхности сводится к компенсации его отклонений, естественно возникающих в зоне резания под воздействием обрабатываемых СТПМ и условий шлифования. Компенсация достигается за счет дозирования разрушающего воздействия на связку тех участков рабочей поверхности, где эти отклонения превышают допустимые значения.

В связи с этим был выдвинут и реализован принцип раздельного независимого воздействия на отдельные участки поверхности.

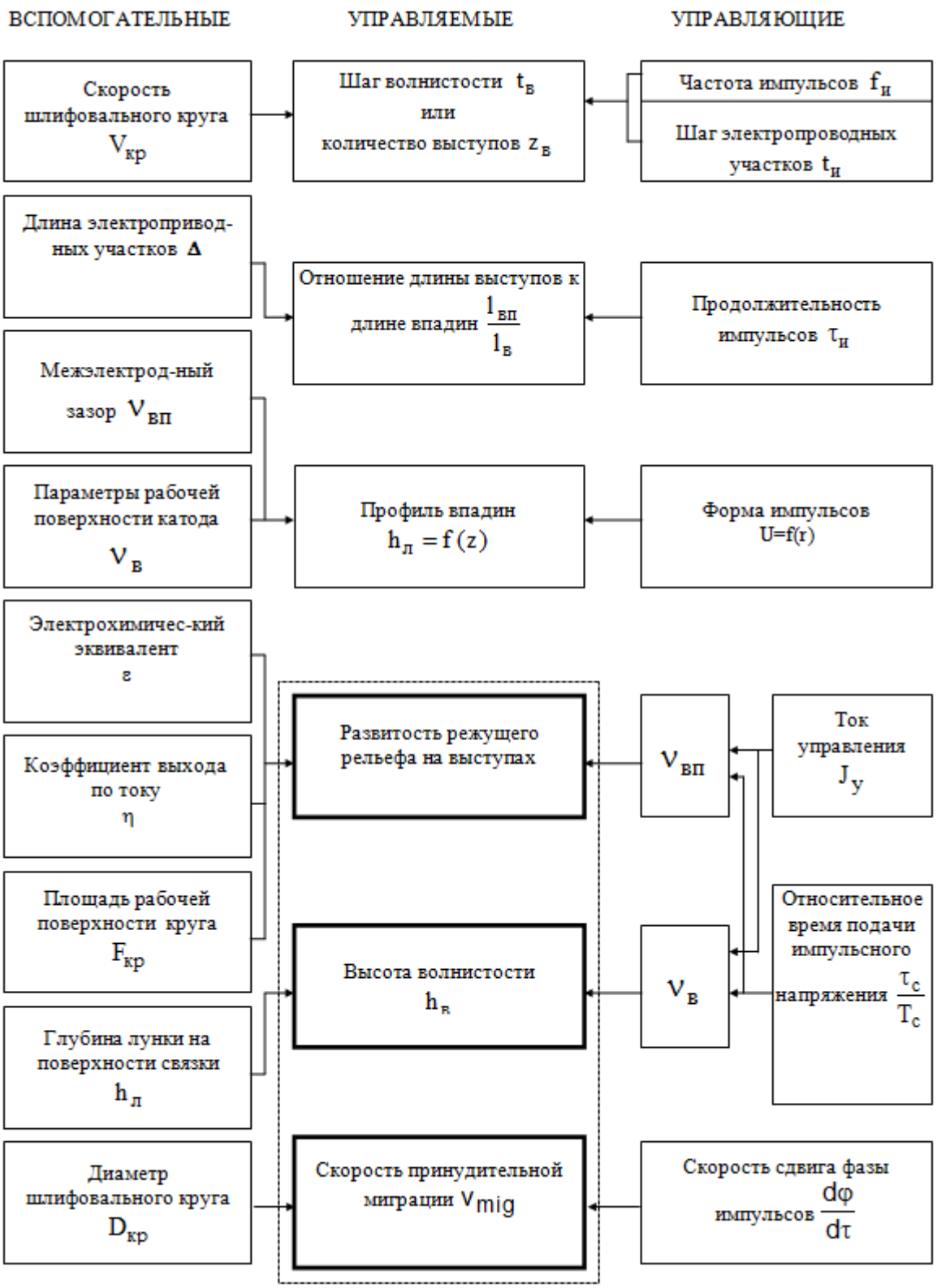


Рисунок 5.2 – Параметры управления продольным профилем РПК

Принцип реализован за счет разделения катода по ширине и длине на электрически изолированные области, при этом время прохождения тока через каждую из них независимо регулировалось (рис. 5.1).

Задача управления продольным профилем (устранением волнистости) решена на основе принципа воздействия на рабочую поверхность круга

электрическими импульсами, период и продолжительность действия которых строго синхронизированы с вращением шлифовального круга и с параметрами волнистости.

Предложена структурная схема управления рельефом и параметрами продольного профиля алмазных кругов при шлифовании СТПМ. Исходными являются данные, характеризующие диаметр, площадь рабочей поверхности и скорость круга, рабочую поверхность катода, межэлектродный зазор, электрохимический эквивалент и коэффициент выхода по току, глубину лунок.

Управляемыми параметрами являются характеристики волнистости, развитость режущего рельефа на выступах волн, скорость принудительной миграции волн вдоль продольного профиля. В качестве управляющих параметров предложено использовать: ток управления и характеристики его импульсов (частота, продолжительность, форма), относительное время подачи импульсов напряжения и скорость сдвига фазы импульсов (рис. 5.2).

Установление основных закономерностей формообразования рельефа для рабочей поверхности алмазных кругов, анализ структурных схем обработки СТПМ позволили предложить ряд схем процессов шлифования, реализующих принцип непрерывной оптимизации режущих свойств алмазных кругов путем комплексного управления режущим рельефом и профилем рабочей поверхности алмазных кругов на токопроводящих связках.

5.7. Закономерности алмазного шлифования СТПМ с управлением РПК и универсальность его принципов

Основным достоинством шлифования с управлением РПК является возможность только за счет силы тока в цепи управления в широком диапазоне изменять выходные показатели: производительность шлифования, относительный расход алмазов, шероховатость обработанной поверхности, температуру резания, удельную энергоемкость съема припуска, себестоимость обработки.

Подтверждено, что алмазное шлифование СТПМ является высокоэнергоемким процессом, превосходящим по этому показателю обработку алмазным шлифованием материалов обычной твердости.

Энергоемкость шлифования существенно снижается с увеличением тока в цепи управления, нормального давления, концентрации алмазов и с уменьшением скорости шлифования.

Для СТПМ с большей твердостью установлены высокие градиенты и максимальные средние температуры шлифования, которые растут также с увеличением скорости и поперечной подачи (нормального давления) до 1000÷1100°К. Стабилизация оптимального рельефа управлением снижает

уровень температур в 1,3÷1,6 раза. С повышением температуры в диапазоне 300÷700°К теплопроводность алмазных СТПМ (I и IV групп) снижается в 3÷3,5 раза, а нитридборных СТПМ (II – V групп) возрастает в 3,5 раза.

По уровню температуры шлифования СТПМ располагаются в ряд: СКМ, АСПК, АСП, ДПГ. Для поликристаллов II группы (на основе нитрида бора) сила резания, мощность и температура существенно ниже, чем для СТПМ I группы. В общем среднеинтегральная температура меньше, чем при шлифовании кругами на органических связках. Температурные поля свидетельствуют о высокой динамичности термических процессов шлифования СТПМ, больших градиентах в приповерхностных слоях.

Шероховатость обработанной поверхности непосредственно зависит от того, какие механизмы разрушения СТПМ реализуются в тех или иных условиях шлифования. Следовательно, состояние рабочей поверхности круга является определяющим для получаемой шероховатости обработанной поверхности. Если не предотвращать структурно-топографическую приспосабливаемость режущей поверхности, то шероховатость обработанной поверхности по критерию в первый период меняется в пределах 0,3÷0,15 мкм соответственно. Наибольшему значению нормального давления соответствовала наименьшая шероховатость. Поверхность сверхтвердых материалов на основе нитрида бора имеет меньшую шероховатость, чем у алмазов. Управляя рабочей поверхностью круга с различной интенсивностью, можно изменять шероховатость всех обрабатываемых СТПМ в пределах, определяемых структурой и свойствами поликристаллов. Снижению шероховатости способствует увеличение зернистости, скорости круга, концентрации алмазов. Рост нормального давления и тока цепи управления ухудшают шероховатость.

Связка алмазных кругов является главным объектом дозируемого избирательного разрушающего воздействия, обеспечивающего сохранение заданного профиля РПК, оптимальной высоты выступания зерен с учетом интенсивности их размерного износа, развитости их субмикрорельефа, стабилизацию физических явлений, протекающих в зоне взаимодействия круга и обрабатываемого СТПМ.

Принудительное удаление связки может осуществляться различными по природе способами - механическим, электрохимическим, электроэрозионным, комбинированным, однако исследования выявили преимущества электрохимического, которые проявляются в избирательности его воздействия (токопроводная связка), характеризуется широким диапазоном интенсивности, неповреждаемостью алмазных зерен, простотой реализации.

Установленные физические и технологические закономерности алмазного

шлифования СТПМ с комплексным управлением РПК и научно обоснованные рекомендации по эффективной обработке СТПМ позволяют определить уровни предельных значений температуры и давления в контакте круга с СТПМ, исключающие появление таких дефектов, как растрескивание, расслаивание, выкрашивание кромок и др.

5.8. Перспективы развития процесса шлифования с комплексным управлением РПК

Предложенные новые способы шлифования, базирующиеся на принципе комплексного управления рельефом, поперечным и продольным профилем рабочей поверхности круга, обладают значительным потенциалом расширения технологических возможностей алмазного шлифования.

Прежде всего, следует ожидать создания прецизионных и ультрапрецизионных способов обработки материалов.

Соединение положительных эффектов стабилизации оптимального рельефа и профиля РПК и высокой прочности удержания алмазов в связке позволяет расширить технологические возможности алмазного шлифования различных групп труднообрабатываемых материалов.

Вместе с тем совершенствование электрофизических методов позволяет прогнозировать расширение возможностей изготовления сложнопрофильного инструмента из токопроводных СТПМ. Нами получены положительные результаты профилирования изделий из СТПМ электроэррозионной обработкой с помощью подвижного проволочного электрода с использованием системы ЧПУ, а также с помощью предварительно спрофилированного графитового электрода. В сочетании с достоинствами лазерного разделения заготовок из СТПМ эти методы уже сегодня достаточно удачно дополняют технологические возможности алмазного шлифования с непрерывным управлением РПК. Можно полагать, что комплексный подход к решению проблемы обрабатываемости способен обеспечить значительный прогресс в создании и реализации наукоемких технологий, в обеспечении принципиально нового уровня функциональных свойств изделий из СТПМ, в значительном расширении областей их эффективного применения.

Принцип комплексного управления рельефом и профилем РПК в расширении технологических возможностей алмазного шлифования является универсальным, так как его реализация обеспечивает повышение эффективности обработки материалов, существенно различающихся по химическому составу, структуре, физико-механическим свойствам. При этом назначение и механизмы влияния управления на физическую природу явлений в зоне шлифования не одинаковы, например, для вязких и хрупких, мягких и

твердых материалов. Эти преимущества принципа управления РПК усиливаются при повышении прочности алмазоудержания связки. Поэтому способы шлифования с непрерывным комплексным управлением рельефом, продольным и поперечным РПК, разработанные применительно к обработке особой группы СТПМ, могут применяться при шлифовании широкой гаммы материалов — от меди и жаропрочных сталей до керамики и сверхтвердых материалов.

5.9. Вопросы для самостоятельного контроля

1. Дайте оценку проблемы обрабатываемости сверхтвердых материалов.
2. Классификация сверхтвердых материалов, их основные свойства.
3. Каково значение комплексности разработки проблемы обрабатываемости сверхтвердых материалов и расширения технологических возможностей алмазного шлифования?
4. Каковы физические предпосылки эффективной обработки СТПМ алмазным шлифованием?
5. Какова роль субмикрорельефа алмазных зерен в формировании локальных зон микроразрушения при высокоскоростном контактировании с СТПМ?
6. Каковы процессы, активируемые тепловыделением при шлифовании, способствующие съему обрабатываемого СТПМ и влияющие на состояние поверхности и поверхностного слоя?
7. Каковы причины аномально быстрого снижения режущих свойств и выходных показателей алмазного шлифования СТПМ (в традиционном исполнении)?
8. Связь между изменениями параметров рабочей поверхности круга, физических явлений и выходных показателей шлифования СТПМ
9. Связь характера и интенсивности износа алмазных зерен с высотой их выступания над связкой.
10. Сформулируйте общее условие эффективности алмазного шлифования СТПМ
11. В чем состоит сущность структурно-топографической приспосабливаемости РПК?
12. Какие способы предотвращения структурно-топографической приспосабливаемости?
13. Какова методология управления режущими свойствами кругов в процессе шлифования?
14. Каково значение комплексности управления профилем и рельефом рабочей поверхности алмазных кругов при изменяющихся условиях

шлифования?

15. Связка круга как главный объект управления рабочей поверхностью кругов в процессе шлифования.
16. Как обосновать принцип равенства интенсивности размерного износа зерен и интенсивности принудительного удаления связки?
17. Способы шлифования с непрерывным управлением рельефом, продольным и поперечным профилем рабочей поверхности алмазных кругов.
18. Каково значение структурных схем процессов шлифования с непрерывным управлением продольным и поперечным профилем РПК?
19. Какие физические особенности шлифования СТПМ с управлением РПК?
20. Сравните технологические показатели шлифования СТПМ с управлением РПК и без.
21. Каковы новые методические возможности исследования работоспособности кругов?
22. Докажите универсальность принципа комплексного управления РПК.
23. Каковы перспективы развития рабочего процесса шлифования с управлением РПК?

Лекция 6 ПРЕЦИЗИОННОЕ РЕЗАНИЕ ПОЛИМЕРОВ

1. Характеристика оптических полимеров и изделий.
2. Механика резания полимеров.
3. Устойчивость технологической системы при обработке полимерных оптических изделий.
4. Тепловые явления.
5. Износостойкость режущего инструмента.
6. Качество обработанной поверхности и эксплуатационные свойства оптических полимерных изделий.
7. Оптимизация процесса.
8. Вопросы для самостоятельного контроля.

В последнее десятилетие во многих странах больших объемов достигло производство синтетических материалов, среди которых особое место занимают оптические полимеры. Оптические полимеры находят широкое применение при создании детекторов для нового поколения ускорителей элементарных частиц, оптико-волоконной связи, диагностической медицинской аппаратуры, солнечных конверторов, радиационных дозиметров и др. Годовая потребность в изделиях полимерной оптики составляет тонны готовой продукции. Поэтому актуальным становится вопрос высокой производительности процессов, который для прецизионной обработки обычно не рассматривается.

6.1. Характеристика оптических полимеров и изделий

Наиболее широкое распространение среди оптических полимеров получили материалы на основе полистирола (ПС) и полиметилметакрилата (ПММА). Они получаются путем полимеризации соответствующих мономеров (в частности стирола) с добавкой люминесцирующих наполнителей. Очень важным является то, что начальные мономеры и наполнитель не должны содержать инородных включений, приводящих к потерям оптических свойств. Наличие органических люминофоров приводит к эффекту люминесценции, т.е. излучению под действием различного вида энергии. Оптические полимеры становятся излучающими под действием световых потоков, радиации, ускоренных элементарных частиц и т.п. Для прохождения возникшего свечения по оптическому полимерному изделию с минимальными потерями его поверхности необходимо придать параметры минимальной шероховатости (Ra 0,06 мкм), обеспечить бездефектность поверхностного слоя и в ряде случаев высокую точность. Для оптических полимеров чрезвычайно важными являются

оптические и люминесцирующие характеристики, прозрачность, светопоглощение, излучательная способность. Физико-механические свойства этих материалов приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1 – Основные физические характеристики оптических полимеров

Полимер	Плотность г/см^3	Напряжение разрушения МПа	Модуль упругости МПа	Твердость по Моосу	Коэффициент теплопроводности Вт	Термостойкость по Мартенсу °С
ПММА	1,18÷1,2	70÷80	290	2÷3	0,16÷0,18	87÷92
ПС	1,05÷1,1	40÷50	280	2	0,08÷0,12	70÷80

Самым распространенным методом формообразования оптических изделий является обработка резанием, потенциально способная обеспечить стабильно высокие световые характеристики при максимальных сроках эксплуатации, то есть получать изделия высокого качества, обладающие новым уровнем функциональных свойств.

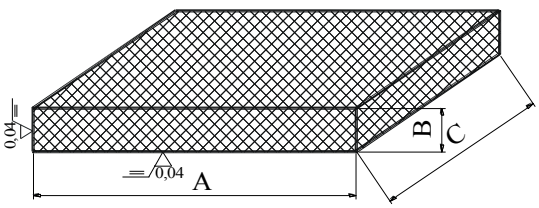
Сложность реализации этих процессов состоит в том, что полимерные оптические материалы весьма чувствительны к температурно-силовым деформациям (температура плавления около 80°С), воздействию окружающей среды, что требует создания нетрадиционных технологических процессов их обработки.

Анализ выпускаемой номенклатуры оптических изделий (рис. 6.1) указывает на значительные различия в требуемых рабочих технологических процессах.

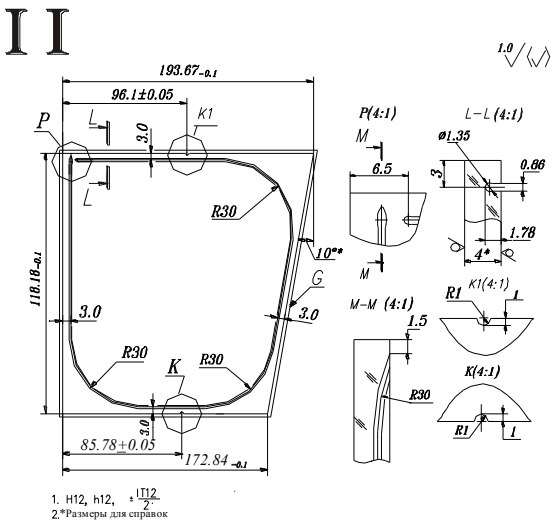
Первый тип изделий относится к классу крупногабаритных, что обуславливает применение крупных станков повышенной точности, специальных вакуумных приспособлений, при этом предъявляются чрезвычайно высокие требования к надежности и стабильности процессов обработки.

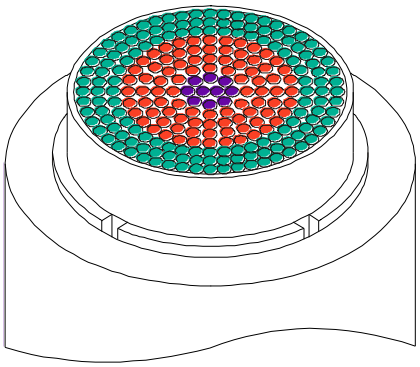
Для второго типа изделий (изделия типа «Tile») характерной особенностью конструкции является сложный петлеобразный внутренний контур под световод диаметром не более 1,1 мм, что требует применения прецизионных станков с ЧПУ, специальных прецизионных режущих инструментов и оснастки для крепления заготовки и инструмента.

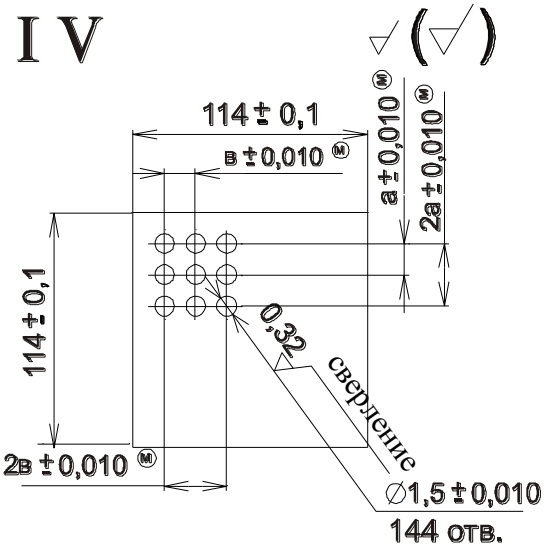
Широкое распространение в последнее время получили полимерные световоды (III). Высокое качество поверхностного слоя торцовых поверхностей световода должно обеспечиваться лезвийной обработкой.



NN	A мм	B мм	C мм
1	500	50	500
2	3000	20	300
3	1200	30	200
4	800	10	80







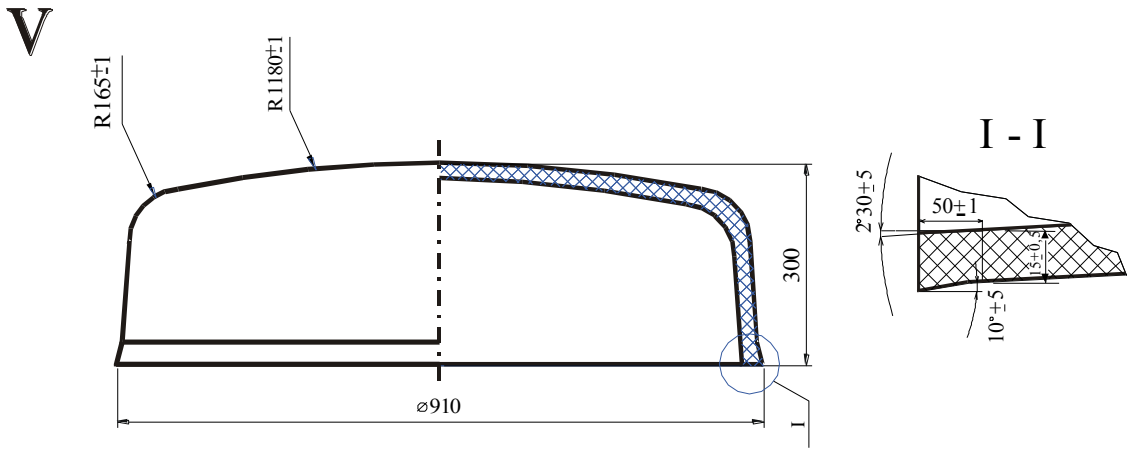


Рисунок 6.1 – Примеры изделий полимерной оптики

Особенностью конструкции деталей четвертого типа (изделия типа “Shashlic”) является получение большого количества отверстий требуемого качества с высокой точностью позиционного расположения, что, несомненно, диктует свои требования к технологии изготовления этих оптических изделий.

Изделия пятой группы, имеющие цилиндрические и сферические поверхности, изготавливаются на прецизионных станках с ЧПУ.

Таким образом, изготовление каждого из рассмотренных типов оптических изделий требует сугубо индивидуальных решений, структурной и параметрической оптимизации технологического процесса, что в сочетании с высокой прецизионностью и новым уровнем функциональных свойств дает возможность отнести их к высоким технологиям.

Основные операции при производстве оптических изделий — фрезерование, точение, сверление, полирование. На долю фрезерования приходится около 50 % времени механической обработки. Шлифование, даже алмазное, является наиболее неблагоприятным процессом обработки изделий из-за возможности возникновения высоких температур в зоне резания.

Для создания прецизионных рабочих процессов разрабатываются физические и математические модели, базирующиеся на механике микроразрушения полимеров, динамической устойчивости процессов резания, температурных закономерностях, механизме износа режущего инструмента, критериях оценки качества поверхностного слоя, новых подходах к вопросам оптимизации лезвийной обработки.

6.2. Механика резания полимеров

Механика резания полимеров является главенствующим звеном, определяющим деформационные и контактные процессы в зоне обработки, и, по существу, является ключом к новым технологическим решениям.

Изучение микромеханики резания методом механолюминесценции. В процессе внедрения режущего клина инструмента в полимерную заготовку происходит направленное разрушение материала в объеме снимаемого слоя, сутью которого являются разрывы химических связей полимера, приводящие к возникновению свободных радикалов с последующей их рекомбинацией, зарождению, росту и слиянию микротрещин в магистральные трещины, разделению объемов с образованием новых поверхностей.

Возникающая деформация полимерного материала при резании ведет к появлению люминесценции, которая характеризуется интенсивностью излучения фотонов.

Интенсивность механолюминесценции можно использовать в качестве меры процессов деформации и разрушения, происходящих при направленном воздействии режущего клина на полимер.

Метод механолюминесценции (фотоэмиссии) является сравнительно новым в исследованиях процесса микроразрушения полимерных материалов. Преимущества его при изучении микромеханики резания полимеров

заключаются в следующем:

– информация о процессе микроразрушения регистрируется аппаратурой практически безинерционно, что позволяет использовать этот способ непосредственно в процессе резания;

– первичный носитель информации о деформации полимерных материалов — поток фотонов - является собственно продуктом процесса микроразрушения материала.

