



# Содержание

|   |     |
|---|-----|
| <b>Введение</b> .....   | 8   |
| <b>Глава 1. Микрообработка резанием</b> .....   | 12  |
| 1.1. Особенности технологии микрообработки резанием.....  | 12  |
| 1.2. Оборудование для микрообработки резанием .....   | 16  |
| 1.2.1. Металлорежущие станки для фрезерования .....   | 16  |
| 1.2.2. Металлорежущие станки для комплексной<br>обработки.....                                      | 18  |
| 1.2.3. Оборудование для наноразмерной обработки .....   | 20  |
| 1.2.4. Технологическая оснастка.....  | 22  |
| 1.3. Сверление .....  | 28  |
| 1.3.1. Применение микросверл .....  | 29  |
| 1.3.2. Сверление глубоких микроотверстий .....  | 30  |
| 1.3.3. Сверление отверстий в подложках микросхем .....  | 34  |
| 1.3.4. Сверление деталей точного приборостроения.....   | 39  |
| 1.3.5. Обработка микроотверстий физико-химическими<br>способами .....                               | 44  |
| 1.4. Обработка малоразмерных деталей на токарных<br>автоматах с ЧПУ .....                           | 52  |
| 1.4.1. Унификация элементов инструментальных<br>комплектов для обработки малоразмерных деталей..... | 55  |
| 1.4.2. Растачивание точных отверстий.....   | 63  |
| 1.4.3. Диагностирование процесса обработки .....  | 66  |
| 1.5. Фрезерование .....   | 73  |
| 1.5.1. Оптимизация геометрии микрофрез .....  | 76  |
| 1.5.2. Микрообработка деталей часов .....   | 82  |
| 1.5.3. Эффективность применения алмазоподобных<br>покрытий на микрофрезах.....                      | 86  |
| 1.5.4. Диагностирование и контроль микрофрезерования .....  | 91  |
| 1.6. Нанорезание оптики .....   | 98  |
| 1.6.1. Растачивание массивов микролинз профильным<br>алмазным резцом.....                           | 100 |
| 1.6.2. Алмазное фрезерование деталей оптики из хрупких<br>материалов .....                          | 104 |
| 1.6.3. Шлифование деталей приборов .....  | 105 |
| 1.7. Лазерная микрообработка.....   | 111 |
| <b>Глава 2. Аддитивные технологии</b> .....   | 119 |
| 2.1. Оборудование для аддитивных технологий.....  | 120 |
| 2.2. Производство порошков для аддитивных технологий .....  | 124 |

|  |            |
|--|------------|
| 2.3. Селективное лазерное спекание керамических микродеталей .....             | 126        |
| 2.4. Стереолитография (технология SLA) .....                                   | 131        |
| 2.5. Искровое плазменное спекание порошков .....                               | 135        |
| 2.6. Получение отливок микродеталей из порошка .....                           | 140        |
| <b>Глава 3. Наноструктурные покрытия микроинструмента .....</b>                | <b>145</b> |
| 3.1. Свойства и применение нанопокровтий .....                                 | 145        |
| 3.2. Методы нанесения нанопокровтий .....                                      | 150        |
| 3.2.1. Осаждение нанопокровтий .....   | 150        |
| 3.2.2. Ионно-плазменное нанесение .....  | 153        |
| 3.2.3. Молекулярно-лучевая эпитаксия .....                                     | 154        |
| 3.2.4. Импульсное лазерно-плазменное напыление .....                           | 157        |
| 3.2.5. Ионное легирование .....  | 158        |
| 3.3. Износостойкость твердосплавных фрез с нанопокровтием .....                | 160        |
| 3.4. Нанесение нанопокровтий на керамический инструмент .....                  | 168        |
| <b>Глава 4. Инструментальное обеспечение микрообработки .....</b>              | <b>175</b> |
| 4.1. Инструментальные системы для микрообработки резанием .....                | 176        |
| 4.1.1. Инструментальные системы для микрофрезерования .....                    | 176        |
| 4.1.2. Инструментальные системы токарных автоматов с ЧПУ .....                 | 182        |
| 4.1.3. Инструментальная система для крупногабаритных изделий .....             | 186        |
| 4.2. Автоматизация инструментального обеспечения микрообработки .....          | 191        |
| 4.2.1. Изготовление упаковки для вспомогательного инструмента .....            | 191        |
| 4.2.2. Кодирование упаковки (тары) для малоразмерного инструмента .....        | 194        |
| <b>Глава 5. Контроль размеров и параметров поверхностей микродеталей .....</b> | <b>198</b> |
| 5.1. Контрольно-измерительные машины .....                                     | 198        |
| 5.2. Средства измерений параметров наноразмерных объектов .....                | 205        |
| 5.2.1. Средства экспериментального исследования наноструктур .....             | 206        |
| 5.2.1.1. Электронная микроскопия .....   | 207        |