Контактные процессы и стружкообразование. Исследования процесса деформации ПС и ПММА проводили при свободном резании на специальном стенде со скоростями до 1,0 м/мин. На обрабатываемую заготовку по торцовой поверхности наносили делительную сетку со стороной ячейки 0,05÷0,1 мм. Фиксировались искажения делительной сетки в процессе деформации. Приняты допущения, что прямоугольная делительная сетка деформируется пропорционально величине возникающих в материале деформаций, а напряженное состояние зоны деформации материала является плоским и находится в вязко-пластической области. В процессе обработки варьировали передним углом инструмента и глубиной резания *t*.

При внедрении режущего клина с положительным передним углом в полимерный материал зона у вершины инструмента подвергается значительным растягивающим деформациям; по мере удаления от вершины инструмента и поверхности заготовки уровень растягивающих деформаций снижается и приближается к уровню сжимающих. При значении уровень деформаций растяжения и сжатия примерно одинаков на всей длине контакта инструмента с заготовкой, но по своей величине значительно превышает уровень деформаций, полученных при положительных значениях переднего угла. При отрицательных значениях переднего угла растягивающие деформации распространяются ниже следа поверхности резания, нарушая исходный поверхностный слой оптической детали, что крайне нежелательно для обеспечения оптических характеристик изделия.

6.3. Устойчивость технологической системы при обработке полимерных оптических изделий

При обработке изделий полимерной оптики важнейшую роль играет динамическая устойчивость технологической системы, без которой невозможно обеспечить высокие характеристики их микро- и макрогеометрии. При фрезеровании основным источником возмущений динамической системы являются автоколебания и вынужденные колебания, возникающие в результате импульсного воздействия сил при врезании и выходе инструмента.

В основу рассматриваемой динамической модели технологической

системы и оценки ее устойчивости приняты положения, изложенные в работах М.Е. Эльясберга.

Расчетная схема процесса торцового фрезерования представлена на рис. 6.2 и показана в сечении главной секущей плоскости зуба инструмента.

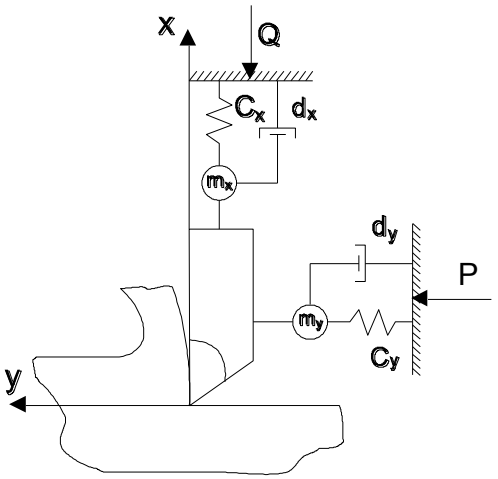


Рисунок 6.2 – Расчетная схема процесса торцового фрезерования.

Условные обозначения:

C_x – приведенная жесткость;

m_x – приведенная масса;

b_x – коэффициент демпфирования;

P – сила резания;

Q – сила трения/

Динамическое состояние технологической системы с обратными связями, имеющее две степени свободы, описывалось системой уравнений шестого порядка:

$$\begin{cases} T_{X2}^2 \ddot{x} + T_{X1} \dot{x} + x = \bar{Q}; \\ T_{y2}^2 \ddot{y} + T_{y1} \dot{y} + y = \bar{P}; \\ T_P \dot{\bar{P}} + \bar{P} = -k_X x - T_{Ky1} \dot{y}; \\ T_Q \dot{\bar{Q}} + \bar{Q} = \bar{P} - T_{Kx} \dot{x} - T_{Ky2} \dot{y}; \end{cases}$$

Система включает в себя собственно уравнения вынужденных колебаний под действием динамической силы резания (первое и второе уравнения), уравнения запаздывания (третье и четвертое уравнения), описывающие связь между изменениями перемещений инструмента (толщины среза) и запаздывающей по отношению к ним силой резания (автоколебания процесса резания).

При этом коэффициент возмущения определяется как функция углового положения фрезы при введении некоторой энергетически эквивалентной плотности непрерывного распределения зубьев фрезы, что существенно уменьшает погрешность расчетов при малом числе зубьев, характерном для прецизионного процесса обработки.

Анализ устойчивости технологической системы осуществлялся путем

решения линеаризованных уравнений, определяющих состояние динамической системы. Построен численный итерационный алгоритм определения значения глубины фрезерования, который при заданной подаче и скорости резания обеспечивает устойчивость технологического рабочего процесса, т. е. обработку с некоторой результирующей амплитудой колебания профиля поверхности детали, не превышающей некоторого наперед заданного значения микропрофиля оптической поверхности (в нашем случае Ra = 0,06 мкм).

Изменяя параметры технологической системы (массу, жесткость, демпфирование, режимы резания), можно прогнозировать зону динамической устойчивости системы, которая будет обеспечивать требуемые показатели колебания микро- и макрогеометрии поверхности оптических изделий.

6.4. Тепловые явления

Температура резания является одним из важнейших физических факторов обработки, так как от ее уровня зависит степень термической деструкции оптических полимерных изделий. Термическая деструкция, которая активно развивается при температурах свыше 80°С, играет отрицательную роль в формировании поверхностного слоя и функциональных свойств оптических изделий.

Температура при резании оптических полимеров определялась экспериментально с помощью жидкокристаллических термопленок с температурой плавления 28°С и 38°С, заполимеризованных в образец обрабатываемого материала. Базовым материалом в исследованиях был принят полистирол, так как он обладает более низкой теплостойкостью по сравнению с полиметилметакрилатом.

При высоких скоростях резания (свыше 1000 м/мин) вязко-упругая деформация переходит в хрупкое разрушение, что приводит к меньшему тепловыделению. Происходит локализация зоны разрушения, что приводит к уменьшению трения в контакте пары "обрабатываемый материал - режущий инструмент". Диапазон высоких скоростей может быть весьма предпочтительным при прецизионной обработки, но здесь решающим фактором становятся вибрационные явления технологической системы, что связано с ухудшением шероховатости обработанной поверхности.

Уровень предельных значений подачи выбран в пределах 0,005÷0,1 мм/зуб, соответствующих реальным условиям обработки полимерных оптических материалов. В интервале подач 0,03÷0,08 мм/зуб наблюдается снижение температуры в зоне резания, что связано с увеличением скорости движения теплового источника относительно обрабатываемой заготовки. Дальнейшее увеличение подачи и площади сечения срезаемого слоя приводит к

росту температуры резания.

Изучение влияние свойств инструментальных материалов на температуру показывает несомненное преимущество алмазного инструмента. Быстрорежущая сталь и твердый сплав приводят к росту температуры в зоне резания на 20÷45 %.

6.5. Износостойкость режущего инструмента

Радиус округления режущих кромок инструментов играет решающую роль в формировании поверхностного слоя полимерных оптических материалов. Минимально возможное его значение (1 мкм) обеспечивает получение оптически прозрачной поверхности изделия. Для прецизионной обработки оптической поверхности целесообразно применять природный монокристаллический алмаз, который имеет высокую теплопроводность и минимальный коэффициент трения. На чистовых операциях фрезерования монокристаллический алмаз практически не подвергается износу, не наблюдается увеличение радиуса округления кромок. Однако применение инструмента из природных монокристаллических алмазов на всех операциях обработки полимерной оптики экономически малоэффективно. Это обусловлено как его высокой стоимостью, так и разбросом показателей долговечности.

При обработке полимерных композитов инструментами обычной и сверхвысокой твердости отсутствует период катастрофического изнашивания, так как ему всегда предшествует недопустимое ухудшение качества обработанной поверхности изделия. В этих случаях используют критерий технологического износа. Инструмент считается затупившимся, когда линейный износ задней поверхности достигает значения, равного технологическому износу, которому соответствует технологический признак — ухудшение качества обработанной поверхности.

Адгезионное и водородное изнашивание режущего инструмента изучали с помощью инфракрасной спектроскопии деструктированного слоя полимера. В результате деструкции происходит образование водорода, который вызывает водородное изнашивание быстрорежущего инструмента. Очевидно, что механизм водородного изнашивания может иметь заметное влияние лишь при обработке оптических полимерных материалов быстрорежущим инструментом.

6.6. Качество обработанной поверхности и эксплуатационные свойства оптических полимерных изделий

Качество обработки изделий полимерной оптики оценивается комплексом параметров, характеризующих микронеровность и состояние

материала поверхностного слоя. Общее количество микро- и макроповреждений в значительной мере влияет на эксплуатационные характеристики готового изделия. Поэтому возникает необходимость разработки таких критериев оценки качества поверхности, которые связывали бы механические и оптические величины, как на этапе механической обработки, так и в процессе эксплуатации.

Для оптических изделий разработан критерий достаточной шероховатости ($KR_z = R_z < \lambda \times 10^3$), который связывает численным соотношением параметр шероховатости и длину оптической волны (λ, НМ) пропускаемого через детектор светового пучка. Параметр достаточной шероховатости должен быть обеспечен на этапе лезвийной обработки, а величина шероховатости по параметру R_a должна находиться в пределах значений, не превышающих 0,06÷0,05 мкм.

Влияние условий обработки на шероховатость поверхности. Особенности формирования микронеровностей поверхности определяются комплексом технологических факторов и физико-химическим взаимодействием обрабатываемого и инструментального материала. В результате оценки оптимальным инструментальным материалом признан природный монокристалл алмаза, который превосходит синтетический алмаз марки СКМ-Р, сверхтвердые нитриды бора Эльбор-Р и Гексанит-Р.

Эксплуатационные свойства оптических полимерных изделий. Под эксплуатационными свойствами оптических полимерных изделий понимают стабильно высокие световые (функциональные) характеристики при максимально возможных сроках их работоспособности.

Функциональные характеристики оптических изделий зависят от состава и свойств полимерной композиции, от условий и особенностей процесса механической обработки оптических поверхностей. К исходным свойствам оптических полимеров можно отнести их химическое строение, молекулярную массу и состав функциональных добавок. В процессе эксплуатации готового изделия под воздействием атмосферно-климатических факторов и физических воздействий происходит старение полимера с изменением его свойств. Скорость старения, изменение эксплуатационных характеристик оптического полимера во времени инициируется условиями механического воздействия на обрабатываемый материал в процессе заготовительных операций и операций механической обработки. Важнейшими показателями качества оптических полимеров являются их прозрачность в видимой области спектра (величина светового выхода) и высокая излучательная способность (люминесценция), а также долговечность, способность готовых изделий сохранять уровень этих

характеристик в течение длительного срока эксплуатации.

6.7. Оптимизация процесса

Прецизионная обработка, прежде всего, отличается от традиционных методов минимальными толщинами срезов, высокими требованиями к шероховатости получаемой поверхности, точности изделия, качеству поверхностного слоя. Как и любой процесс резания, прецизионную обработку необходимо оптимизировать. Процедура определения оптимума аналогична традиционной. Однако ограничения, накладываемые на метод обработки, имеют свои особенности. Так, ограничение по работоспособности инструмента не накладывается, так как его износ при обработке полимера отсутствует. Отсутствует ограничение по мощности электродвигателя привода главного движения станка, так как мощность, затрачиваемая на прецизионное резание, не превышает 1 кВт. Вследствие того, что площадь среза минимальна и минимальна сила резания, ограничение нагрузки на механизм подач станка отсутствует. Ограничения по жесткости и прочности режущего инструмента в прецизионном процессе при обработке изделия мелкоразмерным инструментом играет важную роль, но их выбор зависит от особенностей реализуемой технологии.

В качестве критерия оптимизации целесообразно использовать технологический фактор — максимальный съем материала. Режимы, подлежащие оптимизации, — скорость, подача и глубина резания. Это можно описать математически: $Q = f(V_{opt}, S_{opt}, t_{opt}) \rightarrow \max$, где Q – максимальный съем материала, м^3/мин.

На модель накладываются следующие ограничения:

• Ограничение по динамической устойчивости технологической системы. Основное условие устойчивости технологической системы состоит в том, что суммарный вектор колебания системы не должен превышать вектора амплитуды предельного значения шероховатости поверхности;

• Ограничение по максимально допустимой глубине резания определяется экспериментально, исходя из требований к микро- и макропрофилю оптической поверхности;

• Ограничение по термодеструкции полимера накладывается в виде функции, которая получается экспериментально и учитывает возможно предельную температуру (°С) на поверхности полимера, не допускающую деструкцию материала.

Обычно ограничения описываются нелинейными функциями параметров режима. Чаще всего такие функции изображаются в плоской системе координат, где осями являются скорость и подача. Целесообразно использовать

в качестве координат оптимизации скорость V и глубину резания t. Если ограничения совместимы, то они образуют область, не противоречащую всем ограничениям, которую называют допустимой областью. Ограничения, участвующие в формировании границ этой области, называют активными.

Решение данной задачи осуществляется при помощи специально разработанной программы, реализованной на ЭВМ.

6.8. Вопросы для самостоятельного контроля

1. Дайте характеристику оптическим полимерным изделиям и укажите области их применения.
2. Покажите основные типы оптических полимерных изделий и особенности их формообразования.
3. Дайте описание стенда для изучения микромеханики процесса резания оптических полимеров.
4. Каковы основные закономерности микромеханики процесса лезвийной обработки оптических полимеров?
5. Каковы особенности контактных процессов взаимодействия режущего инструмента и оптических полимеров?
6. Формы стружек при резании оптических полимеров.
7. Как производится оценка устойчивости прецизионной технологической системы?
8. Экспериментальная методика изучения температуры резания.
9. Методика теоретического расчета температуры в зоне резания.
10. Какие основные температурные закономерности при лезвийной обработке оптических полимеров?
11. В чем состоит механизм износа режущего инструмента при обработке оптических полимеров?
12. Дайте определение критерия достаточной шероховатости.
13. Объясните влияние инструментального материала на шероховатость обработанной поверхности оптических полимеров.
14. Объясните влияние режимов резания на шероховатость обработанной поверхности оптических полимеров.
15. Объясните влияние различных параметров обработки на эксплуатационные характеристики оптических изделий.
16. Какова методология оптимизации режимов резания при прецизионной обработке оптических полимерных изделий?

Лекция 7 РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ, БАЗИРУЮЩИЕСЯ НА ВЫСОКОСКОРОСТНОМ РЕЗАНИИ

1. Понятие о высокоскоростном резании.
2. Физические особенности высокоскоростного резания.
3. Износ инструмента.
4. Применение СОТС и сухое высокоскоростное резание.
5. Характеристика выходных показателей.
6. Вопросы для самостоятельного контроля.

7.1. Понятие о высокоскоростном резании

Скорость резания при механической обработке материалов является одним из важнейших факторов, всесторонне влияющих на протекание процесса и его выходные показатели. Стремление достичь по возможности наивысшей скорости обработки объективно диктуется необходимостью снижения машинного времени. В сочетании с возможностями интегрированного процесса ускоренного формообразования это открывает новые возможности в быстром создании конкурентоспособного продукта.

Хронология важнейших этапов кардинального повышения скорости резания неразрывно связана с созданием все новых марок инструментальных материалов — от углеродистых сталей до сверхтвердых материалов на основе алмаза и плотных модификаций нитридов бора. Однако, сегодня применение процессов высокоскоростного резания как важнейших составляющих высоких технологий имеет смысл лишь в том случае, когда вся технологическая система - станок, инструментальная система, приспособления, система диагностики, компьютерная технологическая среда — ориентирована на реализацию преимуществ высокоскоростной обработки.

Разработки высокоскоростных процессов резания в XX столетии интенсивно велись в Австралии, Германии, России, Украине, Франции, США, Японии и др. странах. Экзотическими можно назвать исследования «баллистического» резания, в условиях которого достигались сверхвысокие скорости (Австралия, Германия, СССР, Япония). Реальные возможности реализации высокоскоростного резания в производстве появились с созданием высокооборотных шпинделей главного движения на магнитных подшипниках (частота вращения n = 18000, 30000, 100000 об/мин) и других элементов станков.

В настоящее время понятие высокоскоростное резание применительно к различным видам обработки, группам обрабатываемых и соответственно инструментальных материалов относится к различным по уровню

количественным скоростным диапазонам.

При фрезеровании алюминия скоростные диапазоны соответствуют видам обработки:

• традиционной V_c = 500 м/мин;

• высокопроизводительной V_c = 500÷2500 м/мин;

• высокоскоростной V_c = 2500÷7500 м/мин;

• сверхвысокоскоростной V_c 7500 м/мин.

В табл. 7.1 приведены примеры высокоскоростного резания, относящиеся к другим материалам.

Таблица 7.1 – Характеристики высокоскоростного резания

Обрабатываемый материал	Инструментальный материал	Процесс	Скорость резания, м/мин.	Скорость движения подачи, м/мин
Сплавы Al, Mg, волокнистые материалы	Твердые сплавы, алмазы	Фрезерование	1000÷7000	5÷15
Жаропрочные стали, графит, медь	Твердые сплавы, керамика, КНБ	Фрезерование	350÷2000	1÷6
Волокнистые материалы, легкие сплавы	Безвольфрамовые твердые сплавы	Сверление	100÷300	10
Закаленные стали, стальное и чугунное литье	КНБ	Шлифование	80÷160 м/с	10

Таким образом, закономерности высокоскоростного резания одной группы материалов, например, эффективной высокоскоростной обработки алюминия или неметаллических материалов, невозможно применить при резании сталей, чугуна, жаропрочных, коррозионностойких и других труднообрабатываемых материалов.

Из изложенного следует, что понятие высокоскоростное резание есть объектоориентированное, отражающее жесткую связь значений скоростного диапазона со свойствами обрабатываемого и инструментального материала, технологической средой и видом обработки.

7.2. Физические особенности высокоскоростного резания

Высокая скорость перемещения режущего клина в обрабатываемом

материале порождает ряд специфических явлений в зоне резания, процессе стружкообразования, формировании поверхностного слоя и поверхности.

К принципиальным особенностям процесса необходимо отнести существенное уменьшение длительности (времени) контакта стружки с передней поверхностью режущего клина, снижение характеристик трения, сил резания и, как следствие, меньшая деформация материала поверхностного слоя изделия. Уменьшение времени контакта стружки с передней поверхностью инструмента и снижение трения уменьшают усадку стружки и степень деформации в зоне сдвига. Уменьшаются объем пластически деформируемого материала, количество выделяющегося тепла и резко возрастает его доля, уходящая в стружку. В итоге создаются условия, в которых формируется высококачественный поверхностный слой изделия.

В то же время некоторые явления в процессе стружкообразования, возникающие в условиях высокоскоростного резания, приводят к повышению интенсивности износа инструмента. Прежде всего, речь идет о повышении контактной температуры, стимулирующей усиление физико-химических процессов. В свою очередь рост контактной температуры связан с повышением скорости относительного перемещения стружки и инструмента, сокращению поверхности их контакта, высокой скорости деформации.

Широкие возможности высокоскоростного шлифования подтверждаются рядом примеров увеличения скорости съема металла в пять – десять раз при сохранении требуемых параметров точности и качества обработки. Такие результаты объясняются увеличением в единицу времени количества абразивных зерен, участвующих в работе шлифования, а также более благоприятными условиями процесса образования стружки.

Увеличение скорости резания может существенно повлиять на процесс шлифования, так как, с одной стороны, интенсифицируется процесс снятия стружек, а с другой стороны, возможны изменения условий работы каждой режущей кромки, вызванные увеличением скорости скольжения и деформирования металла и уменьшением длительности контакта режущей кромки с обрабатываемой поверхностью.

Работа каждого абразивного зерна (режущей кромки), участвующего в процессе шлифования, затрачивается на упругопластическое деформирование и диспергирование металла, на трение между зерном и металлом и на

преодоление сил инерции при образовании стружки. В соответствии с современными представлениями механизм образования стружки при шлифовании принципиально не отличается от стружкообразования при резании лезвийным инструментом, но имеет свои особенности, обусловленные большими скоростями деформирования, отрицательными передними углами режущих кромок, малыми толщинами срезов и малой длительностью контакта вершины режущей кромки с обрабатываемой поверхностью.

Чем выше скорость резания, тем тоньше становится зона сдвига и более четко разделены элементы стружки, хотя внешне стружка может оставаться устойчивой и похожей на сливную. Высокая температура, развивающаяся при скольжении одного элемента стружки относительно другого, может вызвать частичное или полное расплавление тончайшей пленки металла, существенно уменьшая при этом работу «внутреннего трения». При таком механизме образования стружки деформация также локализуется в узкой зоне сдвига (иногда микрометра), а середина элементов стружки и окружающий металл мало деформируются.

Увеличение скорости резания приводит к незначительному увеличению удельной работы шлифования, а увеличение скорости съема металла – к ее снижению до некоторого предела, который может быть определен предельными значениями толщин срезов, снимаемых каждой режущей кромкой круга.

С увеличением скорости резания тепло локализуется в узкой зоне перед режущей кромкой, создавая благоприятные условия для адиабатического сдвига. Значительная часть образующегося тепла идет на нагрев поверхностного слоя детали, оказывая большое влияние на качество шлифованной поверхности. Изменение свойств поверхностного слоя детали определяет температура нагрева поверхности, время воздействия теплового источника и условия охлаждения. Все эти факторы существенно изменяются с увеличением скорости резания.

Можно рекомендовать для операций круглого наружного шлифования различных сталей рациональное отношение скоростей, равное. При работе со скоростями, превышающими 50 м/с, это отношение является достаточным для уменьшения теплового воздействия на поверхность детали.

7.3. Износ инструмента

Природа износа инструмента и влияние на него условий традиционного резания изучены всесторонне и обстоятельно.

С изменением скорости резания происходит трансформация механизмов износа, изменение соотношения их роли в суммарном размерном износе инструмента, формах его проявления.

На рис. 7.1 представлены графики влияния скорости на интенсивность и природу износа. Действительная картина его весьма сложная, поэтому графики следует рассматривать как обобщенные, отражающие лишь главные тенденции, связанные с действием температурного фактора.

На скоростной (температурной) оси принципиальной границей является та, что отделяет традиционное резание от высокоскоростного. Внутри первого диапазона выделяется область наростообразования.

В диапазоне значения скоростей резания, которые относят к высоким, резко интенсифицируется термоактивируемые процессы износа — диффузионный, окислительный, фазовых переходов. Следовательно, регулирование скоростного резания должно быть направлено на «погашение», снижение интенсивности этих термоактивируемых процессов путем снижения тепловыделения и эффективного отвода тепла из зоны резания.

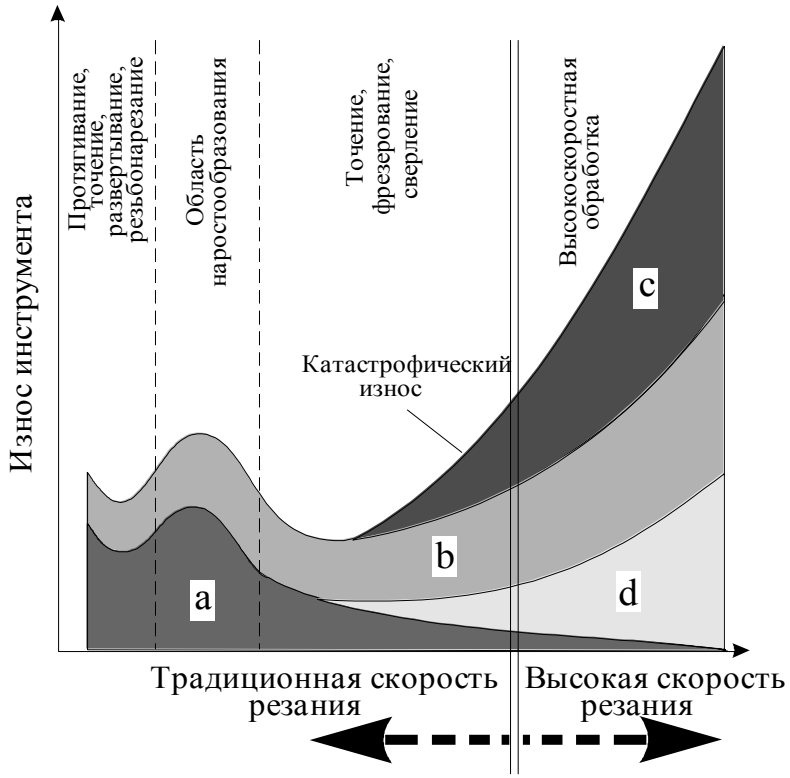


Рисунок 7.1 – Виды износа в зависимости от скорости (температуры) резания: a – адгезионный износ с преобладающим наростообразованием; b – абразивный износ; c – диффузионный износ; d – окислительный износ

7.4. Применение СОТС и сухое высокоскоростное резание

С увеличением скорости резания увеличивается работа внешнего трения и соответственно количество тепла в зоне контакта круга с деталью, в то же время при высокоскоростном резании, особенно при шлифовании, увеличивается интенсивность центробежных и вихревых воздушных потоков, препятствующих проникновению СОТС в зону обработки. В результате, например, процесс шлифования идет почти всухую, при высоких контактных температурах, что приводит к образованию прижогов на обработанной поверхности, большему износу круга за счет «тепловых ударов» и других отрицательных явлениях. В связи с этим роль СОТС при высокоскоростном шлифовании значительно больше, чем при работе с обычными скоростями резания. Задача повышения эффективности действия СОТС решается по двум направлениям: разработка способов подачи СОТС непосредственно в зону шлифования и рациональных составов СОТС для активизации их полезного физико-химического воздействия на процесс шлифования.

Существует много различных методов подачи СОТС в зону обработки при высокоскоростном шлифовании. Наиболее простым и дешевым средством подачи СОТС при шлифовании на повышенных скоростях резания являются конструкции сопел, позволяющие отсекать воздушный поток вокруг круга и направлять струю жидкости в зону контакта круга с деталью.

Одно из направлений решения этой задачи состоит в обеспечении поступления в зону резания достаточного количества смазочно-охлаждающих сред, например, через поры шлифовального круга. Смазывающе-охлаждающее вещество через приемные камеры, а потом через передающие каналы подводится к подслою пористой керамической связки и затем под действием центробежных сил через поры алмазоносного слоя поступает прямо в зону контакта рабочей поверхности круга и обрабатываемого материала.

При другом подходе поры круга используются как своеобразные накопители различных веществ, выступающих в роли твердых смазок. Процесс импрегнирования (пропитки) пористых абразивных кругов осуществляется, например, в вакуумных камерах, где жидкие СОТС заполняют поры по всему объему шлифовального круга. После удаления воды в процессе сушки твердые вещества остаются в порах круга. В процессе шлифования эти вещества оказываются непосредственно в зоне контакта рабочей поверхности круга и обрабатываемого материала, успешно выполняя роль СОТС. Подобный эффект достигается при наружном натирании рабочей поверхности круга непрерывно контактирующими с нею карандашами твердых смазок (воск, парафин и др.).

7.5. Характеристика выходных показателей

Высокоскоростное резание следует рассматривать, главным образом, как средство повышения производительности обработки. Производительность операции определяется количеством деталей, обработанных в единицу времени на данном станке или штучным (штучно-калькуляционным) временем на обработку. В соответствии со структурой штучного времени, т.е. времени обработки детали на данной операции, производительность зависит от основного времени, необходимого для снятия припуска с заготовки, вспомогательного времени на установку, снятие детали, ее измерение и управление станком, а также времени обслуживания, основную часть которого занимает процесс периодической переточки лезвийного инструмента или правки шлифовального круга. Увеличение скорости резания позволяет одновременно увеличить подачи (скорость съема металла) и тем самым уменьшить основное время обработки. При этом возможно изменение периода стойкости круга и соответственно времени обслуживания, затрачиваемого на его правку.

Влияние скорости резания на скорость съема обрабатываемого материала связано с проявлением трех эффектов — кинематического, скоростного, статистического (на примере шлифования).

1. Кинематический эффект. Его смысл заключается в том, что изменение скорости резания приводит к пропорциональному изменению числа режущих кромок, проходящих зону шлифования в единицу времени. Этот эффект до последнего времени считали основным (а во многих случаях единственным) обоснованием возможности увеличения скорости съема металла при высокоскоростном шлифовании. Такая позиция приводила к тому, что увеличение скорости резания всегда дает возможность пропорционального увеличения съема металла. В действительности же следует учитывать и другие эффекты, появляющиеся с изменением скорости резания.

2. Скоростной эффект. Заключается он в изменении сопротивления металла пластическому деформированию, резанию и трению. Физическая сущность этого явления была изложена выше. Здесь же следует только отметить, что изменение скорости резания приводит к изменению силы, действующей на каждую режущую кромку при одном сечении среза, и предельного сечения среза, выдерживаемого вершиной абразивного зерна. В зависимости от обрабатываемого материала этот эффект может быть различным не только в количественном, но и в качественном отношении. В случае уменьшения сопротивления резанию с увеличением скорости этот эффект является дополнительным резервом увеличения скорости съема металла, и тогда он суммируется с предыдущим эффектом.

3. Статистический эффект. Обусловлен этот эффект случайным характером расположения режущих кромок на рабочей поверхности круга и специфической формой среза. Его появление также связано с изменением скорости резания: увеличение скорости при шлифовании сталей и сплавов приводит к уменьшению критического значения отношения , характеризующего момент начала резания. Следовательно, увеличивается процент режущих кромок, снимающих стружку, т. е. выполняющих полезную работу шлифования. Кроме того, уменьшается длина пути скольжения и пластического оттеснения металла для тех режущих кромок, которые снимают стружку. При наличии этого эффекта появляется еще одна возможность увеличения скорости съема металла, дополняющая первые два эффекта.

С увеличением скорости наблюдается положительное влияние всех трех эффектов: кинематического — в большей степени, а скоростного и статистического - в меньшей. При этом, влияние скоростного и статистического эффектов в разных диапазонах скоростей резания неодинаково: оба эффекта регрессивно зависят от скорости - при больших скоростях резания их влияние на удельный съем металла ослабевает. Очевидно, что при скоростях резания свыше 160 м/с уже начинает сказываться негативное действие инерционных сил стружки при стружкообразовании, не успевает прогреваться зона сдвига, интенсивность пластической деформации металла стабилизируется (отношение и коэффициент выдавливания мало зависят от скорости). В итоге влияние скорости резания на удельный съем металла выражается почти только кинематическим эффектом, а скоростной и статистический эффекты становятся незначительными.

Значительное уменьшение силы резания при высокоскоростном шлифовании эльборовыми кругами, зафиксированное в различных работах, является предпосылкой для увеличения скорости съема металла без существенного увеличения удельного расхода эльбора и сохранения хорошего качества обработанных поверхностей. При этом следует отметить большую чувствительность эльборовых кругов к радиальным колебаниям в зоне шлифования: увеличение интенсивности колебаний приводит к значительному увеличению их удельного расхода.

Качество поверхности при высокоскоростном резании имеет ряд достоинств. Как лезвийная, так и абразивная высокоскоростная обработка в состоянии конкурировать с такими чистовыми процессами, как ручная и лучевая полировка.

В общем случае, диапазон рациональных скоростей резания при шлифовании может находиться в пределах от нескольких метров до нескольких сотен метров в секунду. В любом случае надо учитывать не только

достоинства, но и ограничения, вызванные требованиями к качеству обработки, станку и инструменту.

7.6. Вопросы для самостоятельного контроля

1. Каково значение высокоскоростного резания?
2. Как создание новых марок инструментальных материалов влияло на диапазон применяемых скоростей резания?
3. Дайте характеристику диапазонов высоких скоростей резания различных групп обрабатываемых материалов.
4. Каковы диапазоны скоростей при фрезеровании традиционном, высокоскоростном и сверхвысокоскоростном?
5. Дайте определение скоростного резания.
6. Каковы основные физические особенности высокоскоростного резания, определяющие положительный эффект?
7. Каковы основные физические особенности высокоскоростного резания, негативно влияющие на процесс?
8. Почему отношение зависит от скорости резания?
9. Какова роль тепловыделения и температуры при высокоскоростном шлифовании?
10. Оцените влияние скорости резания на тепловыделение и температуру шлифования.
11. Каковы особенности применения жидких и твердых СОТС при шлифовании?
12. Какова роль кинематического, скоростного и статистического эффектов при высокоскоростном шлифовании?
13. Сравните характеристики глубинного, обычного и высокоскоростного шлифования.
14. Охарактеризуйте достоинства применения кругов из КНБ (CBN).

Лекция 8 ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ

1. Диагностические системы технологических процессов.
2. Диагностика процессов лезвийной и абразивной обработки.
3. Диагностические системы контроля прецизионных процессов.
4. Вопросы для самостоятельного контроля.

Одним из основных элементов прецизионного производства является диагностика технологического процесса, благодаря которой появляется изделие с гарантируемыми требуемыми высокими свойствами.

8.1. Диагностические системы технологических процессов

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, далее как обрабатывать результаты этих операций.

Контроль за состоянием технологической системы осуществляется с помощью сенсоров (датчиков). Сенсор является связующим звеном между процессом механической обработки и анализатором полученного сигнала. В настоящее время существуют различные разновидности сенсоров: пьезоэлектрические, термоэлектрические, электрические, лазерные, акустические, микромеханические, радиационные и др.

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 систем.

Первая группа задач предусматривает детальное изучение свойств процессов и включает в себя следующее: изучение нормального функционирования технологического процесса; выделение возможных состояний процесса, т. е. возможных комбинаций отказов; анализ технических возможностей контроля состояния процесса; сбор и обработку статистических данных о распределении вероятностей возможных состояний процесса, а также закономерностей проявления отказов отдельных его операций; выбор форм представления 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, избыточной 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 контролем 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 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 заготовки).

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 механообработки 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 могут 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.

С внедрением гибких автоматизированных производств возникает необходимость быстрого и эффективного решения задач автоматизации

контроля на всех стадиях технологического процесса, автоматизации контроля инструмента и обрабатываемых заготовок. В ходе технологического цикла обработки заготовка подвергается предварительному, текущему и выходному контролю.

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

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 технической диагностики в условиях комплексной автоматизации производства и получения высоких параметров изделия. На данном этапе проводятся комплексные динамические

испытания технологических процессов, включающие испытания на надежность и обработку 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.

8.2. Диагностика процессов лезвийной и абразивной обработки

Рассмотрим в качестве примера диагностические системы для процесса точения (лезвийная обработка) и шлифования (абразивная обработка).

На рис. 8.1 представлена диагностическая схема процесса обработки заготовки на токарном станке. Резец 3 подводится в исходное положение, где расположен оптический сенсор 7'. Определяется погрешность установки резца (вылет вершины с учетом износа на предыдущей обработке или начальная установка). Затем вносятся коррективы для определения траектории движения резца с целью получения заданного размера. Подача и частота вращения шпинделя определяется исходя из параметров стойкости и получаемой точности заготовки. Эти параметры могут быть откорректированы в ходе процесса на основании получаемой информации.

В ходе процесса лезвийной обработки сенсор 7 отвечает за показатели качества поверхности заготовки и износ инструмента. При этом сигнал на обе поверхности может посылаться либо одновременно, путем разделения его кубической призмой, либо поочередно.

Сенсоры 7 и 7' могут быть объедены. В этом случае сенсор обязательно устанавливается на несменной части суппорта.

Сигналы датчиков 7 и 7' обрабатываются в оптической диагностической системе, где раскладываются на составляющие, необходимые для анализа износа в процессе резания, и в статическом состоянии поверхности детали. Далее информация поступает для анализа в ЭВМ.

В процессе обработки функционируют также два сенсора акустической эмиссии 9 и 10. Сенсор 10 установлен на державке резца, сенсор 9 - на валу шпинделя. Предназначены они для контроля состояния режущей кромки (точнее, состояния точки контакта), а также осуществляют конт

роль за изменением свойств заготовки, и вследствие этого они отвечают за изменение режимов резания. Они также осуществляют предупреждение о возможной поломке инструмента. Частота считывания в среднем составляет 0,2÷0,3 секунды. Несущая частота сенсоров должна быть различна. Информация поступает в вибрационную диагностическую систему.

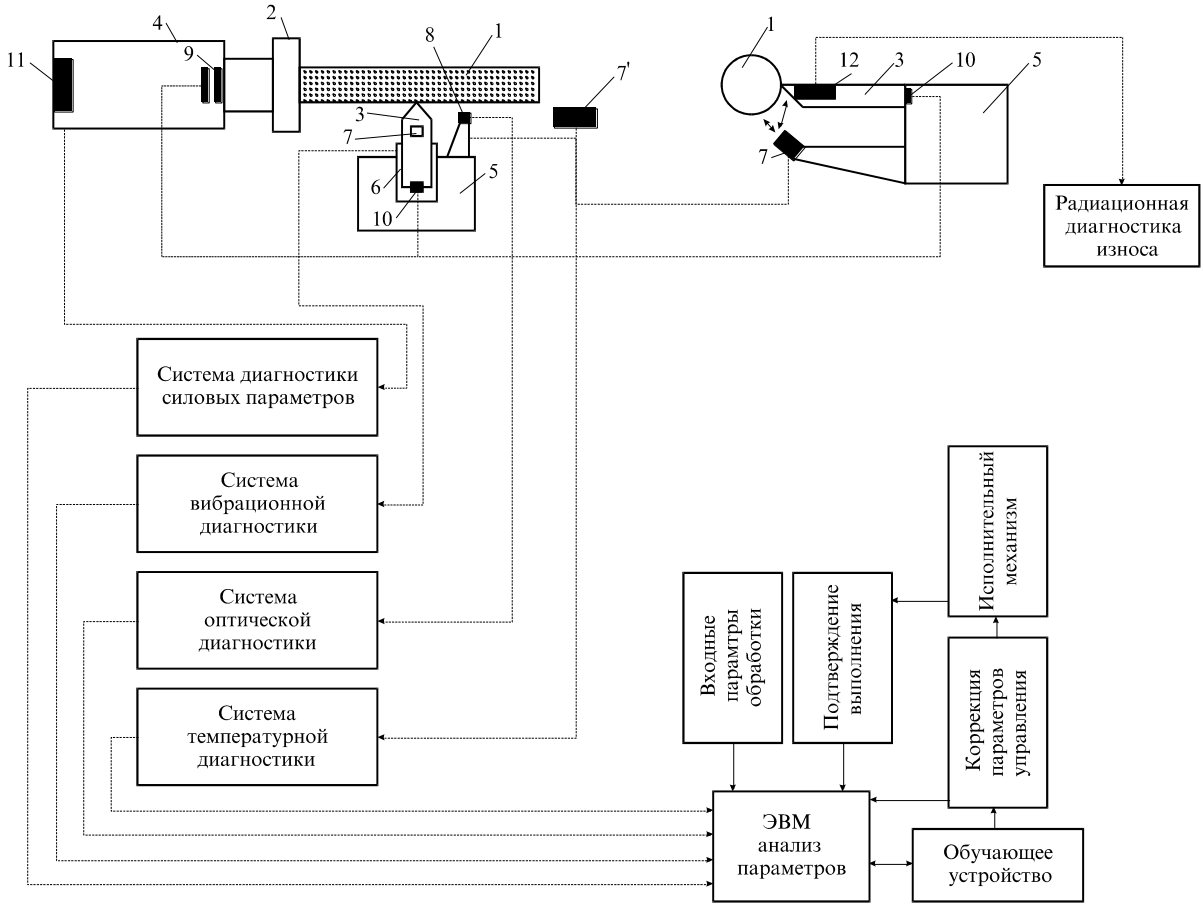


Рисунок 8.1 – Схема диагностики процесса точения

1	- заготовка;	7	- оптический сенсор (диагностика качества детали, контроль износа резца);
2	- шпиндель;	7'	- оптический сенсор (контроль износа резца);
3	- резец;	8	- фотометрический датчик;
4	- привод шпинделя;	9	- акустический сенсор (бесконтактный);
5	- резцедержатель;	10	- акустический сенсор (контактный);
6	- динамометр;	11	- токовый сенсор;
		12	- радиационный элемент

В приводе шпинделя установлен токовый сенсор 11, являющийся датчиком мощности. Его работа основана на изменении мощности на валу двигателя из-за изменения условий обработки. Этот сенсор хотя и не является достаточно надежным, но представляет собой хорошее дополнение диагностики процесса резания. На суппорте установлен также динамометр 6, с помощью которого определяются составляющие силы резания, действующие на резец в процессе обработки. Сигнал от такого сенсора и от динамометра передается в систему усилий резания.

В лабораторных условиях в систему диагностики может дополнительно инсталлироваться радиационная система диагностики износа. При этом резец

предварительно подвергается облучению.

В ЭВМ идет сравнение сигналов, и проводятся, в случае необходимости, корректировки параметров или аварийное отключение. Далее эти параметры передаются на исполнительные механизмы с обязательным подтверждением о выполнении. При использовании элементов микромеханики первичный анализ и обработка сигналов происходит непосредственно в сенсорах, что значительно повышает скорость обработки сигналов и, тем самым, скорость реакции системы на изменение в ходе обработки, что увеличивает надежность диагностики.

Все ситуации, возникающие в ходе процесса, заносятся в память обучающего устройства в виде «матрицы решений», и в случае повторного появления идентичной ситуации реакция на нее исходит непосредственно из обучающего устройства. Другая функция обучающего устройства заключается в определении и систематизации причин отклонений и ошибок с целью статистического анализа и локализаций их с целью устранения.

На рисунке (рис. 8.2) представлена комбинация диагностических систем для шлифовального станка, которая показывает взаимосвязь и использование сигналов сенсоров системами и разделение их для определения диагностируемых параметров.

Подобные системы позволяют осуществлять контроль параметров процесса и качества непосредственно в зоне шлифования, вблизи зоны шлифования и в объектах после шлифования (табл. 8.1).

Таблица 8.1 – Сенсоры и системы измерений при профильном шлифовании

Контроль	Контролируемые параметры		Сенсорная система
В зоне шлифования	Температура	Процесс	Термоэлемент Термопара Пирометр
	Составляющая силы резания		Пьезодатчик Комбинированный датчик
	Акустическая эмиссия ≥ 20 кHz		Пьезодатчик Комбинированный датчик
	Вибрации ≤ 20 кHz		Пьезодатчик Комбинированный датчик
	Износ шлифовального круга		Радарный датчик
Вблизи зоны шлифования	Дефекты шлифования	Качество	Датчики вихревых токов
	Износ круга, размер, форма, положение		Лазерный сканер, тестер размерный Индуктивный тестер

После процесса шлифования	Шероховатость Размер, форма, положение Износ круга Поверхностный слой Твердость, дефекты, прижоги		Профилограф–профилометр Координатно-измерительная машина Профиле-проектор Металлография Химический анализ Спектральный анализ и т. д.

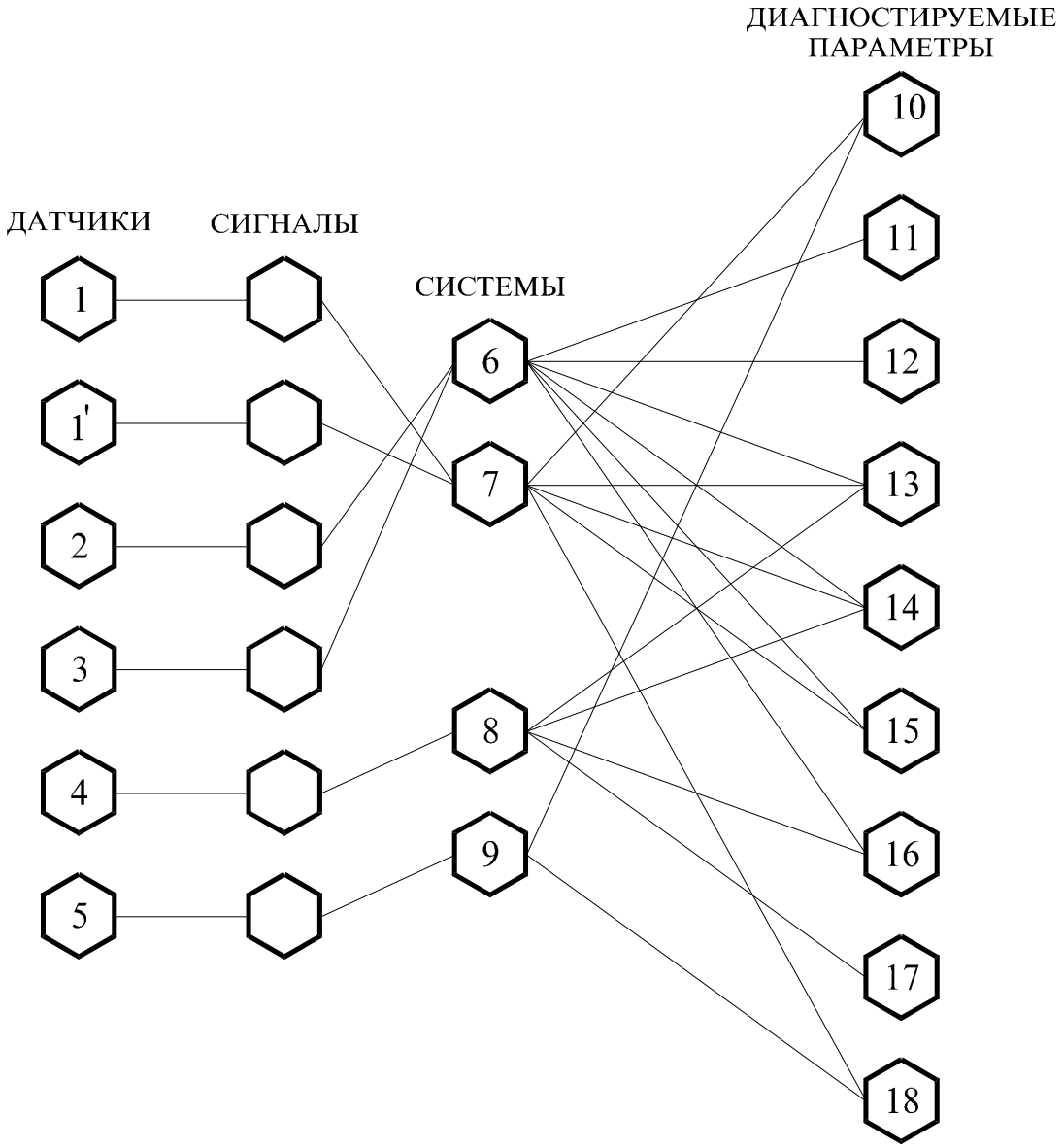


Рисунок 8.2 – Комбинации диагностических систем для процесса шлифования:

1 - акустический сенсор (шлифовальный круг);
1' - акустический сенсор (правка);
2 оптический сенсор (топография
9 - система диагностики усилий;
10 - сила, мощность;
11 - частота поверхности;

круга);

3	оптический сенсор (качество детали);	12 -	биение окружности;
4	токовый сенсор;	13 -	подача круга;
5	фотометрический датчик;	14 -	износ круга;
6	система оптической диагностики;	15 -	приведенный объем снимаемого материала;
7	система вибрационной диагностики;	16 -	корректировка правки;
8	система температурной диагностики;	17 -	температура в зоне резания;
		18 -	аварийный параметр.

8.3. Диагностические системы контроля прецизионных процессов

Прецизионный процесс должен обеспечивать три основных показателя: высокая надежность, высокая производительность, высокая точность и минимальная шероховатость.

Достичь высоких результатов по этим трем показателям чрезвычайно сложно, так как они часто входят в противоречие, например, высокая точность и производительность. Высокая точность, минимальная шероховатость достигается новыми высокими технологиями, прецизионными станками и оснасткой.

В прецизионной обработке недостаточно оптимизации и улучшения показателей отдельных процессов, где, как правило, обращали внимание на чистовые операции. Нужно исходить из того, что изготавливаемая деталь формируется целым рядом технологий. Необходимо иметь информацию о всех ошибках и отклонениях, чтобы обеспечить высокоточный прецизионный процесс обработки. Система диагностики и управления является составной частью информационной системы в прецизионной обработке. Наличие диагностической аппаратуры обеспечивает контроль за процессом обработки, состоянием качества поверхностного слоя изделий, вносит соответствующие коррективы в технологию обработки и таким образом обеспечивает высокоэффективный процесс управления.

Эффективное использование оборудования за счет автоматической периферии и эксплуатация станков в технически ограниченной области - цель новой производственной концепции. Без сомнения процессы при этом опять становятся более комплексными. Они могут функционировать в стабильных областях с системами слежения и управления.

Автономия означает самостоятельность, саморегулируемость системы. В общем, автономия станка или элемента определяется вне зависимости от жесткой предпрограммы и самостоятельной реакции на ошибки и отклонения, благодаря интегрированному программированию, управлению и наблюдению

за процессом. Автономный производственный элемент и станок содержит систему автоматического регулирования, которая оптимизирует заданные цели и параметры процесса, вследствие чего технологическая система становится закрытой.

Автономные структуры упрощают подготовку и управление производством и обладают потенциалом «ответственного» обеспечения качества. При этом удается внести сведения о прошедшем процессе, а, значит, возникают способные к обучению системы. Примером может служить система наблюдения за инструментом с созданным для определенных условий обработки «прототипом». Различие между обычными, содержащими научный базис системами, и системами, способными к обучению, состоит в том, что в традиционных системах до сих пор существовали жесткие, введенные в нее правила. Способные к обучению системы содержат «прототипы» поведения, ими созданные, и могут самостоятельно и эволюционно оптимизироваться.