|  |     |
|--|-----|
| 5.2.1.2. Сканирующая зондовая микроскопия.....                             | 208 |
| 5.2.1.3. Атомно-силовая микроскопия.....                                   | 211 |
| 5.2.1.4. Дифракционный анализ.....   | 213 |
| 5.2.1.5. Рентгеноструктурный анализ.....                                   | 215 |
| 5.2.1.6. Спектральные методы.....  | 215 |
| 5.2.2. Фракционный анализ нанопорошков.....                                | 216 |
| 5.2.3. Измерение твердости и модуля упругости<br>в поверхностном слое..... | 217 |
| 5.2.4. Меры длины в наноразмерном диапазоне.....                           | 220 |
| <b>Заключение</b> .....  | 223 |
| <b>Литература</b> .....  | 226 |
| <b>Приложение.</b> Список фирм, упомянутых в книге.....                    | 233 |

## Введение

Миниатюризация изделий позволяет повысить количество интегрированных функций, надежность, функциональность, удобство изделий, снизить их вес и стоимость, а также понизить потребление энергии и ресурсов в процессе производства и эксплуатации. К таким изделиям можно отнести: медицинские приборы и импланты, изделия для авто- и авиастроения, оптической промышленности, коммуникационных технологий, бытовую электронику и средства связи. В связи с этим актуальными тенденциями являются изготовление микроизделий и функциональных поверхностей, имеющих сложную структуру.

К микрообработке относятся способы изготовления, технологии, оборудование, организационные стратегии и системы для производства микродеталей (рис. 1) или изделий, которые имеют обрабатываемые поверхности с размерами в субмиллиметровом диапазоне (рис. 2).

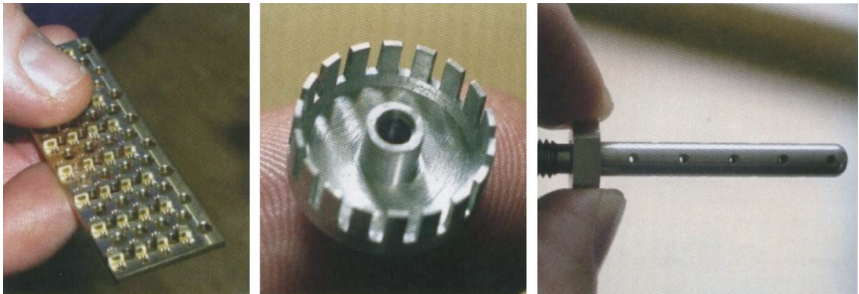


Рис. 1. Примеры микродеталей

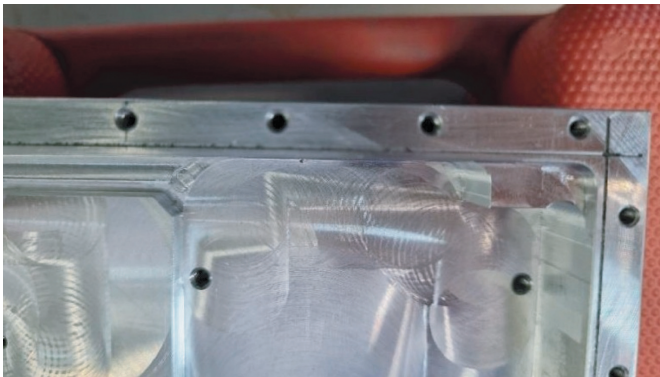


Рис. 2. Микроканавка для размещения уплотнения с радиусом 250 мкм по периметру детали с габаритами 300×300 мм

Одновременно с уменьшением типоразмеров средств связи и управления возросла сложность изготовления этой техники, что потребовало освоения наноразмерной технологии.

Чтобы удовлетворить всевозрастающую потребность в микрокомпонентах и микродеталях и при этом сохранить производственные расходы на низком уровне, такие детали изготавливаются, помимо микрорезания, самыми современными методами, такими как высокоточные прессование и штамповка, электроэрозионная и лазерная обработка, аддитивные технологии, литье под давлением и т.п.

Тем не менее микрорезание, под которым понимают обработку с удалением слоя материала деталей со сложной геометрией в диапазоне размеров от 0,05 до 16 мм с помощью режущего инструмента, лидирует по экологичности и остается наиболее употребимым в серийном и единичном производстве.

Однако простой переход из области обычного резания в область микрорезания даже при хорошем владении технологическими процессами невозможен. Для этого необходимо в комплексе рассматривать следующие факторы: проектирование в среде CAD/CAM, перспективные направления в создании микротехники, возможности металлорежущих станков и их оснастки, факторы и условия обработки, материалы заготовок, параметры режущего инструмента и устройств для их установки.