8.4. Вопросы для самостоятельного контроля

1. Каковы основные задачи технической диагностики?
2. Что такое контроль состояния технологического процесса?
3. Каковы основные этапы технической диагностики?
4. Представьте диагностическую систему процесса точения.
5. Представьте диагностическую систему процесса шлифования.
6. Как можно охарактеризовать модель системы искусственного интеллекта прецизионной обработки?
7. Каковы основные характеристики "мыслящих" сенсоров?
8. Какова структура диагностической "мыслящей" системы?
9. Дайте характеристику "интеллектуальным системам"?
10. Какие основные направления развития обрабатывающих станков?

Лекция 9 РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННОГО СИНТЕЗА МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ

1. Ионное (катодное) распыление.
2. Ионно-термическое нанесение покрытий.
3. Синтез покрытий из плазмы электродугового разряда с горячим катодом.
4. Синтез покрытий из плазмы электродугового разряда с холодным катодом.
5. Синтез многослойных ионно-плазменных покрытий в одновакуумном цикле.
6. Основные сведения о конструкциях электродуговых источников плазмы.
7. Ионно-плазменные технологии синтеза покрытий режущих инструментов.
8. Методы оценки качества синтезируемых покрытий.
9. Работоспособность режущих инструментов с покрытиями.
10. Вопросы для самостоятельного контроля.

В настоящее время научные достижения позволяют на принципиально новых основах конструировать поверхность и приповерхностный слой. Сюда относятся и возможности синтезировать тонкие слои, называемые покрытиями.

По критерию существа процессов формирования все методы получения покрытий на рабочих поверхностях можно разделить на три основные группы.

К первой группе относят химико-термические методы (ХТМ) образования покрытий, основанные на твердофазовом, жидкостном или газофазовом насыщении поверхностей изделия (TCVD — Termo-cemical vapor desposition).

Во вторую группу входят методы комплексного формирования покрытий, когда оно образуется в результате химических реакций между парогазовыми смесями и термодиффузионных реакций между конденсатом и материалом изделия (CVD - Cemical vapor desposition).

К третьей группе могут быть отнесены вакуумно-плазменные методы физического осаждения покрытий, получившие название в мировой практике PVD (PhisicaI vapor desposition}. При этом процессы PVD обычно включают вакуумное распыление или испарение тугоплавкого металла, его частичную или полную ионизацию, подачу реакционного газа, химические и плазмохимические реакции, конденсацию покрытия на рабочих поверхностях изделий.

Вакуумно-плазменные методы универсальны по возможности синтеза

широкой гаммы монослойных, многослойных и композиционных покрытий на базе нитридных, карбидных, карбонитридных, оксидных, боридных и других соединений тугоплавких металлов IV – VI групп Периодической системы элементов. При помощи этих методов можно осаждать качественные покрытия при низких температурах подложки.

Ионно-плазменные технологии синтеза покрытий получили заметное распространение в мировой практике производства из-за своей универсальности, возможности синтеза покрытий различного состава и конструкции в широком температурном диапазоне (100÷1000°С). Толщина каждого из слоев таких покрытий может достигать всего несколько нанометров, поэтому при низкой дефектности слоев возможна реализация "теоретической" прочности материала и получение покрытий, обеспечивающих максимальное повышение эффективности и надежности изделий.

Ионно-плазменные процессы позволяют, управляя энергией ионов, осуществлять десорбцию, миграцию поверхностных атомов и химические реакции, распыление и имплантацию, соответственно производить очистку, синтезировать покрытие или модифицировать свойства поверхностного слоя изделия.

Наиболее эффективные области синтезируемых покрытий определяются их функциональными свойствами: износостойкостью, коррозионной стойкостью, оптическими, триботехническими и декоративными.

Износостойкость покрытий определила их применение для режущих, деформирующих и мерительных инструментов, технологической оснастки, деталей машин.

Коррозионностойкость покрытий важна для изделий медицинской техники (зубные протезы, хирургические и др. инструменты, имплантанты), оборудования пищевой, химической, нефтяной и газовой промышленности.

Оптические свойства покрытий улучшают характеристики световых и тепловых фильтров, архитектурных стекол в домостроительстве, стекол всех видов транспорта, медицинской и светозащитной оптики.

Триботехнические свойства покрытий повышают работоспособность деталей узлов трения, инструмента и инструментальной оснастки.

Декоративные качества улучшают тонкие износостойкие пленки различных цветов на стеклянной, керамической, фаянсовой и хрустальной посуде и др. изделиях из этих материалов. Широко применяется нанесение износостойких покрытий на элементы столовых приборов (ложки, ножи, вилки), на корпуса часов, на браслеты, бижутерию, фурнитуру и другие изделия из полированной нержавеющей стали или других металлов, предварительно прошедших блестящее хромирование или никелирование.

Вакуумно-плазменная технология является малоэнергоемкой и экологически чистой. Установки и технология отличаются высокой степенью универсальности.

Достоинства методов, относящихся к третьей группе, а также их высокая степень управляемости делают вакуумно-плазменные технологии нанесения износостойких покрытий наиболее перспективными.

9.1. Ионное (катодное) распыление

Метод заключается в распылении бомбардировкой ионами газоразрядной плазмы мишени из наносимого материала и последующем осаждении распыленных частиц на поверхности изделий. Ионные распылительные системы классифицируют по количеству электродов (диодные, триодные, тетродные), виду используемого напряжения (постоянное, переменное, высокочастотное), способу возбуждения плазмы (с самовозбуждением, с дополнительным разрядом, с автономными ионными источниками), наличию или отсутствию потенциала на подложке (со смещением и без).

В наиболее простом случае система распыления состоит из двух электродов, помещенных в вакуумную камеру (рис. 9.1). Напыляемый материал 3 располагают на катоде. На другом электроде (или отдельно) устанавливают подложку, например, инструменты. Вакуумную систему откачивают до вакуума (0,005 Па) и наполняют рабочим газом, в качестве которого чаще всего используют аргон до давления порядка 0,5 Па. Затем на электрод с инструментами подают отрицательный потенциал и бомбардировкой ионами аргона производят их очистку. При этом происходит распыление органических и неорганических загрязнений поверхности.

После очистки подложки отрицательный потенциал прикладывают к мишени и распыляют ее. Распыляемые частицы эжектируются через плазму разряда, осаждаются на инструментах и образуют покрытие.

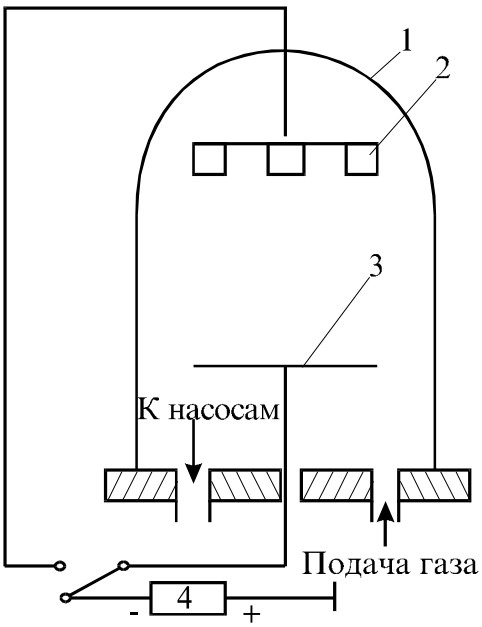


Рисунок 9.1 – Схема ионного (катодного) распыления:

1 – вакуумная камера;
2 – обрабатываемые детали;
3 – напыляемый материал;
4 - источник питания.

При необходимости в качестве рабочего используют реактивный газ, например, кислород или азот. В этом случае при распылении металлов на подложке образуются покрытия из окислов, нитридов и т. д. Например, для повышения износостойкости на рабочие поверхности металлорежущего инструмента наносят оксикарбиды титана. Покрытие карбидами и нитридами титана, в частности на твердом сплаве, можно также получить и прямым распылением этих соединений в среде инертного газа.

К недостаткам катодного распыления относят низкий КПД - большая часть энергии рассеивается на мишени, а также недостаточную степень ионизации наносимых частиц — примерно до 1 %.

9.2. Ионно-термическое нанесение покрытий

Стремление увеличить скорость нанесения покрытий до характерной для термического напыления, с одной стороны, и обеспечить высокую адгезию покрытий, характерную для осажденных с помощью ионного распыления, с другой, привело к созданию различных ионно-термических систем. На рис. 9.2 показана одна из схем такого напыления. При испарении различными методами материал ионизируется в плазме разряда, осуществленного в среде инертного газа, и ускоряется по направлению к деталям, к которым прикладывается отрицательный потенциал.

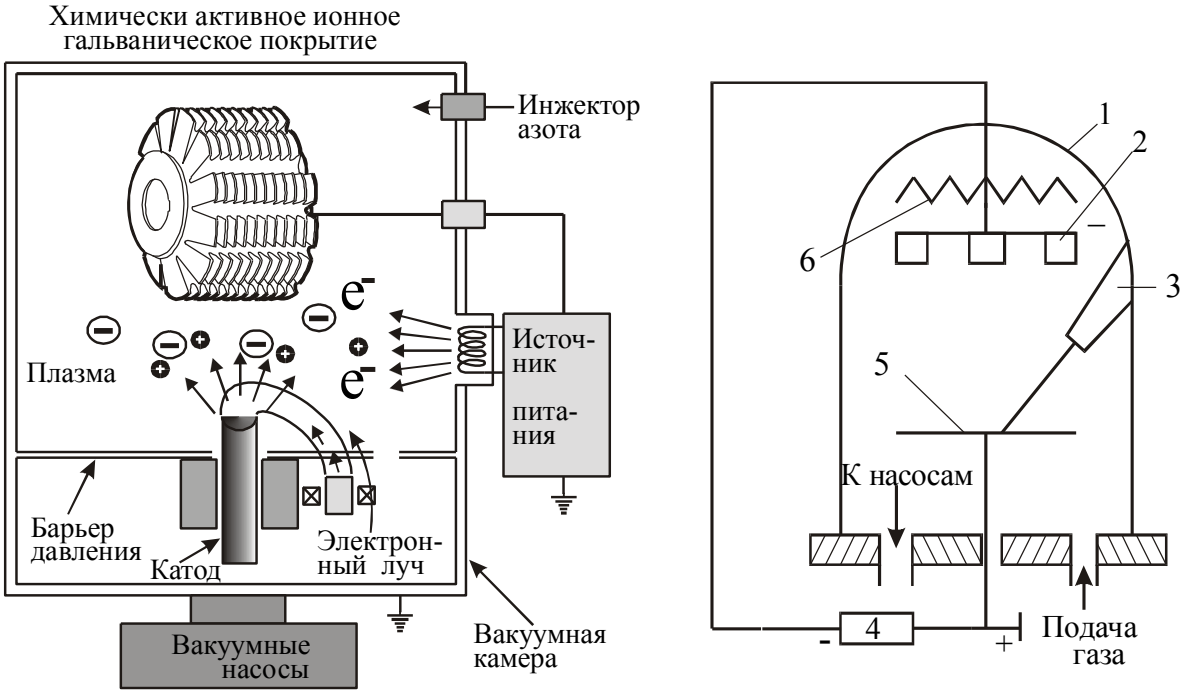


Рисунок 9.2 – Схема ионно-термического напыления: 1 - вакуумная камера; 2 - обрабатываемые детали; 3 - электронный источник или квантовый генератор (располагаемый вне камеры); 4 - источник питания для подачи отрицательного потенциала на подложку; 5 - напыляемый материал; 6 - источник подогрева подложки.

Испарение можно производить с помощью нагревателя сопротивления или индукционного нагрева. Однако существуют трудности испарения тугоплавких материалов, а также изменение стехиометрии состава при напылении сплавов и химических соединений и загрязнение покрытия материалом испарителя. Поэтому используют различные лучевые методы нагрева, главным образом, электронно-лучевые и лазерные.

Применение ионно-термического метода значительно расширяет технологические возможности систем вакуумного синтеза покрытий в направлении управления параметрами наносимого на подложку материала.

Применение этого метода позволяет получать эффективные износостойкие покрытия на твердосплавных неперетачиваемых пластинах для режущего инструмента, но значительно менее эффективно для быстрорежущих инструментов, у которых допустимая температура нагрева при очистке не должна превышать температуры отпуска 540÷560°С.

9.3. Синтез покрытий из плазмы электродугового разряда с горячим катодом

Система синтеза из плазмы разряда с горячим катодом показана на рис. 9.3.

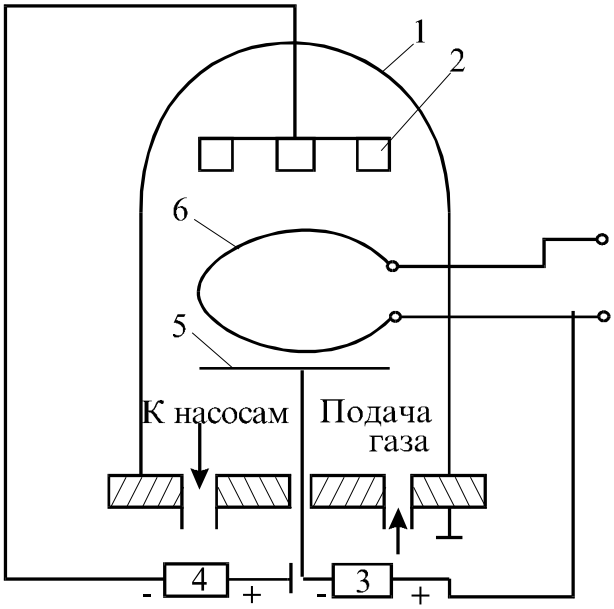


Рисунок 9.3 – Схема напыления из плазмы разряда с горячим катодом:
1 - вакуумная камера; 2 - обрабатываемые детали; 3 - источник питания для подачи положительного потенциала на катод; 4 - источник питания для подачи отрицательного потенциала на подложку;5 - напыляемый материал; 6 - кольцевой катод.

Кольцевой катод 6 при нагреве эмитирует на распыляемый металл 5, к которому приложен положительный потенциал, мощный несфокусированный электронный поток и расплавляет металл. Далее осуществляется разряд в парах наносимого материала. Для повышения адгезии покрытия к деталям может прикладываться отрицательный потенциал, ускоряющий ионизированную часть парового потока по направлению к деталям. При подаче в камеру реакционного газа, в качестве которого чаще всего используют азот или кислород, образуются на деталях нитриды, окислы и другие соединения. Недостатком системы

остается сравнительно небольшой процент ионизированных частиц в общем потоке материала, поступающего к детали, что сказывается на адгезионных характеристиках покрытия и условиях протекания реакции синтеза соединений.

Подобная система получила распространение для нанесения износостойких покрытий на металлорежущий инструмент как метод реактивного электронно-лучевого плазменного осаждения покрытий из пароплазменной фазы в вакууме (метод РЭП).

9.4. Синтез покрытий из плазмы электродугового разряда с холодным катодом

Эффективными и относительно простыми являются устройства, основанные на процессах испарения генерируемого материала катодным пятном вакуумной дуги - сильноточным низковольтным разрядом, развивающимся исключительно в парах материала электродов с интегрально холодным катодом.

Широкое распространение получил метод конденсации в вакууме на поверхность изделия вещества из плазменной фазы с ионной бомбардировкой - метод КИБ. Этот метод дает возможность наносить высокопрочные и износостойкие покрытия на рабочие грани инструмента, изготовленного из твердых сплавов, быстрорежущих и инструментальных сталей. Метод реализуется на различных установках обычного типа и с плазмооптической системой управления плазменным потоком (холовским ускорителем).

Метод КИБ основан на том, что плазменный поток металла, образующийся с помощью вакуумной дуги с холодным катодом, ускоряется путем приложения отрицательного потенциала к подложке с последующей конденсацией на ней ионов и нейтральных атомов при одновременном прохождении плазмохимической реакции их с реактивным газом. Подавая в вакуумную камеру газ-реагент во время электродугового испарения тугоплавкого металла, можно получать покрытия на основе нитридов, карбидов и других соединений металлов IV – VI групп Периодической системы элементов.

9.5. Синтез многослойных ионно-плазменных покрытий в одновакуумном цикле

Синтез многослойных покрытий можно реализовать в установках, работающих по принципу одновакуумного цикла. Модульное построение установки дает возможность проведения нескольких видов обработки поверхностей деталей и инструмента, в том числе многослойного синтеза ионно-плазменных покрытий с применением КИБ, магнетронного распыления и

ионной имплантации в одновакуумном цикле. Схема рабочей камеры представлена на рис. 9.4. Вакуумная система позволяет достичь давления $6{,}65\times10^{-3}$ Па (5×10^{-5} мм. рт. ст.) за время не более 20 мин.

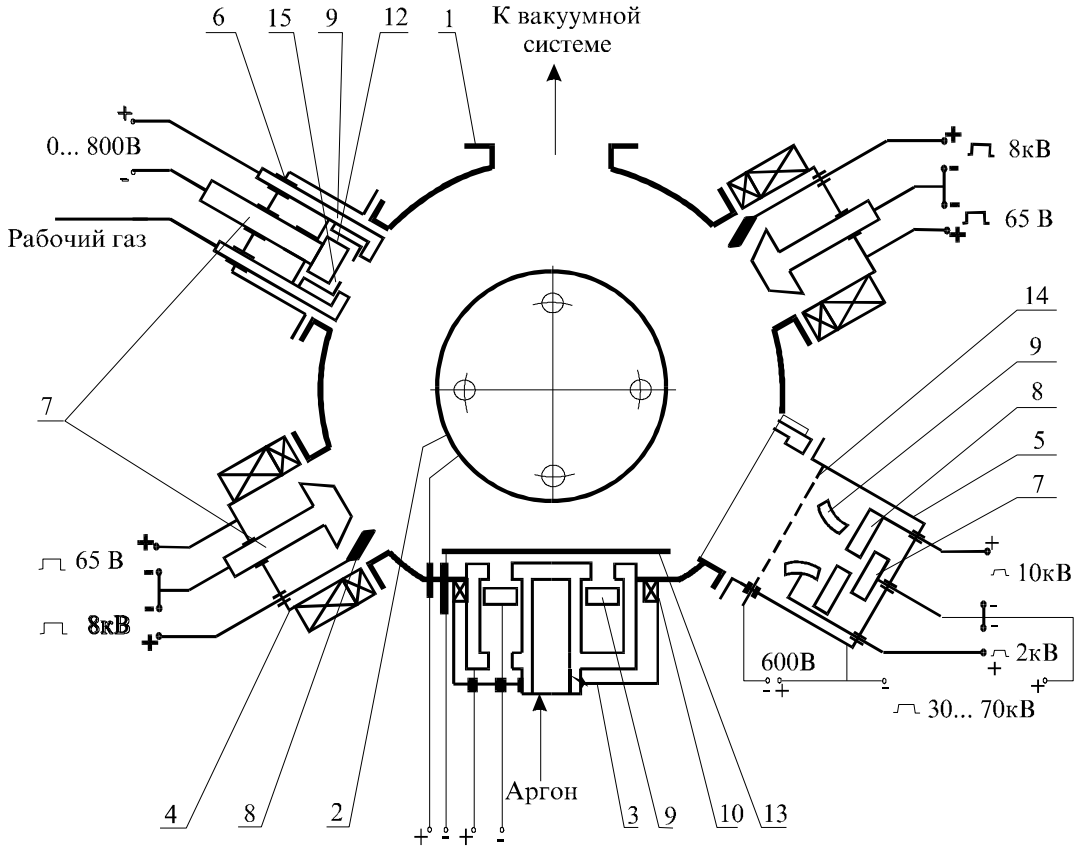


Рисунок 9.4 – Схема рабочей камеры установки для синтеза многослойных покрытий: 1- камера; 2 - устройство для размещения деталей и передачи движения в вакууме; 3 - источник ионов для ионной очистки; 4 - испаритель; 5 - источник ионной имплантации ("Диана"); 6 - магнетронный источник распыления; 7 - катод; 8 - поджигающий электрод; 9 - анод; 10 - стабилизирующая катушка; 11 - фокусирующая катушка; 12 - постоянные магниты; 13 - заслонка; 14 - сетка; 15 - катод-мишень

Основная сложность в создании эффективного способа модифицирования поверхностей, например, поверхностей трения металлических деталей заключается в необходимости обеспечения оптимального состава покрытия для увеличения ресурса работы узлов трения в определенных условиях их эксплуатации, в необходимости выбора оптимальных режимов нанесения многослойных покрытий в едином вакуумном цикле, в необходимости обеспечения равномерного распределения частиц имплантируемого вещества — имплантанта при обработке внутренних цилиндрических поверхностей.

9.6. Основные сведения о конструкциях электродуговых источников плазмы

В электродуговом испарителе металл испаряется с поверхности катода благодаря высокой концентрации энергии в катодном пятне электрической дуги. Для нормальной работы испарителя необходимо ограничить область перемещения катодного пятна по поверхности катода.

Принципиальным решением в конструкции испарителя стало применение магнитного поля для удержания катодного пятна в разрешенной зоне (рабочей поверхности катода).

На рис. 9.5 представлена схема электродугового испарителя металла с магнитным удержанием катодного пятна. Катод 6 испарителя имеет форму усеченного конуса. Силовые линии внешнего магнитного поля 5, создаваемого соленоидом 1, наклонены к нерабочей (боковой) поверхности 8 конического катода. Испаритель питается постоянным током. Напряжение холостого хода источника питания испарителя 40 60 В. Ток дуги регулируется изменением величины балластного сопротивления R1, включенного последовательно с испарителем. Зажигание дуги производится кратковременным касанием поверхности катода поджигающим электродом 8, связанным с анодом через ограничивающий ток резистора R2.

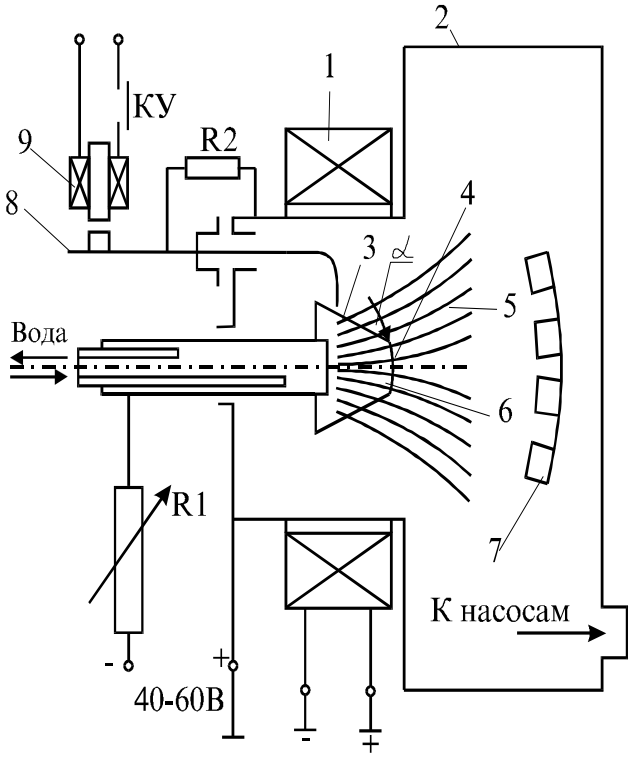


Рисунок 9.5 – Схема электродугового испарителя металлов с магнитным удержанием катодного пятна:
1 - соленоид; 2- вакуумная камера-анод; 3 - нерабочая поверхность катода; 4 - рабочая поверхность катода; 5 - магнитные силовые линии; 6 - конический катод; 7 - подложка; 8 - поджигающий электрод; 9 - электромагнит поджигающего устройства; R1 - балластное сопротивление; R2 - сопротивление, ограничивающее ток поджига; КУ - кнопка управления поджигающим устройством.

Существенное расширение технологических возможностей электродуговых источников плазмы связано с дополнительным наложением на

плазменный поток электромагнитного поля. При наложении внешнего аксиально расходящегося магнитного поля (при включении электромагнитной катушки), реализуется режим плазменного ускорителя, так называемого холовского торцевого эрозионного плазменного ускорителя. В ускорителе имеется две зоны - зона генерации (область катодных микропятен), процессы в которой не зависят от магнитного поля и определяются лишь видом материала катода, и зона ускорения (в объеме системы), на процессы в которой сильное влияние оказывает магнитное поле.

Таким образом, электродуговые испарители представляют собой двухступенчатые системы, в которых генерация рабочего вещества и его предионизация осуществляются катодным пятном вакуумной дуги в первой ступени, а доионизация и ускорение ионов, а также активация реакционного газа, позволяющая интенсифицировать процесс синтеза сложных соединений - во второй ступени, в основе которой лежит разряд в скрещенных электрическом и магнитных полях.

9.7. Ионно-плазменные технологии синтеза покрытий режущих инструментов

В настоящее время промышленность большинства экономически развитых стран мира все в большем количестве использует инструменты из быстрорежущей стали, твердых сплавов, керметов и режущей керамики с функциональными покрытиями (износостойкими, упрочняющими, фрикционными и т. д.), синтезируемые методами физического осаждения покрытий в вакууме (PVD). Отличие оборудования, использующего физические методы синтеза покрытий, состоит в различиях способов испарения вещества в вакууме, от которых сильно зависит степень ионизации пароионного потока, а также некоторых конструктивных особенностях оборудования. Для нанесения покрытий на режущие инструменты используют установки, имеющие следующие разновидности источников плазмы:

• дуговые источники, генерирующие в вакуумное пространство камеры плазму пятном сильноточного, низковольтного разряда, развивающегося исключительно в парах материала, катода, что позволяет обеспечить степень ионизации плазмы до 80÷95 % (технология КИБ, arc- PVD);

• магнетронно-ионные источники плазмы, генерирующие плазму в вакуумное пространство камеры благодаря распылению вещества при бомбардировке катода-мишени высокоэнергетичными ионами инертного газа (обычно аргон), при этом степень ионизации пароионного потока обычно не превышает 20÷30 %.

Приоритет в разработке оборудования и технологии КИБ (arc-PVD)

принадлежит Украине, Украинскому физико-техническому институту (г. Харьков). Ионно-плазменные установки с дуговыми источниками плазмы получили преимущественное распространение в мировой практике при производстве режущего инструмента с покрытием, особенно инструмента из быстрорежущей стали.

Независимо от принципа работы установок механизм образования покрытия примерно таков.

Атомы вещества, покинувшие поверхность испарителя, направляются к подложке со скоростью порядка сотен — тысяч метров в секунду. При столкновении с подложкой атом передает ей часть энергии, доля которой тем меньше, чем выше температура подложки. Обладая некоторым избытком энергии, атом вещества некоторое время перемещается по поверхности подложки, теряя постепенно энергию и стремясь к тепловому равновесию с подложкой, т. е. переходит в адсорбированное состояние.

При встрече атомов образуются атомные группы, более устойчивые к повторному испарению, так как кинетическая энергия атомов частично переходит в потенциальную энергию связи. Зародышем будущей пленки такая группа может стать, если ее размер превышает некоторый критический, при котором вероятность конденсаций (окончательного закрепления на подложке) превышает вероятность распада группы на атомы.

Дальнейший рост зародышей происходит за счет присоединения к ним вновь адсорбированных атомов, а также за счет непосредственного осаждения атомов на поверхность зародыша. Разрастаясь, отдельные островки-зародыши сливаются, постепенно образуя сплошную пленку. На завершающем этапе, когда сформирована сплошная пленка, ее рост носит относительно однородный характер.

Для быстрорежущего инструмента возможность варьирования технологическими параметрами синтеза ограничивается необходимостью поддержания узкого диапазона температур нагрева подложки при ионной очистке и осаждении покрытий от 500 до 550 °С. Такое условие обеспечивает, с одной стороны, надежное сцепление покрытия с подложкой, а с другой, — предохраняет ее от термического разупрочнения. Исходя из этого технологический процесс нанесения износостойких покрытий на быстрорежущий инструмент рекомендуется осуществлять в условиях, предусматривающих необходимость поддержания оптимальной температуры на протяжении всего технологического цикла.

Разработаны принципы, технология и оборудование комплексной поверхностной ионно-плазменной обработки (КИПО). В соответствии с этими принципами повышение долговечности покрытий может быть достигнуто

путем увеличения пластической прочности и жесткости режущего клина инструмента за счет формирования износостойкого комплекса (рис. 9.6).

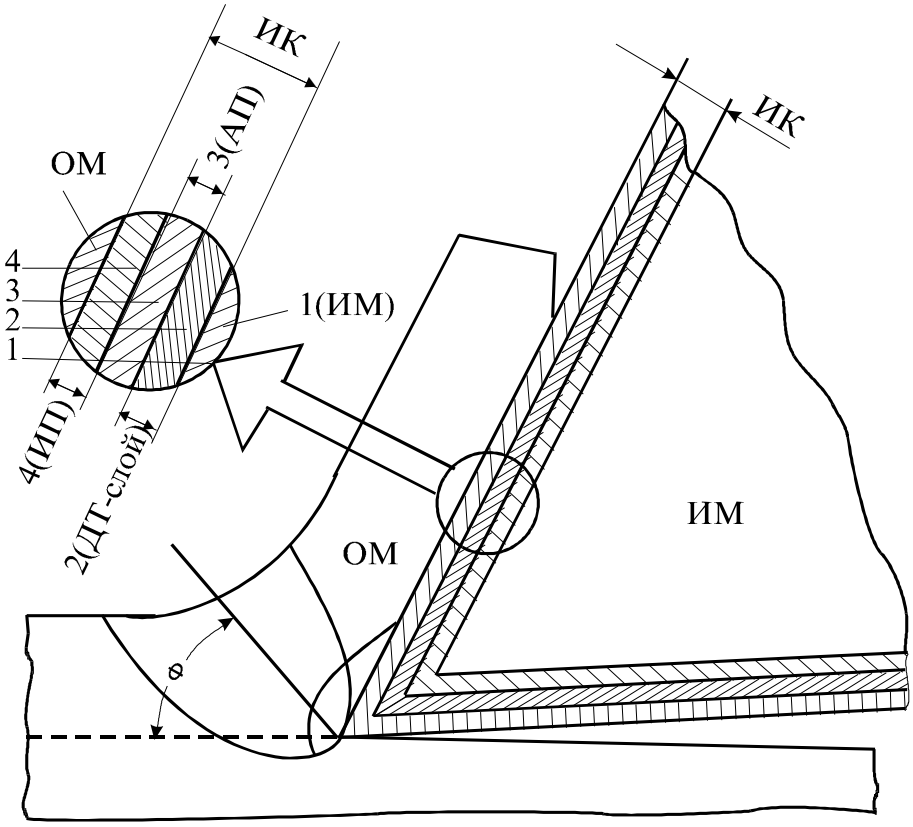


Рисунок 9.6 – Принципиальная схема износостойкого комплекса (ИК) для режущего инструмента: 1 - инструментальный материал (ИМ);
2 - диффузионный термостабильный слой (ДТ-слой); 3 - адгезионный подслой (АП);
4 - износостойкое покрытие (ИП)

Он состоит из следующих элементов:

– термостабилизирующего слоя 2, способствующего росту пластической прочности и жесткости режущего клина инструмента;

– наружного износостойкого покрытия 4 монослойного, композиционного, многослойного или многослойно-композиционного типов, имеющего повышенную сопротивляемость усталостному разрушению особенно в условиях повышенных контактных стационарных или циклических нагрузок;

– адгезионного подслоя 3, обладающего повышенной кристаллохимической совместимостью с материалами и термостабилизирующего слоя и обеспечивающего повышение их адгезионной прочности.

При этом необходимо соблюдать два условия синтеза покрытия: - активное взаимодействие соприкасающихся фаз материалов слоев 2, 3, 4

должно обеспечивать прочную адгезию между ними; - взаимодействие соприкасающихся фаз материалов слоев 2 ,3, 4 при температурах эксплуатации инструмента не должно приводить к формированию хрупких интерметаллоидных фаз, снижающих свойства инструментального материала.

9.8. Методы оценки качества синтезируемых покрытий

Среди многих видов покрытии тонкие вакуумно-плазменные покрытия (пленки) занимают особое место. Эта особенность определяется их незначительной толщиной, высокой микротвердостью, прочностью сцепления с подложкой, а также условиями эксплуатации на режущем инструменте - характеристиками трения в условиях схватывания с обрабатываемым материалом, износостойкостью и др.

Определение толщины пленки возможно несколькими методами: путем прямого обмера размеров напыляемой поверхности перед и после нанесения покрытий, методом металлографических шлифов и целым рядом различных физических методов.

При металлографическом методе контроля образцы или инструмент плотно прижимают напыленными поверхностями к другой поверхности с твердостью, равной твердости подложки, и по специальной технологии приготавливаются металлографические шлифы в плоскости, перпендикулярной к поверхности напыления. После травления шлифов в 4%-м растворе азотной кислоты в этиловом спирте износостойкий слой проявляется в виде светлой нетравящейся зоны. Толщина слоя измеряется на металлографическом микроскопе при увеличении ×1000÷2000. Недостатком описанного метода является необходимость разрушения изделия.

Среди физических наиболее распространенным является метод рентгеноструктурного анализа.

Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников базируется на двух методах испытаний: основном — по восстановленному отпечатку и дополнительном — по невосстановленному.

При испытании применяют алмазные наконечники с формой рабочей части: а – четырехгранная пирамида с квадратным основанием; б – трехгранная пирамида с основанием в виде равностороннего треугольника; в – четырехгранная пирамида с ромбическим основанием; г – бицилиндр.

При выборе нагрузки исходят из предполагаемой глубины отпечатка. Минимальная толщина слоя (покрытия) должна превышать глубину отпечатка не менее чем в 10 раз.

Для испытания на микротвердость пленок толщиной менее 4 мкм рекомендуется применять алмазный наконечник с формой рабочей части в виде

бицилиндра.

Применяются различные способы определения прочности сцепления покрытия с подложкой. Большая часть разработанных методов основана на полном отделении покрытия от подложки, что является неприемлемым в случае тонких твердых покрытий типа TiN на быстрорежущих инструментах. Другая часть методов позволяет определить лишь качественную характеристику прочности сцепления путем царапания с постоянной нагрузкой на иглу или с помощью укола алмазным наконечником.

Метод царапания с переменной нормальной нагрузкой является наиболее приемлемым количественным методом для определения сцепляемости тонких твердых покрытии с подложкой. Прибор позволяет определить критические нормальные нагрузки, при которых начинается потеря сцепления покрытия с материалом подложки. Царапающее устройство снабжено алмазной иглой в форме конуса Роквелла с радиусом при вершине — 0,2 мм. Прилагаются нагрузки с шагом в 1 Н от 0 до 130 Н (используется принцип рычага нагрузок). Царапины делаются длиной 3 мм, которая задается таймером при перемещении рабочего стола прибора. Расстояние между царапинами 0,5÷1 мм для устранения влияния деформаций от соседнего следа.

С ростом нормальной нагрузки наступает момент, когда покрытие теряет связь с подложкой. Нагрузка, при которой теряется сцепление покрытия с подложкой, называется критической. Величина критической нагрузки является критерием прочности сцепления с подложкой.

Наиболее простым и достаточно надежным методом определения пористости износостойких покрытий является способ накладывания на поверхность напыленного инструмента фильтровальной бумаги, пропитанной водным раствором $K_3Fe(CN)_6$ – 10 г/л, NH_4Cl – 30 г/л, NaCl – 60 г/л. После выдержки в течение 5 мин бумагу промывают дистиллированной водой и просушивают на чистом стекле. Признаком несплошности покрытия является наличие на фильтровальной бумаге следов темно-синего цвета реакции раствора с быстрорежущей подложкой, характеризующих количество и величину пор на исследуемом участке.

Более точным методом является потенциостатический контроль. В этом методе количественное определение площади сквозных дефектов в покрытии основано на определении величины анодного тока, соответствующего анодной реакции взаимодействия электролита с металлом подложки на дне сквозных дефектов покрытия. При постоянном потенциале величина измеряемого анодного тока для контролируемых поверхностей равной площади должна быть пропорциональна площади сквозных дефектов.

Износостойкость тонких пленок, предназначенных для режущих

инструментов, обычно оценивают в процессе трения, например, на машине трения СМЦ-2 по схеме цилиндр — плоскость. Используется подвижный цилиндрический образец диаметром 50 мм из стали 45, а покрытие наносится на неподвижное контртело в форме куба с ребром, равным 10 мм, из стали Р6М5.

Скольжение происходит по одной и той же поверхности цилиндра, т. е. износостойкость определяется в условиях повторного трения при отсутствии ювенильного контакта. Наиболее близко этот способ моделирует условия трения задней поверхности инструмента, однако повторное трение и отсутствие ювенильности искажают условия контакта трущихся поверхностей, наблюдаемых при резании.

Краткий обзор методов оценки качества синтезируемых покрытий можно завершить приведением количественных характеристик их свойств (табл. 9.1).

Таблица 9.1 – Обзор стандартных покрытий

Вид покрытия	Цвет	Температура покрытия	Применение
- TiN – монослойное покрытие	Золотой	180÷500° С	Обработка резанием, пластическое формообразование, обработка полимерных материалов
- TiN – многослойное покрытие	Золотой	350÷500° С	Усиление нагрузки резца (силовое резание)
- TiCN – многослойное покрытие	Фиолетовый	350÷500° С	Фрезерование, штамповка, пластическое формообразование, обработка полимерных материалов
- TiCN – многослойное покрытие	Серый	350÷500° С	Резание материалов > 900 N/mm^2
- TiAlN – монослойное покрытие	Голубовато-серый	250÷500° С	Сухая обработка литых деталей в области высоких температур
- CrN – монослойное покрытие	Серебряный	180÷450° С	Обработка резанием Ti или Al. Обработка полимерных материалов. Обработка давлением.
- CrCN – многослойное покрытие	Серебряный серый	180÷450° С	Резание композиционных материалов.

Необходимо помнить, что на работоспособность покрытий большое

влияние оказывает подготовка, качество поверхности подложки, в частности, ее шероховатость сильно влияет на коэффициент трения покрытия.

9.9. Работоспособность режущих инструментов с покрытиями

Повышение работоспособности режущих инструментов достигается целым рядом свойств покрытий, которые непосредственно контактируют с обрабатываемым материалом. Это проявляется в повышении производительности, снижении общих затрат на режущий инструмент, повышении качества обработки, возможности отказа от применения СОТС и др.

С помощью покрытий разрешается противоречие между высокой твердостью и вязкостью, свойственное инструментальным материалам. Создаются предпосылки для реализации процессов сухого резания, т. к. покрытия обладают не только высокой износостойкостью, но и низкой теплопроводностью, т. е. могут выступать своеобразным тепловым барьером.

Сравнение достигнутых стойкостей при сверлении быстрорежущими сверлами при критерии износа по уголку $h = 0{,}5$ мм показывает, что каждое нанесенное покрытие в данных условиях резания приводит к повышению стойкости минимум на 70% по сравнению с инструментами без покрытия.

9.10. Вопросы для самостоятельного контроля

1. Назовите основные группы методов получения покрытий и модификации поверхностного слоя.
2. Каково влияние энергии ионов на формирование поверхности изделий?
3. Каков спектр функциональных назначений покрытий?
4. Сущность метода катодного (ионного) распыления.
5. Сущность метода магнетронного распыления.
6. Сущность метода ионно-термического нанесения покрытий.
7. Как осуществляется синтез покрытий из плазмы электродугового разряда с горячим и холодным катодом?
8. Как осуществляется синтез многослойных покрытий в одновакуумном цикле?
9. Какие химические соединения составляют покрытия по методу КИБ?
10. Какие принципы реализуются в конструкциях электродуговых источников плазмы?
11. Какова роль температуры подложки в синтезе покрытий по методу КИБ?
12. Каков механизм образования покрытия?
13. Каковы особенности метода комплексной поверхностной ионно-

плазменной обработки (КИПО)?

14. Представьте принципиальную схему износостойкого многослойного комплекса.
15. Какие методы применяются для контроля качества покрытий?
16. Каковы предпосылки повышения работоспособности режущего инструмента нанесением покрытий?
17. Приведите примеры повышения работоспособности режущего инструмента.
18. Каковы тенденции развития технологии синтеза покрытий?

Лекция 10 ЭКОЛОГИЧЕСКИ ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

1. Основные направления снижения отрицательного влияния СОТС на окружающую среду.
2. Применение способов эффективного обезвреживания СОТС.
3. Применение модифицированных и альтернативных СОТС.
4. Минимизация подачи СОТС в зону резания.
5. Сухое резание.
6. Вопросы для самостоятельного контроля.

Экологически ориентированными рабочими процессами обработки материалов являются такие, которые в ходе их подготовки, реализации и последействия не наносят ущерба окружающей среде, людям, почве, растительности, животному миру, водному и воздушному бассейнам или этот ущерб сведен к минимально возможному уровню.

Создание целых производств, отвечающих требованиям сохранения окружающей среды, является насущной проблемой, которую человечеству предстоит эффективно разрешить уже в ближайшие десятилетия. Сегодня прогрессивны те разработки, которые стремятся экологические идеи воплотить в технических решениях (рис. 10.1).

Это в особой мере относится к рабочим процессам высоких технологий, т. к. они — высокие технологии — должны быть предельно экологически ориентированы.

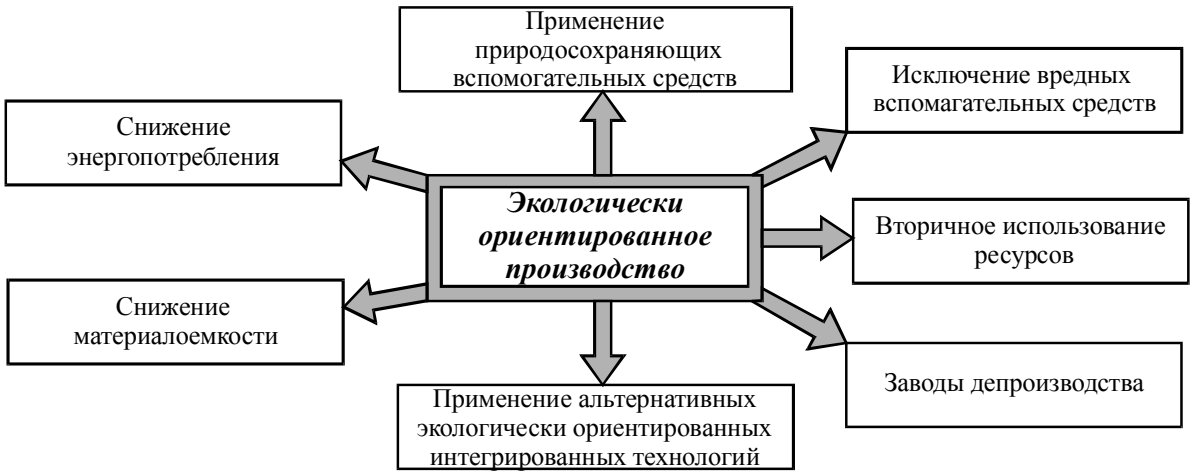


Рисунок 10.1 – Характеристика экологически ориентированного производства

10.1. Основные направления снижения отрицательного влияния СОТС на окружающую среду

Традиционно применяемые в материалообработке смазочно-охлаждающие технологические среды — СОТС — являются одним из главных загрязнителей окружающей среды. Их разбрызгивание, разлив, концентрация в ветоши и стружке, просто слив в канализацию наносят непоправимый ущерб природе, загрязняют водоемы, почву, воздушное пространство. Объемы производства СОТС весьма велики.

Например, структура и объемы потребляемых в промышленности ФРГ СОТС такова:

– смазывающие (масла) — 1 151 312 т.;

– смазывающе-охлаждающие 3% эмульсии — 947 000 т.;

– смазывающе-охлаждающие 8% эмульсии — 355 200 т.;

– смазывающе-охлаждающие не смешивающиеся с водой — 47 076 т.

Если по различным оценкам затраты на инструмент составляют 4÷5%, на оборудование — 40%, то применение СОТС требует 12÷17% от общих затрат на производство.

Важными являются аспекты обеспечения безопасности жизнедеятельности работающих. По данным профсоюзов металлообрабатывающих предприятий ФРГ 30% тяжелых и хронических заболеваний кожи работников связано с применением СОТС.

Преобладающие по объему водорастворимые СОТС как правило относятся ко 2 или 3 классу опасности, нерастворимые обычно ко 2-му классу. СОТС более низких классов опасности требует меньших капиталовложений, однако законодательно в ряде стран жесткость требований связывают с объемами потребляемых СОТС. На практике это означает, что к СОТС 3 класса опасности самые высокие требования предъявляются уже при применении объемов > 1 м^3.

Казалось бы, полный отказ от применения СОТС, будь он технически возможен, переход к сухому резанию мог бы стать идеальным решением:

– исключаются затраты на приобретение, хранение и утилизацию жидких СОТС;

– отпадает необходимость в системах, обеспечивающих подачу СОТС в рабочую зону;

– чистое рабочее место;

– минимизируется риск для здоровья, загрязнения окружающей среды, стружки, пожароопасности;

– отпадает необходимость устройств для очистки атмосферы рабочей зоны, инструмента, стружки, оборудования.

В то же время могут быть и негативные последствия отказа от жидких СОТС:

– резкое повышение тепловых и фрикционных нагрузок на инструмент;
– повышение интенсивности износа инструмента, стоимости переточек;
– снижение точности обработки;
– изменение процесса стружкообразовнаия;
– необходимость модернизации смазки узлов станков, фильтров тонкой очистки;
– более частая периодичность технического обслуживания оборудования;
– дополнительные мероприятия по коррозионной защите;
– появление опасности взрыва пыли, например, при обработке магния и алюминия;
– повышение уровней шума и др.

Как следствие порождается необходимость новых концепций организации производства, конструирования станков, изготовления заготовок, инструментальных материалов, геометрии инструмента, технологического процесса. С другой стороны «сухое» резание в ряде случаев может быть не менее вредным, чем с применением СОТС. Например, по данным Аахенского Фраунгофер института при фрезеровании 1 кг литья выделяется 4,5 $м^3$ тонкодисперсной пыли. При «сухой» обработке композитов, армированных углеродистым волокном, наряду с пылью образуются мелкие частицы и осколки волокон, которые также опасны для здоровья работающего.

Таким образом, в настоящее время нет еще единого глобального решения, обеспечивающего надежную экологическую ориентацию процессов обработки материалов. Но можно констатировать наметившиеся направления:

– гармонизация свойств СОТС с природоохранными требованиями;
– снижение объемов потребления СОТС;
– полное исключение СОТС из технологических процессов.

В каждом конкретном случае разработчик должен выбирать одно из ряда возможных решений:

– применение эффективных способов обезвреживания применяемых СОТС;
– применение модифицированных жидких технологических сред, наименее вредных с природоохранной позиции, замена жидких СОТС твердыми смазками, прежде всего органическими;
– минимизация подачи СОТС в зону резания;
– использование покрытий, адгезионно неактивных по отношению к обрабатываемому материалу;
– использование «сухого» резания, исключающего применение любых

СОТС и т. д.

10.2. Применение способов эффективного обезвреживания СОТС

Основную группу СОТС составляют масляные, водосмешиваемые и водонесмешиваемые жидкости - эмульсионные, синтетические, полусинтетические, химические растворы. В общем, все СОТС выполняют функции смазывания контактирующих поверхностей инструмента, стружки и изделия, их охлаждения и транспортировки продуктов обработки и износа инструмента, стабилизации процесса резания.

Многофункциональное назначение СОТС требует введения в их состав многих компонентов, некоторые из них могут быть токсичными для работающих, или приобретать таковую в процессе эксплуатации. Длительный или периодический контакт с кожным покровом и при поступлении паров аэрозолей и летучих продуктов термодеструкции СОТС (окиси углерода, хлористого водорода, углеводородов, сернистого ангидрида, альдегидов) через дыхательные пути приводят к раздражению слизистых оболочек, снижению общей имунно-биологической реактивности организма, изменению нервной системы, дерматозам.

Устранение возможности вредного воздействия СОТС на организм работающих достигается осуществлением комплекса профилактических мероприятий, мер индивидуальной защиты, строгим выполнением требований техники безопасности.

Наличие вредных для окружающей среды компонентов требует как минимум обезвреживания СОТС после их использования.

Существует несколько способов обезвреживания эмульсий: термические, физико-химические, биологические.

Термические способы основываются на огневом воздействии на СОТС (отработанная масляная эмульсия контактирует с продуктами сгорания газообразного или жидкого топлива); сжигание СОТС в топках котлов; обработка СОТС разогретым паром воды и др.

Физико-химические способы разложения отработанных эмульсий базируются на очистке СОТС воздействием такими реагентами, как кальцинированная сода, концентрированная серная кислота, глинозем, медный купорос, 8% раствор полиакриламида, сернокислый алюминий, а также на таких процессах, как озонирование, электрокоагуляция, обратный осмос, ультрафильтрация.

Масляная фаза, выделяемая при реагентном способе, используется как добавка к топливу, а водная фаза идет на доочистку.

Способ обратного осмоса протекает без фазовых превращений при

температурах, близких к температуре окружающей среды, обеспечивает очистку от неорганических и органических соединений, от вирусов и бактерий.

Способ ультрафильтрации основан на очистке водных растворов органических веществ и коллоидных растворов пропусканием их через крупнопористые полупроницаемые мембраны.