Из-за большого числа оборотов, требуемых для осуществления микрорезания, в особенности решающим фактором для надежности процесса резания и качества обработки является исполнение шпинделя и точность концентрического вращения. Например, возможности металлорежущих станков и их оснастки работать с частотой вращения инструмента 10 тыс. мин<sup>-1</sup> неприемлемы для фрезы диаметром 0,1 мм, так как скорость резания около 3,2 м/мин будет слишком мала.

В то же время использование высокоскоростных шпинделей, дающих до 200 тыс. мин<sup>-1</sup>, требует высочайшей точности изготовления. Ведь из-за возникновения радиального биения не только радикально снижается качество обрабатываемой поверхности, но и стойкость микроинструмента из-за высоких температурных колебаний или вибраций.

В борьбе за высокую надежность значительно расширились возможности микрорезания при помощи современных технологий нанесения покрытий, особенно применительно к толщине и составу покрытий.

Системы покрытий, разработанные под конкретные задачи, делают возможным увеличение стойкости инструмента и объема снимаемой стружки, получение наилучшего качества обработки и оптимизирован-

ного технологического процесса. Одной из сложных задач, встающих перед поставщиками технологий нанесения покрытий, является нанесение как можно более тонкого, но в то же время твердого и гладкого покрытия с хорошей адгезией.

Наряду с этим проблематичным остается округление режущих кромок и повышенная шероховатость поверхности после нанесения покрытия вплоть до образования капель.

Для микрорезания чаще всего используются покрытия, базирующиеся на нитриде титана алюминия ( $TiAlN$ ), карбонитриде титана ( $TiCN$ ) или карбонитриде титана алюминия ( $TiAlCN$ ). Для обработки таких материалов, как медь, латунь, мельхиор или алюминиевые сплавы, применяются покрытия на основе нитрида хрома циркония ( $ZrCrN$ ), которые чаще всего наносятся как многослойные покрытия.

Новые системы покрытий на основе нитрида кремния ( $SiN$ ), особенно для обработки закаленных и высоколегированных сталей, состоят из нанокompозитов с высоким содержанием нитритов. Эти композитные покрытия состоят из нанокристаллических зерен, которые встроены в аморфную матрицу.

Компоненты покрытия при этом не смешиваются, а интегрированы в качестве связки в матрицу из нитрида кремния ( $Si_3N_4$ ). Эти покрытия имеют предельную нанотвердость и очень высокую вязкость, а также хорошую адгезию к субстрату инструмента за счет низких внутренних напряжений в покрытии.

Твердосплавный инструмент с алмазным покрытием (тонкая CVD-пленка) уже имеет хорошую репутацию в макрорезании, и этот опыт переносится на процесс микрорезания и успешно там используется. Комбинация новых покрытий после тщательной предварительной обработки делает инструмент с алмазным покрытием экономически выгодным для микрообработки.

Из-за широкой области применения микрорезания существенно возросли требования к инструменту и его разнообразию. При помощи оптимизации старых и создания новых моделей производители прецизионного микроинструмента значительно расширили возможности микрорезания. Изготовители микродеталей имеют в распоряжении микроинструмент с широкой номенклатурой исполнений с различной геометрией режущих частей.

Имеются микрофрезы разнообразных диаметров с различными углами подъема винтовой линии и специальной геометрией инструмента. За счет новой геометрии инструмента и режущих кромок они подходят для изготовления глубоких канавок и сложных профилей в твердых

материалах, так как снижаются вибрации и возрастает динамическая стабильность при фрезеровании с большим вылетом.

В сфере обработки отверстий поставляются микросверла и микроразвертки, которые применяются для изготовления форсунок. Ассортимент пополняется сверлами для глубокого сверления и многофункциональными микроинструментами для устранения заусенцев, центрования и зенкерования, то есть почти для всех областей применения в микрорезании.

Микрообработка давно вышла из лабораторий научно-исследовательских институтов. Если на первых порах под микрорезанием подразумевалось преимущественно фрезерование, то теперь, благодаря инновационному оборудованию с ЧПУ, оборудованию для физико-химической обработки и наноразмерным средствам контроля, микрорезание расширило свои возможности вплоть до комплексной обработки самых сложных деталей за одну установку.

В предлагаемом учебном пособии представлены основные элементы производства микродеталей машиностроительного производства, медицинской техники, радиотехники и электроники, оптических приборов и режущего микроинструмента. Дано описание основных видов оборудования и унифицированных инструментов для обработки резанием заготовок микродеталей из основных применяемых конструкционных материалов.

Приведены сведения о режущем и вспомогательном инструменте и методах диагностирования состояния технологических процессов микрообработки. Дано представление о современных способах повышения надежности режущего инструмента путем нанесения антифрикционных покрытий на микроинструмент.

Современное состояние аддитивных технологий, применяемых в производстве микродеталей, включая виды прототипирования, особенности порошковых материалов и способы их спекания и литья под давлением, также отражены в данном учебном пособии.