Биологические способы предназначены для доочистки водной фазы, полученной в результате переработки эмульсий механическими и физико-химическими способами. Отработанные СОТС, содержащие в себе органические и механические компоненты, токсичные для микроорганизмов, могут поступать на биологические сооружения при значительном (в 2000÷200 раз) разбавлении чистой водой.

10.3. Применение модифицированных и альтернативных СОТС

Весьма перспективным направлением экологической ориентации процессов обработки материалов является применение в качестве СОТС веществ, не содержащих вредных компонентов. Речь идет о синтетических водосмешиваемых веществах на основе полифункциональных кислородсодержащих соединений, растительных масел, твердых органических смазок и др.

В первом случае в результате окисления кислородом воздуха технической фракции синтетических жирных кислот образуется сложная смесь кислородсодержащих соединений - монокарбоновая и поликарбоновая кислоты, оксикислоты, эпоксисоединения и ряд других. Полученная смесь либо нейтрализуется щелочными агентами, либо подвергается полимеризации с другими полифункциональными соединениями с образованием водорастворимых или диспергируемых в воде соединений.

Модифицированные таким способом СОТС, получившие на Украине названия Гидропол-1 и Гидропол-2, (разработчик - Харьковский государственный политехнический университет) обладают высокими смазочными свойствами, диспергирующей и моющей способностью, относительно высокими антикоррозионными свойствами, практически не токсичны. Используются в виде доводочных абразивных паст, гидроабразивных полировальных суспензий, водных растворов для шлифования и хонингования.

Перспективным следует считать применение в качестве СОТС растительных масел.

Высокую эффективность шлифования обеспечивает исключение жидких СОТС из процесса и замена их на твердые сухие экологически чистые парафиноподобные углеводороды различных модификаций. Столбик из сухой

твердой смазки определенного сечения с помощью простого устройства с небольшим усилием или под действием собственного веса прижимается к рабочей поверхности абразивного инструмента и непрерывно контактирует с ней. Частицы парафина «намазываются» на поверхность, заполняют поры и субмикронеровности абразивных (алмазных) зерен, что обеспечивает доставку твердой смазки непосредственно в зону резания, реализуя смазывающий эффект на поверхностях контакта связки и зерен с обрабатываемым материалом.

Широкими технологическими возможностями в плане создания экологически ориентированных процессов шлифования обладает импрегнирование (пропитка) кругов с последующим обезвоживанием, сушкой. В результате сухие смазывающие вещества заполняют поры, имеющиеся в структуре кругов, и таким образом попадают в зону контакта рабочей поверхности абразивного инструмента и обрабатываемого материала.

Импрегнаторы представляют собой смазочные вещества с присадками химически- и поверхностно активных добавок. Их смазочное действие состоит в уменьшении внешнего (контактного) трения путем образования экранирующих пленок как результата химического взаимодействия продуктов термического разложения компонентов импрегнаторов с обрабатываемым материалом и кислородом воздуха. Пленка оказывает противоадгезионное действие, вследствие чего меняется характер и режим трения. Более сильное влияние импрегнатора на снижение тангенциальной силы, чем нормальной, приводит к повороту равнодействующей силы, характеризуемой коэффициентом шлифования, что должно увеличивать угол сдвига и снижать усадку стружки. Импрегнаторы обеспечивают более низкое значение коэффициента шлифования и его постоянство во времени. Неимпрегнируемые круги дают колебательную временную зависимость коэффициента шлифования, что означает изменение интенсивности и характера трения в процессе шлифования.

Необходимо учитывать не только технические проблемы, но и экономические и экологические аспекты каждой рассматриваемой техники. Метод сухого шлифования по обоим аспектам автоматически превосходит метод с полным охлаждением, так как при сухой обработке отсутствуют издержки на сбор и утилизацию отходов.

Решению этой задачи снижения теплонапряженности способствуют все приемы, которые усиливают отвод тепла из зоны резания через инструмент. Это направление играет важную роль при шлифовании, поскольку масса снимаемой при шлифовании стружки мала, она «поглощает» лишь небольшую долю тепла, образующегося в зоне шлифования.

Хорошие результаты дает Gleitmo-пропитка шлифовальных кругов. Это позволяет использовать свойства плавления как направление, например, использовать искусственный воск.

Сложный эфир 8Р4037 по аналогии с Gleitmo 1965 имеет низкую температуру плавления и его расплав действует положительно на контактные процессы, равномерно распределяется по объему и не «выпадает» из шлифовального круга под действием центробежных сил.

Сложный эфир 8Р4038 родственен со сложным эфиром 8Р4037 по химическому составу, однако показывает худшие результаты.

Графит дает лучшие результаты при сухом шлифовании только по критериям нормальной силы и шероховатости обработанной поверхности. По другим критериям графит не улучшает, а даже скорее ухудшает условия шлифования. Соли фосфатов имеют довольно сильную гигроскопичность, очень высокую температуру плавления (свыше 600°С). Это ухудшает условия шлифования даже более, чем при сухом шлифовании.

Изложенное иллюстрирует широкие возможности поиска для нахождения альтернативных традиционным СОТС, более гармоничных с окружающей средой и достаточно эффективных с технической и экономической позиции.

10.4. Минимизация подачи СОТС в зону резания

Минимизация подачи СОТС в зону резания является кардинальным средством экологической ориентации технологического процесса. Переход от принципа «Чем больше СОТС, тем лучше» к принципу «Подать СОТС в зону ровно столько, сколько нужно» для реализации многофункционального назначения СОТС означает резкое сокращение объемов их потребления, а, значит, отрицательного воздействие СОТС на окружающую среду, осуществление важного шага в гармонизации технологии производства и природы.

Сущность способа. Сущность способа обработки резанием с использованием минимально возможного и достаточного для достижения эффекта количества СОТС состоит в том, что в зону резания доставляется его столько, что оно полностью без остатка расходуется. Минимальная смазка рассматривается как альтернатива применения полноструйной подачи СОТС. Путем регулируемого полива или пульсирования подача СОТС и ее расход дозируется в пределах 0,5÷10 мл/мин. Это означает, что потери СОТС и их утечки, негативно влияющие на окружающую среду, уменьшаются до 20 раз.

Логистика избыточной и минимальной подачи СОТС. Уже отмечалось, что реализация идеи минимизации подачи смазки невозможна без соответствующей переориентации всего инженерного обеспечения

технологического процесса.

Применение избыточной подачи СОТС в зону резания обуславливает постоянное нахождение большого количества СОТС в стружке, на изделиях. Повторное применение масел необходимо, но стружка в смазанном состоянии не может быть включена во вторичное использование металла без обезжиривания. "Оборот" масла при минимизации СОТС практически исключен. Все это требует достаточно больших затрат в случае избыточных СОТС.

Устройства и системы минимизации подачи СОТС. Осуществление принципа минимизации СОТС требует применения соответствующих систем и устройств для их дозирования и подачи в зону резания.

Так как количество СОТС минимально, то особо подчеркивается важность точного попадания СОТС в зону контакта инструмента и обрабатываемого изделия, т.е. в зону резания. Это можно делать через сопло с малым диаметром выходного отверстия или через инструмент. В последнем случае отверстие каналов подачи СОТС должно выполняться в непосредственной близости от зоны стружкообразования. Применяемые системы и устройства должны отвечать ряду требований:

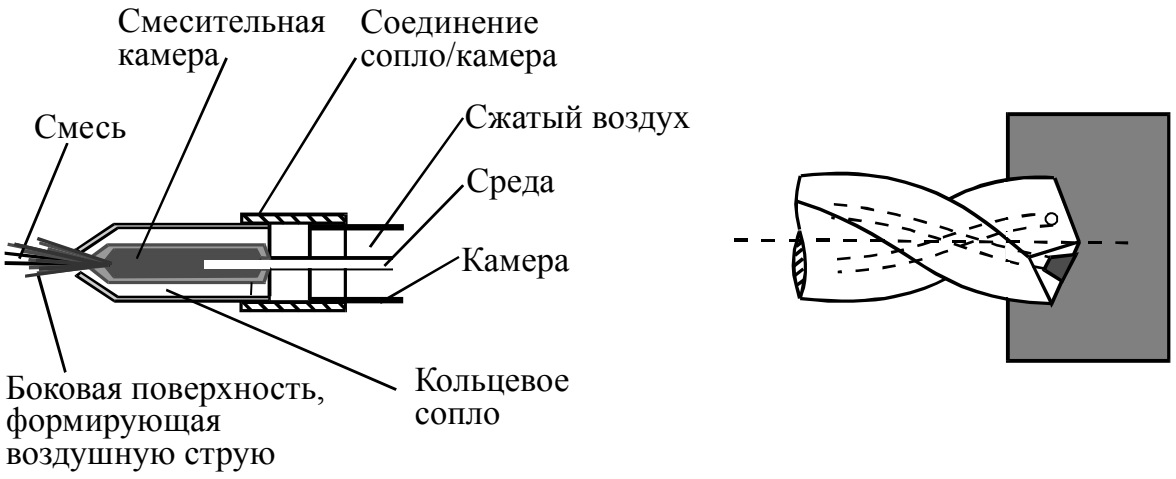
– экономичность (стоимость системы должна быть ниже традиционного избыточного охлаждения и смазки);
– простота обслуживания (позиционирование дюзы, регулирование подачи СОТС);
– отсутствие опасности для работающих;
– при подаче через дюзу (к конструкции дюзы-распылителя — исключение обратного удара);
– при подаче через инструмент (к конструкции инструмента — открытость выходного отверстия, условия истечения).

На рис. 10.2 представлены схемы подвода СОТС через дюзу (а) и через инструмент (б).

Первый применяют при обработке плоскостей, точении, фрезеровании, сверлении, резьбонарезании, развертывании при глубине (l÷2) *d*, шлифовании. Второй — при сверлении, резьбонарезании, развертывании, шлифовании.

Достоинства подачи СОТС через дюзу, распылитель:

– не нужен полый шпиндель;
– не нужны каналы в инструменте;
– дешевизна;
– снижение затрат на оснастку;
– реализуема на любом станке.



а) б)

Рисунок 10.2 – Схемы подачи СОТС: а) – через сопло (дюзу) и б) – через инструмент

Достоинства подачи СОТС через инструмент:

– СОТС подводится в непосредственной близости от зоны резания;

– поддержка удаления стружки;

– безопасность рабочего пространства;

– применима при (l÷2) *d* для сверления, резьбонарезания, развертывания.

Актуальным в этом случае является определение количества СОТС, достаточного для обеспечения смазочного эффекта или эффекта охлаждения в зависимости от того, какая задача доминирует.

10.5. Сухое резание

В последнее время много внимания уделяется решению проблемы сухого точения.

Сухим можно считать такой процесс резания, при котором осуществляется непосредственный контакт рабочих поверхностей инструмента с обрабатываемым материалом без третьего (промежуточного) вещества (СОТС).

Новые воззрения на суть и значение сухого резания в современном производстве потребовали пересмотра многих устоявшихся представлений, а главное - выявили необходимость оценки потенциала процессов резания без применения СОТС. Твердо устоявшееся мнение, основанное на многочисленных исследованиях и длительной практике производства, фиксирует низкую эффективность сухого резания инструментами из быстрорежущей стали в сравнении с применением СОТС из-за интенсификации физико-химического взаимодействия и усиления термоактивируемых видов износа.

Износ инструмента без СОТС в три раза выше, а уже через 60 мин. работы он уходит в зону катастрофического износа, который обычно не

достигается в условиях применения СОТС. Таким образом, в условиях отсутствия СОТС, затруднительно нейтрализовать отрицательное влияние температурного фактора.

Влияние инструмента и вида обработки на потенциал сухого резания. К концу XX столетия арсенал инструментальных материалов, конструкций инструментов, видов обработки столь расширился, что позволяет настолько специализировать применение видов СОТС, варьируя многими факторами, так строить процесс сухой обработки, чтобы решать не только экологические задачи, но и добиваться высокой технологической эффективности.

Принципиальным моментом в принятии решения — сухое резание или резание с применением СОТС — является правильный по отношению к свойствам обрабатываемого материала выбор инструментального материала по таким критериям, как высокая режущая способность, высокая твердость и теплостойкость, высокая износостойкость и низкое физико-химическое сродство.

Современный спектр инструментальных материалов — от инструментальных и быстрорежущих сталей до керметов и сверхтвердых материалов — позволяет так выбрать пару «обрабатываемый материал – инструментальный материал», чтобы сама необходимость применения СОТС отпала, а сухое резание давало бы необходимый технический и экономический эффект. Априори можно строить технологический процесс на основе сухого резания, применяя инструменты из твердых сплавов, минералокерамики, керметов, сверхтвердых нитридов бора и алмаза.

Использование покрытий в процессах сухого резания. Одной из центральных предпосылок сухого резания явилась возможность синтеза покрытий на инструментах различного назначения. Здесь покрытия играют не только роль механического и теплового барьера, но и по существу формируют новую контактную среду с иными фрикционными и адгезионными характеристиками.

Механизм смазывающего действия СОТС известен и хорошо описан. На контактных поверхностях инструмента возникают прочно сцепленные радикалы поверхностно-активных веществ, которые образуют тончайшую пленку, препятствующую непосредственному контакту с обрабатываемым материалом. Таким образом, исходя из современных взглядов на двойственность природы трения как адгезионно-деформационного процесса, можно утверждать, что снижением адгезионной составляющей можно значительно снижать силы трения в контакте передней поверхности со стружкой и задней поверхности с обрабатываемым изделием.

Тонкие «антиадгезионные» пленки на поверхности инструмента можно

создать не только в процессе ввода минимальной смазки при резании, но и путем предварительного нанесения, используя современные вакуумно-плазменные технологии их синтеза при изготовлении инструмента. Для каждого обрабатываемого материала наиболее эффективным будет такой состав пленки, который имеет к нему минимальную адгезионную активность.

Тангенциальное точение. Тангенциальное точение (ТТ) является одним из альтернативных способов механической обработки коротких тел вращения. Его кинематика и специфические особенности позволяют производить резание различных материалов, в том числе и труднообрабатываемых, без применения жидких и других СОТС со скоростями резания и подачами, в 5÷6 раз превышающими традиционно применяющиеся.

Способ конкурирует с точением и фрезерованием и иллюстрирует достижение высокой эффективности сухого резания за счет правильного выбора его кинематики.

В настоящее время известно шесть видов сухого тангенциального точения, осуществляемых при двух движениях: быстром вращении заготовки и медленной тангенциальной подаче инструмента по траектории, касательной к обрабатываемой поверхности. Условием возможного получения непрерывной стружки за оборот заготовки является такое отношение скорости к подаче, которое больше отношения длины окружности обрабатываемой поверхности к длине контакта резца с деталью за цикл обработки $\frac{V}{S} = \frac{\pi D}{l}$.

Тангенциальное точение с равномерной попутной подачей характеризуется:

– кратковременностью контакта инструмента с заготовкой (время цикла обработки, как правило, не превышает нескольких десятых долей секунды);
– нестационарностью процесса резания за счет непрерывной трансформации углов резания и изменения толщины среза;
– наличием участков проскальзывания со значительным удельным весом в цикле обработки.

Специфические особенности кинематики и динамики процесса ТТ значительно сказываются на характере тепловых явлений. Из проведенных экспериментов по точению стальных колец инструментом из твердого сплава методом попутного тангенциального точения известно, что деталь в процессе обработки практически не изменяет своей средней температуры, в то время как температура стружки и контактных площадок инструмента значительна.

Таким образом, главные достоинства тангенциального резания, определяемые особенностями кинематики процесса, реализуются при «сухой»

обработке.

Сравнение тангенциального резания с фрезерованием и шлифованием свидетельствуют о том, что, варьируя кинематикой, можно выявить новые потенциалы высокой эффективности различных видов обработки без применения СОТС. Это дает основания для существенного расширения зоны действия экологически ориентированных рабочих процессов.

10.6. Вопросы для самостоятельного контроля

1. Какие процессы относятся к экологически ориентированным?
2. Дайте характеристику экологически ориентированного производства.
3. Каковы основные направления снижения отрицательного действия СОТС?
4. Каковы позитивные и негативные эффекты сухого резания?
5. Дайте характеристику способам эффективного обезвреживания СОТС после использования их по назначению.
6. В чем заключаются достоинства применения СОТС?
7. Сравните принципы «чем больше СОТС, тем лучше» и «подать СОТС в зону ровно столько, сколько нужно».
8. Какова логика избыточной и минимальной подачи СОТС?
9. Каковы требования к системам и устройствам минимальной смазки?

Лекция 11 ХАРАКТЕРИСТИКА СРЕДСТВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

1. Технологическое оснащение.
2. Средства контроля поверхностей и поверхностного слоя.
3. Вопросы для самостоятельного контроля.

Гарантированное получение изделий с принципиально новым уровнем функциональных и др. свойств, достижение точности 0,1 мкм — 1 нм может быть получено только при условии комплексной разработки высокопрецизионных рабочих процессов, измерительных систем, станков и др. оборудования. Размеры деталей или их элементов могут составлять широкий диапазон вплоть до нескольких мкм, а точность станков должна быть в пределах 0,01 мкм.

11.1. Технологическое оснащение

Рабочие процессы, связанные с механической обработкой, базируются на чрезвычайно высокой точности характеристик перемещений станка и геометрии инструмента. Субмикрометрическая или нанометрическая точность перемещений станка и геометрии инструмента являются здесь обязательными условиями. Металлорежущие станки, все технологическое оборудование и измерительная аппаратура включаются в единую систему управления замкнутым циклом, что в совокупности обеспечивает достижение требуемой точности, скорости и управления циклом позиционирования в системе инструмент- заготовка. При этом элементы оборудования, например, направляющие опоры, измерительные преобразователи перемещений (датчики), измерительная аппаратура и методы сервопозиционирования, системы диагностики соответствуют требуемому уровню точности оборудования.

11.2. Средства контроля поверхностей и поверхностного слоя

В традиционных технологиях в большей мере используются измерительные инструменты, приборы и устройства, позволяющие контролировать макро- и микрогеометрические характеристики поверхности. Задача формирования функциональных свойств изделия породила необходимость расширения арсенала средств измерения и контроля и привела к использованию физических методов исследований: спектральный, рентгеновский и микрорентгеновский анализ, растровая и просвечивающая электронная микроскопия, методы определения остаточных микро- и

макронапряжений, растровая и сканирующая туннельная микроскопия, атомная микроскопия. В начале 80-х немецкий физик Герд Бинниг и его швейцарский коллега Генрих Рорер открыли растрово-тунельный микроскоп и получили за него в 1986 году Нобелевскую премию в области физики. При помощи этого прибора можно наблюдать за поверхностью с точностью до атома. А сейчас этот прибор является настолько распространенным, стандартным оборудованием, как и его «младший брат» — силовой микроскоп. Достигнута возможность изучения новых поверхностных структур, атомных и молекулярных структур поверхности после различных способов формообразования и обработки.

Принципиальным достижением является возможность получения одинакового увеличения в горизонтальном и вертикальном направлениях и разрешающей способности в нанометрической и субнанометрической области (туннельные и атомные микроскопы, нанометрический контактный измерительный инструмент) (рис. 11.1). Вместе с тем количественная оценка параметров поверхности в нанометрической области в ряде случаев затруднена в сравнении с качественной, наглядной.

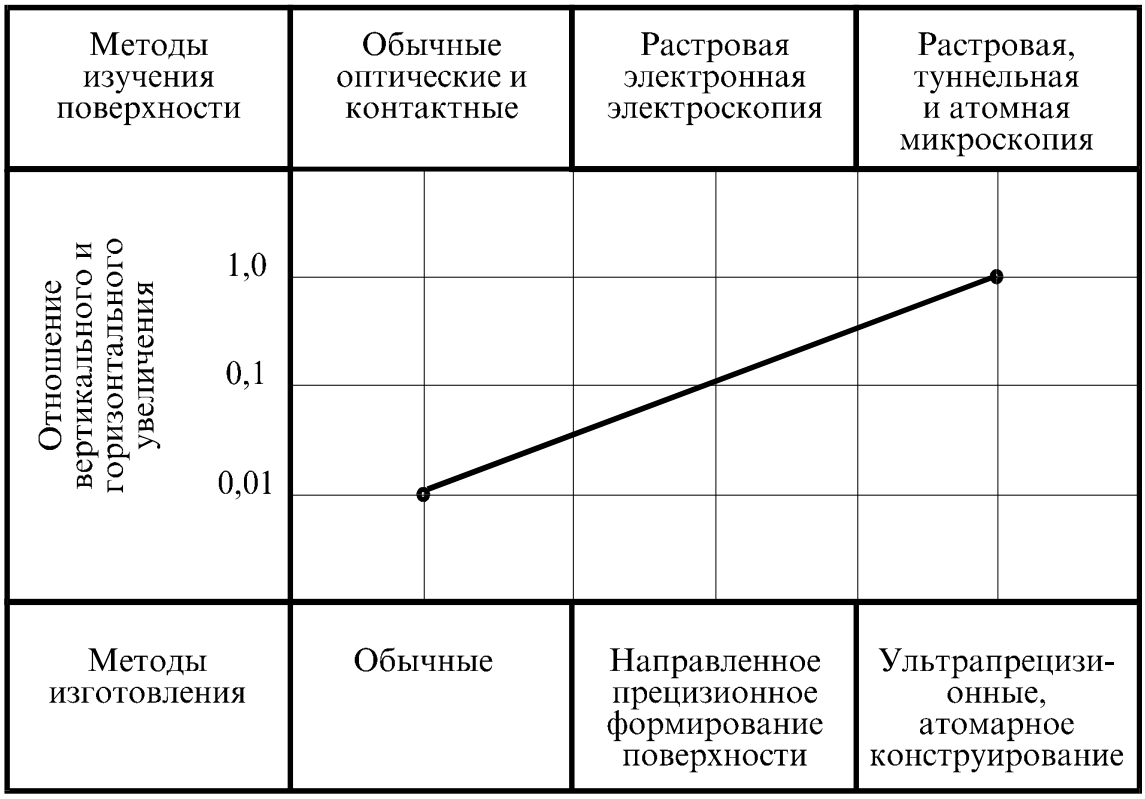


Рисунок 11.1 – Развитие разрешающей способности измерительной техники

Тенденции и темпы развития техники измерений позволяют надеяться на то, что переходу к «нанотехнологиям», а затем и к «пикотехнологиям» будет обеспечена надежная база. При этом неизбежно необходимо слияние

лабораторных методов и техники измерений с промышленными, точнее подтягивание промышленных методов контроля к лабораторным.

Таким образом, сегодня в распоряжении технологов, научных работников может быть достаточно средств, для всесторонней оценки характеристик изделий на трех уровнях:

– макроскопическом, когда глубина проверяемого поверхностного слоя составляет 100÷1000 мкм;
– микроскопическом, когда глубина проверяемого поверхностного слоя составляет диапазон от нескольких сот нанометров до нескольких микрон;
– нонометрический, когда этот слой не превышает нескольких атомных слоев.

Для оценки топографии поверхности, ее структуры и шероховатости применяют оптическую микроскопию (ОМ), электронную микроскопию (ЭМ), атомно-силовую микроскопию (АСМ), туннельную электронную микроскопию (ТЭМ).

Кристаллографию поверхностных слоев деталей после изготовления оценивают с помощью гамма-лучевой и энергетической фотонной спектроскопии. Традиционная широко применяемая гамма спектроскопия дает представление о структуре кристаллографических тел и их напряженном состоянии. Для оценки точности размера и ориентации отдельного поверхностного кристаллита эффективными являются методы электронной обратно-рассеивающей дифракции.

Химическую природу элементов у поверхности получают микрозондированием, позволяющим обследовать объем до одного кубического микрометра. Различные методы спектроскопии, основанные на бомбардировании фотонами или электронами, идентифицируют природу поглощающих слоев у поверхности.

Степень геометрических, физико-химических и кристаллографических изменений в поверхностном слое в процессе изготовления изделия оценивается целым комплексом методов, дополняющих друг друга:

– электронная потенциальная ОЖЕ-спектроскопия;
– электронная ОЖЕ-спектроскопия;
– концентрический-гемосферический анализатор;
– цилиндрический зеркальный анализатор;
– высокоразрешающая электронная энергетическая спектроскопия;
– ионизационная спектроскопия;
– инфракрасная рефлекто-поглащающая спектроскопия;
– высокоэнергетическое ионное рассеивание;

– рефлекто-высокоэнергетическая электронная дифракция;
– гамма-лучевая фотоэлектронная спектроскопия;
– ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия;
– поверхностнаярасширенная гамма-лучевая поглощающая точная структура;
– сканирующая электронная микроскопия;
– высокоразрешающая электронная микроскопия и др.

Ниже приводится краткая характеристика некоторых из них.

Метод гамма-лучевой фотоэлектронной спектроскопии. Относится к неразрущающим методам контроля, так как гамма-луч, используемый для получения фотоэлектронного спектра, относительно безопасен для многих материалов.