Особое внимание уделено средствам контроля качества изготовленных микродеталей и состояния их поверхностей в нанометровом диапазоне размеров. Дано представление об особенностях поверки таких средств контроля и измерений.

Учебное пособие предназначено для будущих инженеров, обучающихся по направлению подготовки 15.05.01 «Проектирование технологических машин и комплексов» и будущих магистров науки и технологий, обучающихся по направлению подготовки 15.04.02 «Технологические машины и оборудование».



# ГЛАВА I

## МИКРООБРАБОТКА РЕЗАНИЕМ

### 1.1. Особенности технологии микрообработки резанием

В настоящее время изготовление сложных по профилю миниатюрных изделий и обработка поверхностей малой площади являются серьезной проблемой для различных отраслей оборонного и гражданского машиностроения. К таким изделиям относятся пресс-формы и штампы для изготовления деталей микрокомпонентов управляющих устройств, литьевые формы для изготовления пластмассовых микродеталей сложной геометрии, электроды для электроэрозионной обработки миниатюрных протезов и микроинструментов для малоинвазивной хирургии и др.

Под микрообработкой резанием далее понимается обработка миниатюрных изделий и обработка сложных по профилю поверхностей малой площади на крупных деталях (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Детали, изготавливаемые микрообработкой резанием

К миниатюрным изделиям будем также относить необходимый для микрообработки режущий инструмент, имеющий диаметр менее одного миллиметра, и соответствующие приспособления, входящие в инструментальные системы для микрообработки.

Для изготовления миниатюрных изделий широко применяются сверление и фрезерование малоразмерным инструментом. Эти процессы характеризуются повышенной сложностью, так как происходят при переменных факторах в каждый момент времени рабочего хода. Пропуск отказа при обработке малоразмерными сверлами и концевыми фрезами очень часто приводит к их поломке.

Отказы инструмента при микрообработке резанием, как правило, полные, то есть требующие немедленного прекращения резания, и неполные (возможно кратковременное резание). Это обусловлено очень малым различием между силой резания и соответствующим крутящим моментом, необходимыми для преодоления сил сопротивления резанию, и силами, определяющими начало разрушения тела инструмента.

Поэтому для надежности микрообработки резанием в условиях автоматизированного производства необходимо создание и внедрение в технологическое оборудование систем диагностирования состояния режущего инструмента и контроля процесса резания.

Диагностирование состояния режущего инструмента в процессе резания осуществляется в результате сравнения действительного значения параметра или параметров процесса резания с предельно допустимым значением, устанавливаемым субъектом управления.

С целью обеспечения более высокой надежности процесса обработки путем диагностирования состояния режущего инструмента по косвенному диагностическому признаку необходимо назначать режимы резания, дающие большую вероятность безотказной работы режущего инструмента.

Повышение универсальности инструмента предусматривает его работу на разных глубинах резания и подачах, а также возможность «смены ролей» главной и вспомогательной режущих кромок, что усложняет структуру отказов за счет появления повреждения и затем отказов различной локализации.

Поэтому установление косвенных диагностических параметров, в наибольшей степени взаимосвязанных с критерием отказа или являющихся наиболее чувствительными к его изменению, в микрообработке резанием является крайне сложной, практически неразрешимой задачей.

Поэтому чаще используют метод непосредственного наблюдения за положением малоразмерных сверл и концевых фрез в рабочем пространстве. При этом контролю подвергаются не только размеры детали, но и позиция вершины инструмента относительно торца шпинделя. Также под контролем находятся температурные деформации шпинделя станка с целью компенсировать его тепловое расширение.

Для микрообработки применяются высокоточные станки, которые обеспечивают точное позиционирование инструмента, а также его минимальное биение. Данные станки снабжают специальными оптическими, контактными, а также бесконтактными измерительными системами. При уровне увеличения в 400 раз рабочей зоны при микрофрезеровании и микросверлении достигается требуемая точность обрабатываемых деталей.

Конструкция инструментальной системы для микрообработки, как правило, несложная, с небольшим числом деталей, но содержит высокоточные и сложнопрофильные соединения. В связи с этим инструмент приобретает дополнительные «слабые» места, которые в процессе эксплуатации получают повреждения, приводящие к отказам.

Экономичность инструментальной системы для микрообработки резанием и полнота использования всех ее ресурсов часто определяется шириной сферы ее применения. Применительно к малоразмерному режущему инструменту это, в первую очередь, предполагает использование инструментального материала, отвечающего группе критериев, таких как износостойкость, вязкая прочность, хрупкая контактная прочность и хрупкая объемная прочность.

При высокоточной микрообработке используются специальные устройства для зажима инструмента, имеющие монолитное, вращательно-симметричное строение, обеспечивает длительный срок службы шпинделя станка. Например, термический зажим хвостовика инструмента обеспечивает concentricity менее 0,003 мм при частоте вращения шпинделя до 60 000 мин<sup>-1</sup>, что наилучшим образом подходит для достижения необходимой скорости микрорезания.

Другой особенностью микрообработки является то, что при установке и транспортировке необходимо исключить вмешательство человека. Для этих целей разрабатывают специальную манипуляционную технику для перемещения микроинструментов и миниатюрных деталей, включающую микроскопы и многокоординатных роботов. В конструкциях роботов используют манипуляторы с механическим и гидравлическим приводами, а также пьезоманипуляторы.

Наиболее простыми являются механические микроманипуляторы с точностью позиционирования 0,1–5 мкм, построенные на базе высо-

коточных прецизионных винтов. Более точными являются гидравлические микроманипуляторы, которые преобразуют механические усилия, создаваемые в специальном дистанционном управляющем устройстве, в давление на манипуляторную мембрану. Гидравлика обеспечивает высокоточные плавно редуцируемые движения манипулятора.

Например, в нанопрецизионном станке мод. МК6510 конструкции ОАО «Красный Пролетарий» с гидроманипулятором обеспечивается обработка торцовых поверхностей металлооптики с шероховатостью  $R_a$  0,0025 мкм и точностью размеров в пределах 0,1 мкм.

Как было указано выше, основными видами миниатюрного инструмента для микрообработки резания являются концевые фрезы и сверла. Концевая фреза является одним из основных инструментов для микрообработки за счет широкой области применения: для обработки пазов, уступов с взаимно перпендикулярными поверхностями, для контурной обработки заготовок и др.

Учитывая особенности процесса микрообработки, к фрезам предъявляют особые требования, главным из которых является высокая точность изготовления инструмента. Концевые фрезы для микрообработки в силу их конструктивных особенностей и условий резания изготавливаются монолитными заодно с цилиндрическим хвостовиком, реже — в виде коронок и вставок, соединяемых пайкой со стальным хвостовиком. Для повышения точности микрообработки и экономии дорогостоящего обрабатываемого материала фрезы имеют упрощенную форму стружечных канавок.

Для изготовления малоразмерных концевых фрез и сверл диаметром 0,12...3,0 мм с общей длиной 30–140 мм и длиной рабочей части 0,35–22 мм для микрообработки резанием используется метод скоростной вышлифовки профиля канавок и зубьев алмазными кругами на металлической связке на шлифовально-заточных 5-координатных станках с ЧПУ.

Совокупность и правильность перемещений при многопроходном шлифовании обеспечивает получение заданной формы винтовой поверхности канавки изготавливаемого режущего инструмента, а также заданные геометрические параметры режущей части инструмента.

Для повышения точности изготовления микроинструмента применяют специальные комбинированные измерительные системы, состоящие из оптики и микрошупа, способные осуществлять позиционирование в нанодиапазоне и измерение с точностью 50 нм.

## 1.2. Оборудование для микрообработки резанием

### 1.2.1. Металлорежущие станки для фрезерования

Эти станки оснащаются электрошпинделями на воздушных подшипниках с верхним пределом частоты вращения  $120\,000\text{ мин}^{-1}$  со скоростями подачи от  $2,5\text{ мм/мин}$ , точностью и повторяемостью позиционирования в пределах  $\pm 1\text{ мкм}$  с помощью стеклянных шкал, имеющих разрешение  $0,1\text{ мкм}$  по всем осям. Для охлаждения инструмента применяется туман на основе растительного масла, который обеспечивает также смазку и удаление стружки. Минимальный размер обрабатываемой детали определяется приспособлением, установленным на столе и применяемым режущим инструментом.

Конструкции многих обрабатывающих центров (ОЦ), предназначенных для микрофрезерования, обеспечивают автоматизацию процесса изготовления детали, а также контроль вибраций с представлением уровня колебаний на мониторе системы ЧПУ. Как правило, в качестве опций предлагается термостабилизация и стол, приспособленный для фиксации спутников и многопозиционный накопитель спутников в стандартном исполнении. Модифицированная порталная конструкция обеспечивает фронтальный доступ к зоне обработки и смену спутников сзади. Вместо устройства смены спутников может использоваться робот (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Типичная компоновка ОЦ с ЧПУ по 5 осям и с 7-местным магазином для автоматической смены инструмента



Рис. 1.3. ОЦ с интегрированным лазером



Рис. 1.4. Станок для микрообработки Roeders RXP 300

В ряде конструкций ОЦ имеется встроенный лазер для точечной сварки и профильной резки плоских микродеталей типа зубчатых колес (рис. 1.3).