Источником гамма излучения является нить накаливания и целевой анод. Напряжение прикладывается между нитью и анодом для ускорения электронов, испускаемых из нити в щель анода. Электронное бомбардирование щели является причиной возникновения гамма излучения. Для выработки фотоэлектрического спектра гамма-источник производит монохромное излучение с достаточной энергией, чтобы получить ядра электронов всех элементов периодической таблицы. На рис. 11.2 представлена схема получения фокусированного луча на установке Стенфордской синхротронной радиационной лаборатории.

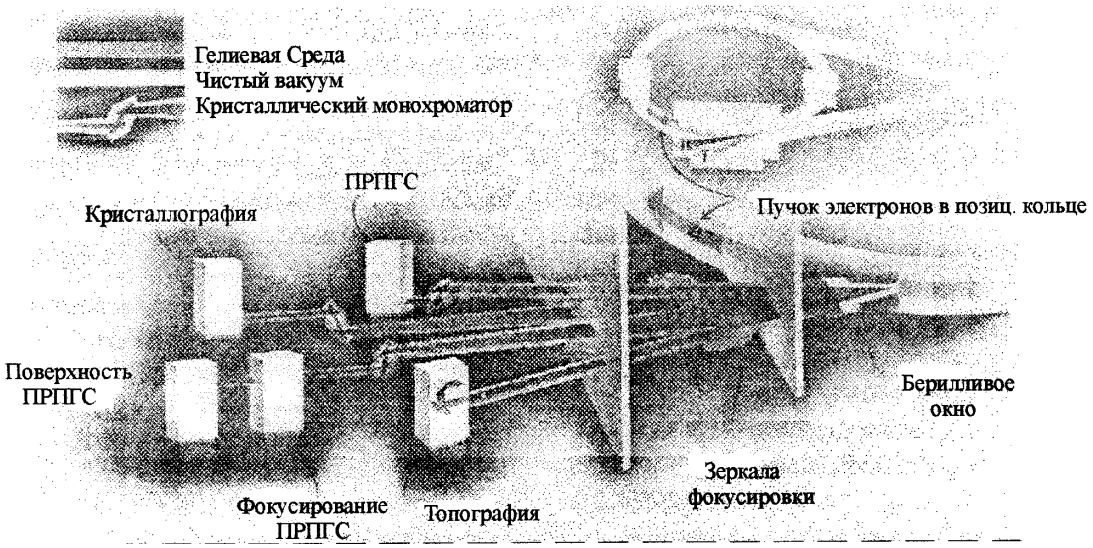


Рисунок 11.2 – Схематический взгляд на первую фокусирующую лучевую линию Стэнфордской лаборатории

Гамма-фотоны из ближайшего моноэнергетического луча направляются внутрь образца. Фотоны поглощаются атомами, это сопровождается

излучением электронов. Электроны с орбит всех атомов с энергией связи меньшей, чем энергия гамммa-лучей, возбуждаются неодинаково. Некоторые пики в спектре более интенсивны, чем другие. Так как атомные структуры каждого элемента периодической таблицы отличаются от всех других, определение позиции одного или многих путей электронов позволяет обнаружить присутствие различных элементов в поверхности образца.

Метод поверхностной расширенной гамма-лучевой точной структуры (ПРГПС) позволяет определить изменения длин молекулярных связей с точностью до 0,05 А, ориентации молекул, поглощаемых поверхностью единичных кристаллов, определить химический состав поглощенных элементов и относительную концентрацию различных элементов. Используется для оценки органических поверхностей (полимеры, смазки, покрытия) и неорганических (коррозия, электрохимия, разрушение, электронное пассивирование и др.).

Метод электронной ОЖЕ-спектроскопии. Метод электронной ОЖЕ-спектроскопии — один из наиболее применяемых аналитических методов определения химического состава поверхности твердых тел. Его достоинством является высокая чувствительность в области 5÷20 А поверхности, быстрое получение данных и возможность уловить и оценить все элементы. Эффективно применение при изучении аномальных структур, диффузии, коррозии и окисления, адгезии, трения и износа, границ зерен, стабильности структур зерен, хрупкости материалов порошковой металлургии, хрупкости материалов на железной и нежелезной основах и др.

Метод Раман – спектроскопии. Для оценки структурных характеристик поверхности широко применяется метод Раман- и микро-Раман - спектроскопии. Относится к неразрушающим методам контроля, не требует специальной подготовки образцов, возможно применение для диагностики.

Микро-Раман-спектроскопия позволяет за счет выбора необходимого увеличения микроскопа изучать малые объекты и участки поверхности до 1 мкм^2 (единичные кристаллические пленки, малые концентрации примесей, нормальные напряжения).

Атомная силовая микроскопия (АСМ). Метод базируется на изменении сил взаимодействия частиц, соизмеримых с атомом. Эти силы, воздействуя на наконечник, перемещающийся вдоль поверхности, вынуждают изгибаться консоль, на которой наконечник закреплен (рис.11.3).

Перемещение консоли оценивается с помощью оптической интерферометрии или улавливания луча, отражаемого от верхней поверхности консоли, позиционно-чувствительным фотодатчиком.

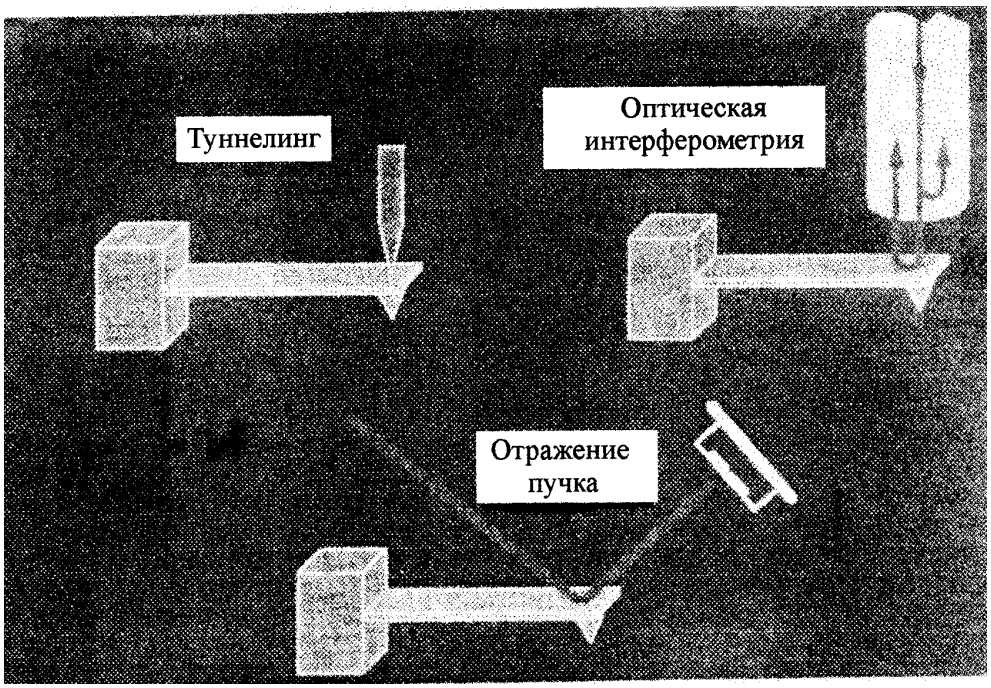


Рисунок 11.3. Классическая схема для определения движения консоли при АСМ

При этом фиксируются отклонения менее, чем 0,01 А. Эта же задача решается с помощью пьезодатчика, вмонтированного в консоль. Энергия взаимодействия двух атомов или малых малекул описывается известным потенциалом Леннарда-Джонса, а сила взаимодействия рассматривается как функция расстояния между ними.

Метод сканирующей туннельной микроскопии (СТМ). Метод сканирующей туннельной микроскопии предназначен для изображения поверхности с атомным разрешением. Сканирующая туннельная микроскопия является поверхностно чувствительным методом, поскольку базируется на эффекте туннельного тока, являющегося мерой взаимодействия (сложения) электроволновых полей электропроводных зонда и образца в самом промежутке, их разделяющем. Получаемые изображения зависят и от используемого напряжения (разности приложенных потенциалов) между зондом и образцом.

Сканируя поверхность, зонд вынужден совершать перемещения по оси Z для сохранения величины туннельного тока постоянной (рис. 11.4).

Метод локального зондирования может широко использоваться для различных процедур, связанных с поверхностями. Метод может быть реализован в различных средах (от ультравысокого вакуума до электролита), миниатюризирован, его зонду могут быть приданы функциональные свойства; возможно применение для спектроскопии проводимостей, разделительной спектроскопии и др.

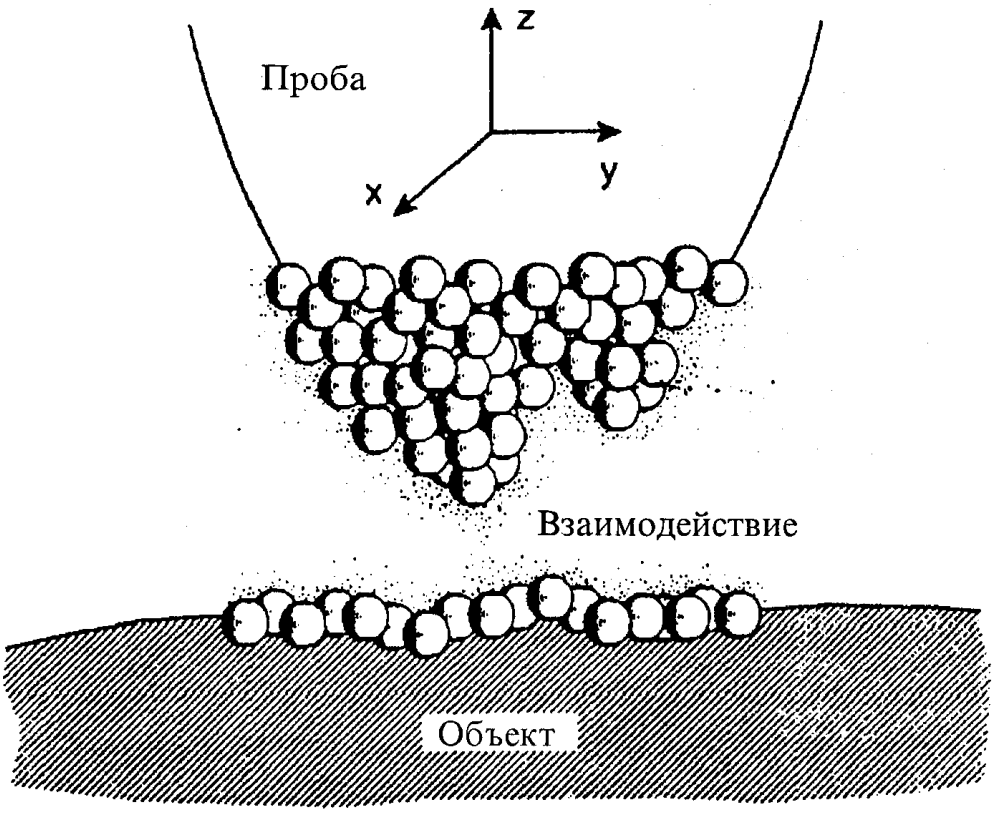


Рисунок 11.4 – Схема метода локальных проб

11.3. Вопросы для самостоятельного контроля

1. Дайте характеристику станочному оборудованию в связи с достигаемой точностью обработки.
2. Дайте характеристику средств позиционирования инструмента и заготовки.
3. Дайте характеристику режущему инструменту в связи с достигаемой точностью обработки.
4. Дайте общую характеристику средствам и методам контроля трех уровней геометрии обработанной поверхности.
5. Приведите перечень характеристик поверхностного слоя в связи с обработкой резанием.
6. Сущность методов оценки поверхности и состояния материала поверхностного слоя.

Лекция 12 ПАРАДИГМЫ ПРОИЗВОДСТВА БУДУЩЕГО. ПЕРСПЕКТИВЫ ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕХНИЧЕСКОГО ИНТЕЛЛЕКТА

1. Применение технического интеллекта в технологии изготовления.
2. Роль «интеллектуальных» инструментов.
3. Адаптивные и обучающиеся станки.
4. Функции техники для нанесения покрытий.
5. Миниатюризация производства.
6. Выявление новых потенциалов снижения стоимости.
7. Вопросы для самостоятельного контроля.

Современное рыночно-ориентированное производство, концепции CIM, «Lean Production», CIM-II и др., нацелены на рационализаторские потенциалы, обусловлены главным образом организационно. Естественно ход развития производства, время обуславливают исчерпание потенциала этих концепций и на пороге 21-го столетия стимулируют разработку парадигм производства будущего.

Отправной точкой такого нового мышления может быть научно и потенциально ориентированное начало с присущей ему целостностью, которое центральное место отводит продукту, пользующемуся спросом, и обеспечивает быструю разработку этого продукта, его изготовление и возврат в замкнутый цикл при согласованном взаимодействии человека, организации и технологии.

Поскольку высокие технологии и их рабочие процессы ориентированы на производство продукции с принципиально новым уровнем функциональных, эстетических и экологических свойств, то их роль в осмыслении парадигм производства будущего велика уже сегодня. Можно ввести в круг этих понятий такие высокие технологии и рабочие процессы, как высокоскоростное, прецизионное и ультрапрецизионное резание на станках с CNC управлением, резание композиционных и сверхтвердых материалов, обработка высоким внутренним давлением, синтез многослойных покрытий с наперед заданными свойствами, экологически ориентированные процессы обработки (сухое резание и резание с минимальной смазкой), информационные и коммуникационные технологии, интегрированный рабочий процесс ускоренного формоообразования (Rapid Prototyping) и др.

В производстве будущего, которое предопределено существующими тенденциями развития, центральное значение для продвижения вперед в получении максимально высоких результатов занимает применение техники, способов и методов, обладающих интеллектом. Этот путь связан, однако, с растущими расходами, но, не смотря на это, он неизбежен.

Современные машины с быстродействующей механикой и сенсорикой, а также с современными методами управления процессом обеспечивают во много раз лучшую реализацию процесса, чем это делалось вручную. Появились машины с интеллектом и системами, компенсирующими ошибки. Технологически ориентированное программное обеспечение является ключом в этом вопросе. В лаборатории удавалось создавать системы, способные самообучаться и самооптимизироваться, и изготавливать изделия, максимально приближенные к идеальным.

Миниатюризация технических компонентов и конструктивных элементов может сегодня выступать как новое направление развития техники производства. Ранее это было ограниченно технологией, которая если и применялась, то только в микроэлектронике. Развитие технологии в изготовлении функциональных элементов, сенсорики и акторики, а также в изготовлении их компонентов дало новый стимул для развития микрообработки. Для этого используются миниатюрные машины и установки, которые обеспечивают устойчивую технологию.

Особенное значение приобретает миниатюризация формы и функциональных элементов. Все большее значение приобретает высокая точность, которая связана с филигранными признаками конструктивных элементов.

Следующей областью будущей технологии изготовления являются генеративные технологии. Не «разделение», а наращивание объемом изделий является основой таких технологий для креативного машиностроения Для реализации в производственную практику результатов, полученных в лабораториях, требуется все знания и искусство инженеров.

Техническое развитие технологии изготовления является следствием повышения конкурентоспособности обрабатывающей индустрии. Новые технологии открывают шанс использовать их для производства и вместе с тем дают импульс развитию экономики.

Интенсификации реализации потенциала высоких технологий должно предшествовать накопление наукоемкости, обширных знаний о сущности рабочих процессов, средствах производства, реализующих эти процессы, систем диагностики и обеспечения надежности, с широким использованием виртуальной структурной и параметрической оптимизации — на базе математического и системно-теоретического компьютерного моделирования.

Таким образом, перспективные высокие технологии обладают тремя новыми целевыми функциями:

– кратчайший путь от конструирования и проектирования к изготовлению;

– превентивная оптимизация процессов и их протекания (виртуальный

инжиниринг);

– владение технической граничной областью (технический интеллект).

Миниатюризация, прецизионность изготовления и управления ведут к решению технических проблем в граничных областях. В основу исследований закладывается установление взаимосвязей процессов через проявление законов физики, материаловедения, механики, динамики, термодинамики, электроники, используемой как информатика. На базе этого возникают решения, которые позволяют управлять техническим интеллектом. Знание таких взаимосвязей можно моделировать. Это дает возможность оптимизировать процессы за счет имитации, «виртуального инжиниринга».

Каждый новый материал, каждый новый инструмент, каждый новый станок требуют повторения всех процедур, поэтому высокие затраты на испытание этих новшеств замедляют их внедрение в производство. Математическое моделирование всех компонентов процесса снижает этот барьер.

12.1. Применение технического интеллекта в технологии изготовления

При моделировании и имитации возможно поэтапное разрешение противоречия между достижением высокой точности и производительности. Интеграция решения этого противоречия в станках будущего ведет, в конечном счете, к применению технического интеллекта.

Под применением технического интеллекта в машинах и устройствах понимают способность машин и систем реагировать на систематические отклонения в протекании процесса с применением определенных стратегий, способность к автоматической адаптации в условиях определенной области. Границы применения интеллектуальных систем в технологии изготовления сегодня обусловлены техническим развитием компонентов и с другой стороны возможностями электроники и степенью обработки информации (рис. 12.1).

К числу компонентов нужно отнести развитие числового программного управления и высокоразвитую сенсорику, предпосылки для развития микротехники, основанной на регистрации импульсов. Благодаря минимизации элементов достигается высокая степень разрешения при наблюдении за технологией изготовления, точностью и ультрапрецизионностью. Это особенно важно, к примеру, когда речь идет о поверхности и краевых зонах конструктивных элементов в микро- и наноотраслях, где реализуются совершенно новые функции. Управление миниатюризацией процесса приводит к использованию технологий изготовления, где ключом является применение технически интеллигентных систем.

Рисунок 12.1 – Применение систем технического интеллекта в производственной технике

Второе направление развития позволило моделировать происходящее в системной технике и дало возможность имитировать процессы. В дальнейшем рекомендовано для технологий изготовления релевантное внедрение информационной техники коммуникации, а также анимации и взаимодействие этих компонентов, которые связаны обычно также с понятием виртуальной реальности.

Обе эволюционных линии могут интегрироваться в любом виде в новые планы изготовления и дают возможность обрабатывать новые потенциалы:

– высокую возможность разрабатывать и выполнять любые процессы;
– высокую способность интеграции и адаптации;
– высокую надежность процесса;
– упрощение управления ходом процесса;
– быстрое переоборудование на новое изделие;
– телесервис, телеоперативность.

В области технологии изготовления можно рассмотреть несколько следующих конкретных примеров.

12.2. Роль «интеллектуальных» инструментов

Рабочие процессы высоких технологий являются порождением существующих тенденций развития промышленного производства. Центральное место в этом развитии все больше занимает применение техники, обладающей «интеллектом».

Современные машины с быстродействующей механикой и сенсорикой

обеспечивают во много раз лучшую реализацию процессов, чем это делалось в ручную на основании практического опыта. В этой связи следует выделить инструмент и станки с «интеллектом» и системами, компенсирующими ошибки и отклонения процесса. Технологически ориентированное программное обеспечение является ключевым в этом вопросе.

Для инструмента целевой установкой является уменьшение износа, которая в прошлом достигалась разработкой новых инструментальных материалов, таких как синтетический алмаз, борозон и супер-абразивы. Благодаря специфическим системам нанесения покрытий стало возможным в дальнейшем производить комбинации между покрытиями и покрываемыми поверхностями, интегрировать существующие и даже сенсорные способности в краевой зоне оценивать трение, износ и коррозию, одновременно регулируя нагружение силами и температурами.

Идея создания «интеллектуального» режущего инструмента состоит в объединении режущих и информационных свойств, т. е. конструировании такого инструмента, который одновременно является и средством обработки и средством измерения, способным определить граничные области.

Специфические системы покрытий позволяют не только создавать комбинации эластичной подложки с износостойкими слоями, но даже интегрировать эти свойства с сенсорными в этой граничной области. Синтезируя покрытия с износостойкими, коррозионностойкими, фрикционными свойствами, можно добиться с их помощью регулирования сил и температуры резания.

Инструменты будут при этом одновременно и средством обработки и средством измерения, они необходимы для определения граничной области.

Технически — это результат интеграции тонкослойных датчиков, например, литографических (сенсор) в зоне износа с исполнительным органом, предназначенным для компенсации износа в микрозоне.

Естественно, что системы должны обладать высоколокальным разрешением температуры, деформаций, текущих напряжений, износа и др. характеристик, а также быть саморегулируемыми и самообучающимися.

Знания о текущих (мгновенных) нагрузках в зоне обработки, получаемые от такого резца, могут использоваться для управления процессом с целью исключения периодических, механических и термических нагрузок, компенсации износа, например, корректировки подачи. Такая интеграция требует способностей к обучению и учету условий, а также применения микротехнических систем позиционирования и исполнения, а также передачи к фиксированию сигналов. Важная роль отводится станкам и автономным элементам систем производства.

В дальнейшем такие способности как, например, идентификацию или коррекцию можно интегрировать непосредственно в инструменте.

12.3. Адаптивные и обучающиеся станки

Станки для обработки в граничной области должны обладать способностью перейти от существующих методов обеспечения к управлению процессом (рис. 12.2). Это требует оптимизации конструкции соответственно по нагрузке, совершенствования необходимой динамики, обеспечения высокой жесткости. Применением новых кинематических решений эти требования можно учитывать уже в конструкции.

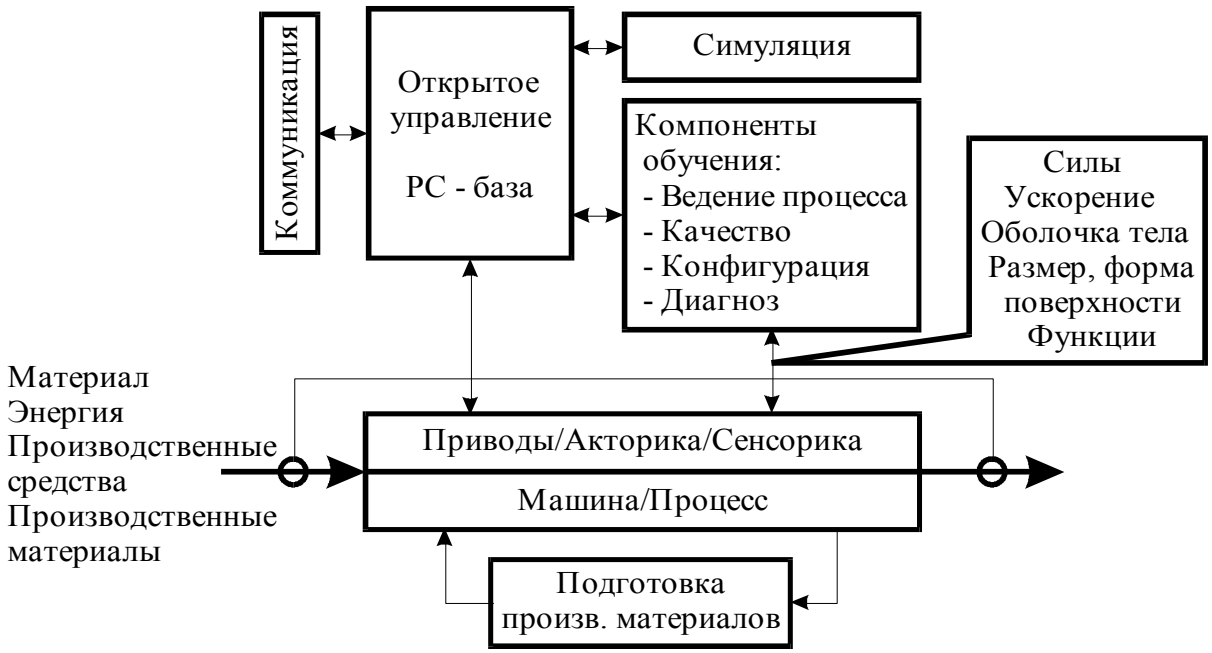


Рисунок 12.2 – Адаптивные и обучающиеся системы производства

Сенсоры регистрируют релевантные данные машин и процессов. Множество одновременно регистрируемых характеристик принудительно ведет к мультисенсорным решениям. Модель процесса содержит связь способов обработки и параметров обработки и параметров качества структурных элементов, а также состояний машин. При этом появляется возможность компенсировать систематические отклонения. Благодаря ситуационной симуляции можно непрерывно наблюдать за состояниями и корректировать отклонение изменением исходных параметров.

С измерениями перед, во время или после процесса можно связать как продвижение вперед, так и приближение к идеальному процессу. Регулирование должно основываться на косвенных величинах, например, силе, температуре, нагрузках и других.