Наиболее массовые станки для микрообработки оснащены шпинделями с максимальной частотой вращения  $50\,000\text{ мин}^{-1}$  с главным приводом мощностью порядка 3–4 кВт и имеют управление по 3 осям с линейными электроприводами. Максимальное значение скорости подачи по осям – 60 м/мин. Пример такого станка показан на рис. 1.4, а его характеристики приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Основные характеристики станка Roeders мод. RXP 300

|   |                        |
|---|------------------------|
| Рабочая зона X×Y×Z, мм                    | 320×300×200            |
| Размеры стола, мм                         | 370×350                |
| Диапазон подач, мм/мин                    | 0...30 000 (все оси)   |
| Мощность главного привода, кВт            | 3,4                    |
| Макс. частота вращения, мин <sup>-1</sup> | 50 000                 |
| Хвостовик инструмента                     | HSK-E25 по DIN 69893-5 |
| Макс. диаметр инструмента, мм             | 6,0                    |

Для получения открытой микропрофильной поверхности штампов и прессформ, состоящий из упорядоченного множества углублений и канавок различного типа применяют метод многопроходного микрострогания. Преимуществами этого метода перед профильным микрофрезерованием являются: а) автоматизированная микро- и чистовая обработка резцами со специальной геометрией; б) высокая точность (до  $\pm 25$  нм) формы и расположения поверхностей, в том числе ячеистых структур; в) более высокая производительность; г) возможность воспроизведения сочетаний линий плотностью свыше 33 линий на 1 мм.

Высокая точность микрострогания определяется тем, что обрабатываемую поверхность формируют режущие кромки резца, положение которых относительно заготовки определяется программированием ЧПУ.

### 1.2.2. Металлорежущие станки для комплексной обработки

Комплексная токарная обработки, внецентренная обработка отверстий и фрезерование малоразмерных деталей осуществляется токарными прутковыми автоматами с ЧПУ. Эти станки отличает высокая точность позиционирования инструмента с шагом до 0,001 мм и высокая производительность обработки за счет автоматизации подачи прутка, смены и подвода инструмента. В них предусмотрена 2-шпиндельная система автоматического перехвата детали для обработки деталей сложного профиля за один установ. Имеются автоматизированные системы подачи СОЖ и обслуживания технологического процесса (стружечный конвейер, конвейер сбора и перемещения готовых деталей в накопитель).

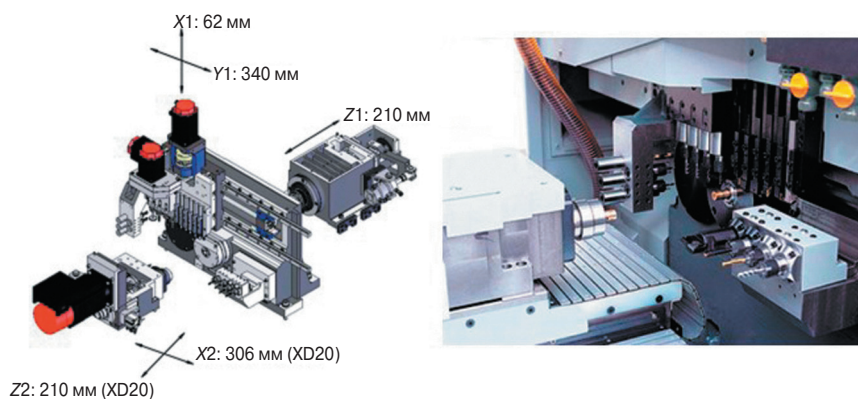
В основном применяются малогабаритные прецизионные станки «швейцарского типа» (Swiss type). Пример такого станка Hanwha XD20H фирмы Hanwha TechM (Республика Корея) приведен на рис. 1.5.





**Рис. 1.5.** Токарный прутковый автомат Hanwha XD20H с двумя шпинделями и системой линейных суппортов («швейцарский тип»)

На рис. 1.6 показана компоновка инструментальной зоны этого станка, а на рис. 1.7 представлена схема его главного суппорта.



**Рис. 1.6.** Компоновка инструментальной зоны токарного пруткового автомата с ЧПУ швейцарского типа



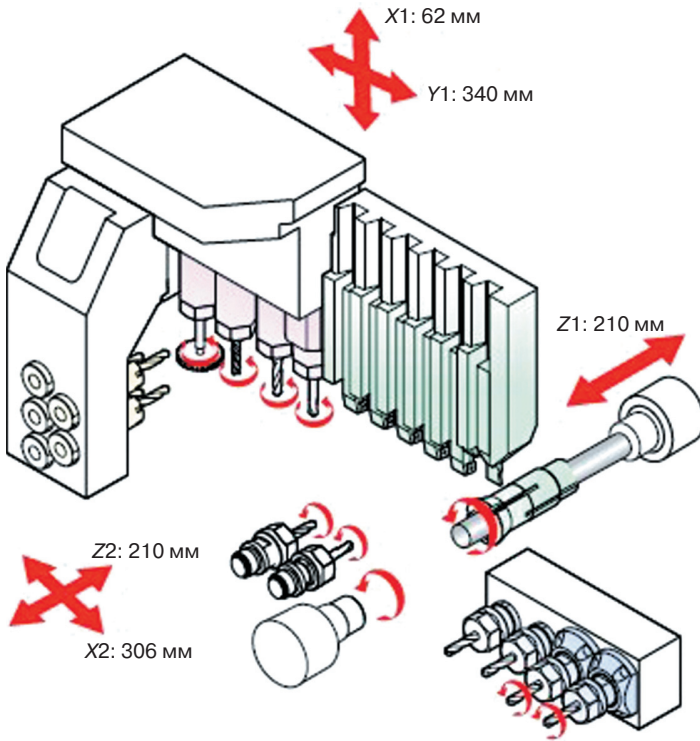


Рис. 1.7. Типовая схема главного суппорта пруткового автомата Hanwha XD20H

### 1.2.3. Оборудование для наноразмерной обработки

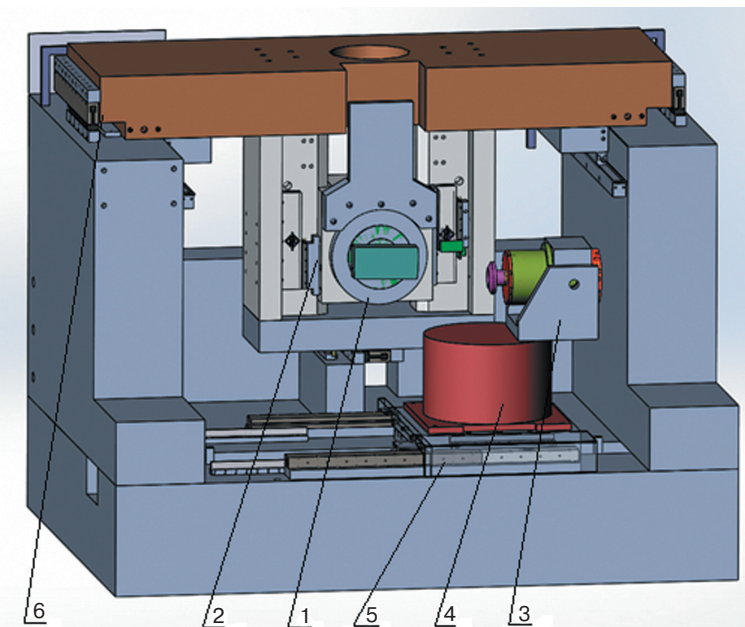
Для точения изделий оптики из хрупких материалов в режиме квази-пластичного резания [1] и достижения параметра шероховатости поверхности не более 1 нм и отклонения плоскостности не более 10 нм разработано оборудование для наноразмерной обработки.

Обработка деталей из хрупких материалов (оптических стекол, германия, кристаллов KDP) произвольной формы выполняется специальным алмазным монокристаллическим резцом с радиусом при вершине инструмента 0,1...2 мм и радиусом округления режущей кромки менее 0,8 мкм [2].

Необходимо соблюдать такие режимы, чтобы толщина срезаемой стружки была в пределах 10...100 нм, а глубина резания оставалась в пределах от нескольких нм до 2 мкм при скорости подачи порядка 10–20 мм/мин.

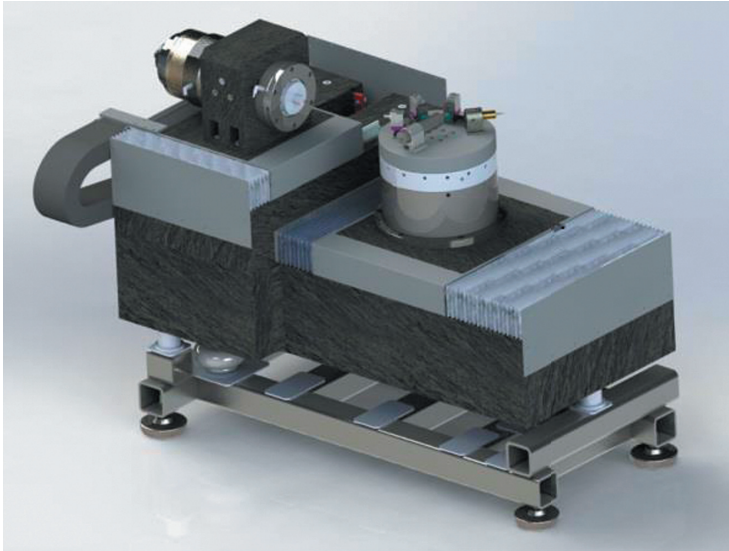
Для решения этих задач в конструкции станка для наноразмерной обработки использованы: а) аэростатические направляющие и опоры с пористым дросселированием и вакуумным натягом; б) системы виброизоляции с собственной частотой колебаний не более 5 Гц; в) электроприводы прямого действия на базе встроенных безвибрационных двигателей без деталей из металлов, содержащих железо в комплекте с датчиками обратной связи нанометрового разрешения [3].