Трудности лежат в корреляции между косвенными параметрами процесса

и показателями качества. Эти корреляции должны определяться при автоматизированном управлении моделью процесса. Регулирование процессом перед его реализацией представляет идеальный случай, дальше реализовать корректировку очень тяжело. Она базируется на всех параметрах состояния машины, инструмента и качестве продукта (например, припуски), которые задаются еще перед началом процесса или имитируются на модели. Предопределение достижимого качества вследствие имитации допускает принципиальную оптимизацию регулирования процесса уже перед началом обработки.

Это дает возможность сегодня регистрировать трудные корреляции между регулированием процесса и данными об ограничении технических условий с применением расчетной и моделирующей техники. В нескольких областях удалось уже зарегистрировать такие взаимосвязи благодаря искусственной нейронной сети, стало возможным определение допуска для косвенных величин, например, применительно к допускам на коленчатый вал (рис. 12.3).

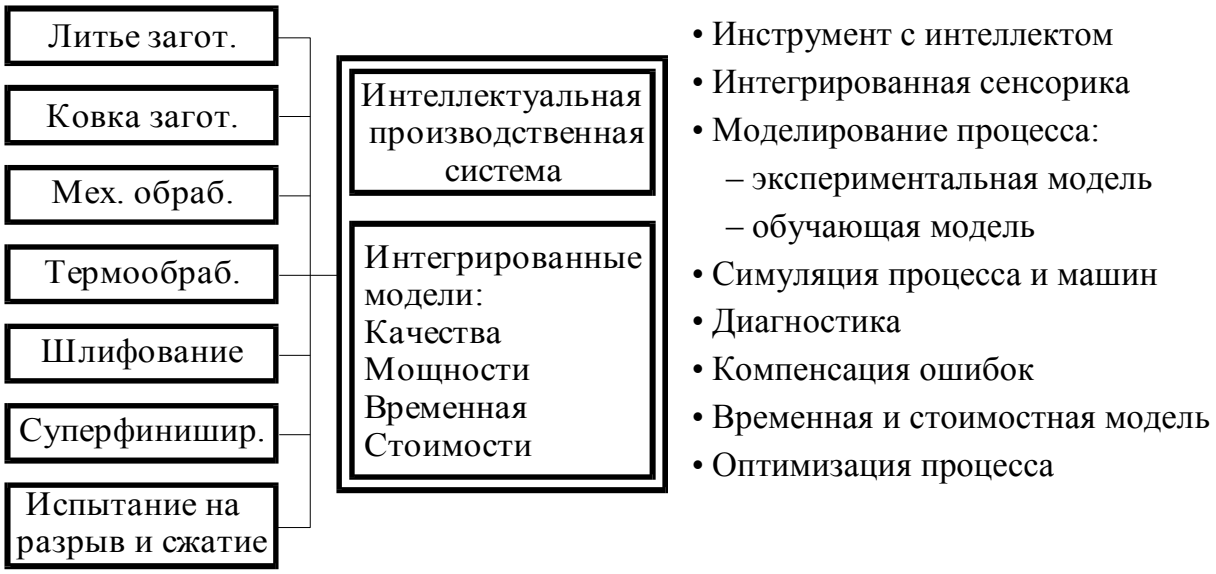


Рисунок 12.3 – Прецизионная обработка с техническим интеллектом

Основой всех этих действий является измерительная техника. Сегодня существует множество типов мерительной техники, необходимой для регулирования процесса, которые могут в дальнейшем позволить оптимизировать процесс. Во время процесса можно регистрировать температуры, силы, механический шум, колебания и износ. Среди мерительной техники выделяется пьезотехника. Измерения температуры в процессе обработки по-прежнему затруднено. Регулировку процесса возможно осуществлять сегодняшней техникой, измеряя величины: размеры, отклонения формы и положения; могут выполняться измерения как свободного

разрушения, учет геометрии или разрушений и характеристик изменений в краевой зоне с применением традиционной техники.

Общей проблемой при регулировании процесса является определение термовлияния. СОТС в одиночку не может компенсировать влияние тепла на точность. Из-за невозможности контролировать тепло в зоне, нельзя и регулировать процесс должным образом, поэтому возникают отклонения от заданного размера, а также изменения в структуре материала. Здесь можно порекомендовать только лишь имитацию как метод управления процессом. Необходимо определять зону термического влияния еще перед процессом, чтобы достигать компенсации за счет кинематики и установки параметров процесса.

Возможно применение метода конечных элементов. Этот метод позволяет разбивать воздействие на частичные элементы, описываемые своими дифференциальными уравнениями. Аналогично этому может моделироваться также процесс шлифования. Устранением отдельных элементов, влияющих на процесс, возможно выявить влияние каждого параметра, например, влияние скорости, источника тепла, силы на качество отдельного изделия.

Количество тепла и соответственно значения температур должны устанавливаться экспериментально. Имитация будет, как правило, OFF-LINE, т. е. выполнена перед процессом (не в режиме реального времени).

12.4. Функции техники для нанесения покрытий

В классической технологии изготовления иногда пренебрегают возможностями, связанными с нанесением покрытий. Такие технологии чаще всего обладают потенциалом для улучшения и возможностью регулирования цены. Поэтому здесь рекомендуется применение технического интеллекта (рис. 12.4).

Наука подошла к истокам многообещающего метода превинтивной оптимизации на базе расширения фундаментальных исследований и моделирования. Это такие направления, как:

– осаждение новых материалов, например, осаждение легированных слоев;
– получение очень чувствительных слоев (слои, обладающие интеллектом);
– нанесение парциальных покрытий;
– UP-скалинг (нанесение массивных покрытий);
– способы In-SItu-MBB — техники измерений;
– моделирование и имитация процесса;
– установки с программируемыми параметрами процесса;
– интеграция способов, гибридные технологии;

– децентрализация техники нанесения покрытий.

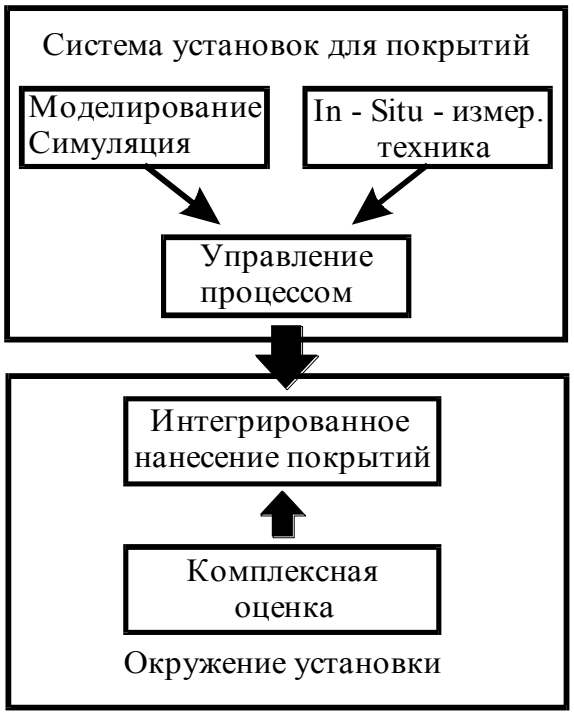


Рисунок 12.4 – Техника нанесения покрытий с техническим интеллектом

Схема (рис. 12.4) указывает на сегодняшние возможности техники для нанесения покрытий в производстве изделий с новыми функциональными качествами. Стало возможным создание новых материалов, очень чувствительных слоистых систем, частичных или массивных покрытий. Вся эта техника требуют крайне точного управления процессом, где особое место принадлежит применению технического интеллекта. Для этого необходимы системы имитации и дефиниции этапов процесса, а также IN-SITU имитация. Измерительная техника для релевантных параметров может быть реализована в качестве интеллектуальной техники, которая дает возможность улучшать процесс за счет управления.

Дальнейшее развитие связано с интеграцией техники для нанесения покрытий в цепочке изготовления элементов конструкций.

Получаемые различными методами покрытия обеспечили существенное повышение эффективности применения режущих инструментов из быстрорежущих сталей, твердых сплавов и керамики. Модернизация установок для покрытий, развитие технологии их синтеза создают предпосылки для разработки новых принципов модификации материала поверхностных слоев инструмента и их свойств. К этим свойствам относятся твердость, теплостойкость, адгезия к обрабатываемым материалам, устойчивость против коррозии и окисления при высоких температурах, прочность при высоких

механических и термических нагрузках и т. д.

Новейшие технологии позволяют синтезировать многослойные композиционные покрытия на основе одинарной, двойной и тройной связи металлов IV÷VI группы таблицы Менделеева (карбиды, нитриды, бориды, окислы и др. комбинации). Толщина каждого слоя подобных многослойных систем может составлять несколько нанометров, когда дефекты минимальны, а, значит, достижимы «теоретические» значения прочности. Новые возможности для модификации свойств рабочих поверхностей инструмента открывает комбинация химических (CVD) и физических (PVD), термохимических (TCP), ионных (IP) и лазерных (LP). Каждая из названных технологий имеет присущие ей достоинства и недостатки, области эффективного применения и т. д. Комбинация ионно-плазменного синтеза с лазерными технологиями и ионной имплантацией позволяет создать новые высокоэффективные технологии модификации свойств поверхностных слоев инструмента, работоспособность которого будет намного выше традиционного. Расширяется диапазон модификации и глубины модифицированных слоев. Эти технологии расширяют практические возможности конструирования поверхности инструмента с наперед заданными свойствами.

12.5. Миниатюризация производства

В последнее время наблюдается тенденция к миниатюризации техники. С одной стороны она должна обеспечивать качественную работу, не смотря на свою миниатюрность, а с другой стороны это должно быть экономически целесообразно. Полное моделирование процессов и точное управление процессами требует продвижение вперед до элементарных процессов и механизмов и одновременно прогресс требует технику высшей точности, применяемую в машинах и оборудовании. И вместе с тем развитие такой техники является ключом к росту экономики. Перспективы развития техники представлены на рис. 12.5.

Рисунок изображает обобщенное представление будущей концепции производства системной техники, которая должна быть доведена до элементарных формы и функций. Это связано с миниатюризацией и одновременно с децентрализацией и интеграцией функций. Ключевые технологии будущего должны интегрировать механику и сенсорику, а также информационную технику, которая управляет структурными элементами процесса и имеет элементы собственного интеллекта.

Примеры в нижней части рисунка указывают на этот структурный принцип будущих технических продуктов. Точность технических компонентов будет сильно возрастать.

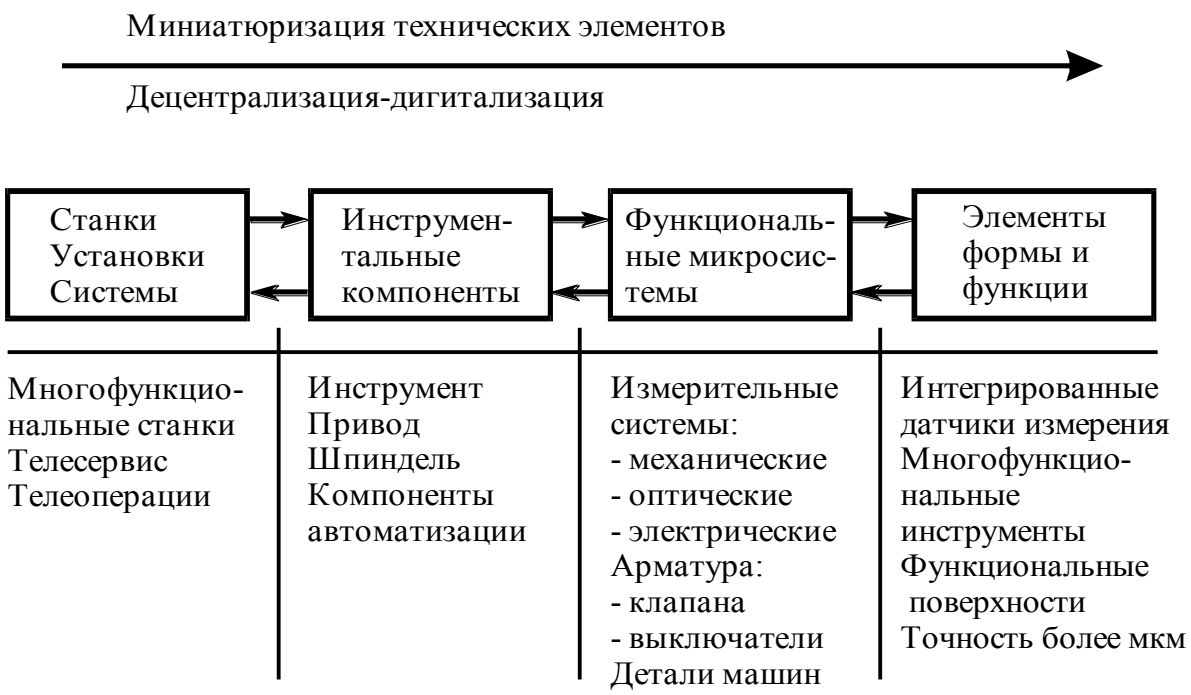


Рисунок 12.5. Миниатюризация машин и устройств

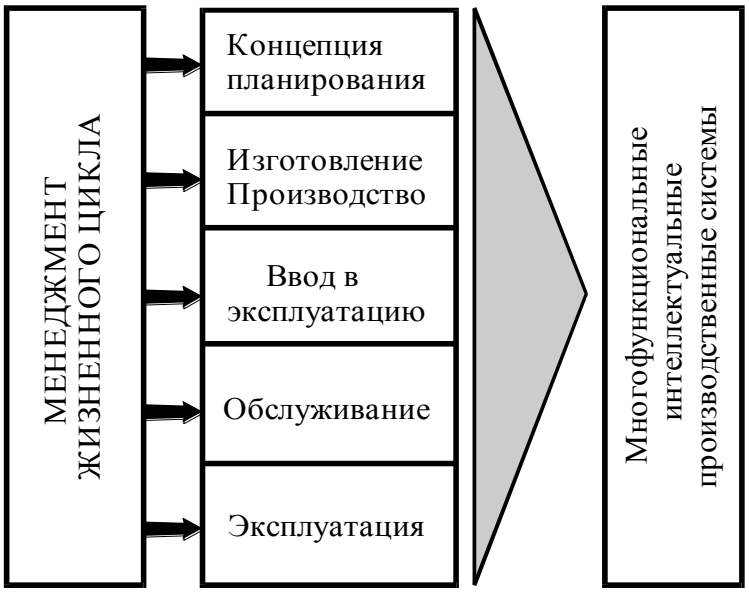
Необходимы новая технология производства, новые концепции изготовления, сборки и логистики, а также новая техника наблюдения за процессом.

Сейчас рационально не исходить из уровня сегодняшней микротехнологии, а основываться на потенциальном применении таких компонентов, которые обеспечивали бы получение принципиально новых функций и носителей функций. При этом разработана так называемая индустрия оснащения, т. е. индустрия, которая обеспечивает компоненты и конструктивные элементы для производства. Здесь лежит центральный ключ успешной интеграции технического интеллекта в продукты будущего. В этих областях нужно реализовать технологии изготовления, которые ведут к недорогому и качественному получению компонентов.

Примеры из применения техники таких инструментов прецизионной обработки, технологий покрытий, могут быть достаточными, чтобы пояснять тенденции развития и значение технического интеллекта для технологии изготовления. Много примеров такого же типа можно наблюдать в технологии литья, обработки давлением, обработки лучом или автоматизации можно приводить бесконечно. В этом ряду миниатюризация стоит на первом месте. Правильное построение структуры и стандартизация могут ускорить ее внедрение.

12.6. Выявление новых потенциалов снижения стоимости

С растущим техническим интеллектом и его присутствием в машинах связаны новые потенциалы снижения стоимости для всего машиностроения и, особенно для оборудования фабрик и заводов. Рис. 12.6 дает объяснения подобных потенциалов, которые могут отразиться в будущем цикле жизни продуктов.



Применение новых технологий
- Многофункциональность
- Системы симуляции
- Объемная анимация
- Адаптивные системы управления
- Безошибочное производство
- Применение мультимедиа
- Обучаемость
- Удаленная диагностика
- Телесервис
- Телеоперации

Рисунок 12.6 – Многофункциональные производственные системы

Возможность дополнительного потенциала снижения стоимости основывается на двух тенденциях развития. С одной стороны технический интеллект, как наблюдение за сиюсекундным состоянием процесса и процесса изготовления, вплоть до элементарных актов. Дальнейшее воспроизводство дигитализированных систем, создание производственных систем коммуникаций позволяет охватывать отдаленные машины и устройства. На этой основе могут предлагать свои услуги обширные дополнительные технические службы. Они охватывают и обеспечивают быстрый сервис и диагностику, телеконсультинг, планирование производства, имитацию и многое другое. Машины и оборудование могут оставаться в цепи производителя.

В связи с возрастающей сложностью машин особо важное значение приобретает их правильная конфигурация и установка. Это требует всемирной совместимости техников и инженеров, которые могут выступать в качестве виртуальных экспертов. Производитель может обращаться к ним как к виртуальным или реальным носителям знаний, способным оценить технологию, функции и применение их машин.

12.7. Вопросы для самостоятельного контроля

1. Как вы представляете дальнейшее развитие рабочих процессов высоких технологий?
2. В чем вы видите достоинства комбинированных методов обработки?
3. В чем вы видите достоинства комбинированных методов получения поверхностей?
4. Как вы понимаете суть гибридных и комбинированных рабочих процессов?
5. Что такое технический интеллект? Оборудование с техническим интеллектом?
6. Какова идея создания режущего инструмента с "интеллектом"?
7. Какова возможная роль миниатюризации производства?
8. Каковы новые потенциалы снижения стоимости производства?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ПО КУРСУ

1. Робочі процеси високих технологій в машинобудуванні: Підручник / Грабченко А.І., Верезуб М.В., Внуков Ю.М., Мельничук П.П., Виговський Г.М. / За ред. А.І. Грабченка. - Житомир: ЖДТУ, 2003. - 451 с.

2. Интегрированные генеративные технологии : учеб. пособие [для студ. выс. учеб. заведений] / А.И. Грабченко, Ю.Н. Внуков, В.Л. Доброскок [и др.] ; под ред. А.И. Грабченко. - Харьков: НТУ "ХПИ", 2011. - 416 с.

3. Интегрированные технологии ускоренного прототипирования и изготовления: 2-е изд., перераб. и доп. / Товажнянский Л.Л., Грабченко А.И., Чернышов С.И., Верезуб Н.В., Витязев Ю.Б., Доброскок В.Л., Кнут Х., Лиерат Ф. / Под. ред. Товажнянского Л.Л., Грабченко А.И. - Х.: ОАО "Модель Вселенной", 2005. - 224 с.

Дополнительная литература

4. Дьяконов В.П. Maple 7: Учебный курс. СПб.: Питер, 2002. - 672 с.

5. Рабочие процессы высоких технологий в машиностроении: Уч. пособие / Под. ред. А.И. Грабченко. - Харьков: ХГПУ, 1999. - 436 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Лекция 1 ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ 2
1.1. Концепция компьютеризированного интегрированного производства 4
1.2. Концепция «Тощего производства» - «Lean Production» 7
1.3. Концепция CIM второго поколения 9
1.4. Надежность технологических процессов 10
1.5. Организационные структуры промышленного производства 11
1.6. Вопросы для самостоятельного контроля 13
Лекция 2 ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИХ РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ 14
2.1. Высокие технологии в машиностроении 14
2.2. Рабочие процессы ВТ 18
2.3. Примерный порядок разработки рабочих процессов ВТ 21
2.4. Вопросы для самостоятельного контроля 21
Лекция 3 РЕЗАНИЕ АЛМАЗНЫМИ ЛЕЗВИЙНЫМИ ИНСТРУМЕНТАМИ 23
3.1. Характеристика алмазного лезвийного инструмента 23
3.2. Особенности контактных процессов 26
3.3. Стружкообразование 27
3.4. Силы резания 27
3.5. Тепловые явления 28
3.6. Износ и стойкость алмазных резцов 29
3.7. Качество поверхности 30
3.8. О выборе критерия износа алмазных резцов 30
3.9. Перспективы развития и применения 31
3.10. Вопросы для самостоятельного контроля 32
Лекция 4 РЕЗАНИЕ ЛЕЗВИЙНЫМИ ИНСТРУМЕНТАМИ ИЗ СВЕРХТВЕРДЫХ НИТРИДОВ БОРА 33
4.1. Контактные процессы 33
4.2. Особенности стружкообразования 34
4.3. Силы резания 35
4.4. Тепловые явления 35
4.5. Износостойкость инструмента 36
4.6. Качество поверхности 37
4.7. Резание при периодических нагрузках 39
4.8. Применение инструмента из сверхтвердых нитридов бора 40
4.9. Вопросы для самостоятельного контроля 40

Лекция 5 РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ 42
5.1. Характеристика сверхтвердых материалов 43
5.2. Физические предпосылки эффективности процесса алмазного шлифования СТПМ 44
5.3. Основные закономерности разрушения СТПМ в процессе алмазного шлифования 45
5.4. Взаимосвязь выходных показателей шлифования и параметров рабочей поверхности кругов 48
5.5. Структурно-топографическая приспосабливаемость РПК и оптимизация процесса 49
5.6. Комплексное управление рабочим рельефом и профилем рабочей поверхности круга 50
5.7. Закономерности алмазного шлифования СТПМ с управлением РПК и универсальность его принципов 53
5.8. Перспективы развития процесса шлифования с комплексным управлением РПК 55
5.9. Вопросы для самостоятельного контроля 56
Лекция 6 ПРЕЦИЗИОННОЕ РЕЗАНИЕ ПОЛИМЕРОВ 58
6.1. Характеристика оптических полимеров и изделий 58
6.2. Механика резания полимеров 61
6.3. Устойчивость технологической системы при обработке полимерных оптических изделий 62
6.4. Тепловые явления 64
6.5. Износостойкость режущего инструмента 65
6.6. Качество обработанной поверхности и эксплуатационные свойства оптических полимерных изделий 65
6.7. Оптимизация процесса 67
6.8. Вопросы для самостоятельного контроля 68
Лекция 7 РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ, БАЗИРУЮЩИЕСЯ НА ВЫСОКОСКОРОСТНОМ РЕЗАНИИ 69
7.1. Понятие о высокоскоростном резании 69
7.2. Физические особенности высокоскоростного резания 70
7.3. Износ инструмента 73
7.4. Применение СОТС и сухое высокоскоростное резание 74
7.5. Характеристика выходных показателей 75
7.6. Вопросы для самостоятельного контроля 77

Лекция 8 ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ 78
8.1. Диагностические системы технологических процессов 78
8.2. Диагностика процессов лезвийной и абразивной обработки 82
8.3. Диагностические системы контроля прецизионных процессов 86
8.4. Вопросы для самостоятельного контроля 87
Лекция 9 РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННОГО СИНТЕЗА МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ 88
9.1. Ионное (катодное) распыление 90
9.2. Ионно-термическое нанесение покрытий 91
9.3. Синтез покрытий из плазмы электродугового разряда с горячим катодом 92
9.4. Синтез покрытий из плазмы электродугового разряда с холодным катодом 93
9.5. Синтез многослойных ионно-плазменных покрытий в одновакуумном цикле 93
9.6. Основные сведения о конструкциях электродуговых источников плазмы 95
9.7. Ионно-плазменные технологии синтеза покрытий режущих инструментов 96
9.8. Методы оценки качества синтезируемых покрытий 99
9.9. Работоспособность режущих инструментов с покрытиями 102
9.10. Вопросы для самостоятельного контроля 102
Лекция 10 ЭКОЛОГИЧЕСКИ ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ 104
10.1. Основные направления снижения отрицательного влияния СОТС на окружающую среду 105
10.2. Применение способов эффективного обезвреживания СОТС 107
10.3. Применение модифицированных и альтернативных СОТС 108
10.4. Минимизация подачи СОТС в зону резания 110
10.5. Сухое резание 112
10.6. Вопросы для самостоятельного контроля 115
Лекция 11 ХАРАКТЕРИСТИКА СРЕДСТВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ 116
11.1. Технологическое оснащение 116
11.2. Средства контроля поверхностей и поверхностного слоя 116
11.3. Вопросы для самостоятельного контроля 122

Лекция 12 ПАРАДИГМЫ ПРОИЗВОДСТВА БУДУЩЕГО. ПЕРСПЕКТИВЫ ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕХНИЧЕСКОГО ИНТЕЛЛЕКТА 123
12.1. Применение технического интеллекта в технологии изготовления 125
12.2. Роль «интеллектуальных» инструментов 126
12.3. Адаптивные и обучающиеся станки 128
12.4. Функции техники для нанесения покрытий 130
12.5. Миниатюризация производства 132
12.6. Выявление новых потенциалов снижения стоимости 134
12.7. Вопросы для самостоятельного контроля 135
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ПО КУРСУ 136