Изготовлен экспериментальный стенд для обработки алмазным монокристаллическим инструментом поверхностей произвольной формы деталей из хрупких оптических материалов в режиме квазипластичного резания (рис. 1.8).



**Рис. 1.8.** Основные узлы стенда для квазипластичного алмазного точения: 1 – шпиндель заготовки; 2 – вертикальный суппорт; 3 – инструментальный шпиндель; 4 – поворотный стол инструментального шпинделя; 5 – поперечный суппорт; 6 – продольный суппорт

Методом квазипластичного резания с использованием алмазного круга можно получить оптическую поверхность практически любой формы при отсутствии поврежденного слоя. Вариант конструкции станка для осуществления такого метода показан на рис. 1.9.



**Рис. 1.9.** Вариант исполнения станка для обработки алмазным кругом поверхностей произвольной формы деталей оптики

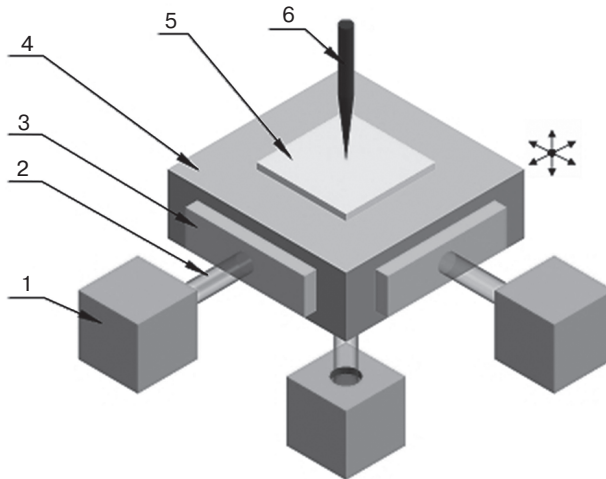
#### ***1.2.4. Технологическая оснастка***

Технологии обработки микродеталей с допусками в наноразмерном диапазоне невозможны без измерений наноперемещений. Для этого разработаны средств линейных перемещений в наноразмерном диапазоне с погрешностью менее 1 нм, а также созданы методы и средства их поверки и калибровки.

Основным узлом измерения наноперемещений является датчик линейного перемещения, используемый для точного позиционирования инструмента при изготовлении микродеталей и контроле их качества. На рис. 1.10 показан пример применения датчиков наноперемещений для измерения положения 3-координатного стола с нанометровой погрешностью.

Бесконтактные датчики-измерители относительного линейного перемещения с пороговой чувствительностью 0,05 нм позволяют следить за положением объекта,двигающегося со скоростью подачи до 60 мм/мин.

Датчик автоматически отслеживает проекцию кратчайшего расстояния от центра приемника до плоскости зеркала на ось измерительного луча и передает информацию об относительном перемещении по запросу с персонального компьютера (ПК) с помощью интерфейса USB. Диапазон измеряемых перемещений может достигать 1 метра.



**Рис. 1.10.** Установка с системой измерения положения 3-координатного стола: 1 – датчик перемещения; 2 – измерительный луч; 3 – плоское зеркало; 4 – трехкоординатный предметный столик; 5 – образец; 6 – зонд

Практическим примером интерферометрического измерителя наноперемещений является устройство, разработанное АО «Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума» (АО НИЦПВ, г. Москва), предназначенное как для измерения линейных перемещений в реальном масштабе времени, так и для калибровки систем сканирования и позиционирования. Диапазон измерений перемещений составляет от 1 нм до 10 мм с дискретностью отсчета 0,1 нм. Абсолютная погрешность измерений лежит в диапазоне 0,5...3 нм при максимальном значении скорости перемещения 3 мм/с.

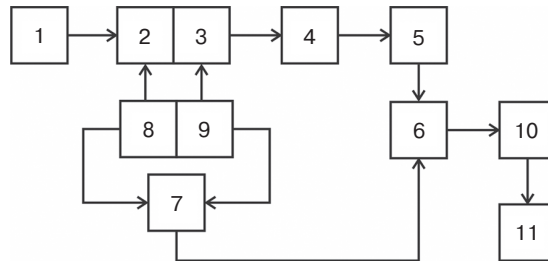
В устройстве использованы метод лазерной интерферометрии и средства измерений величины разности фаз – угла фазового сдвига в интерференционном поле между измерительным и опорным пучками, обусловленные частотной, пространственной или поляризационной дисперсией излучения в фазовом объекте.

Для обеспечения максимальной чувствительности и быстродействия применена схема измерений на основе лазерного интерферометра с частотой измерительного сигнала в радиодиапазоне. Это позволяет измерять фазовые сдвиги на уровне  $10^{-3}$  градуса фазы на длине волны  $\lambda = 0,6328$  мкм, что эквивалентно линейному смещению  $\sim 0,1$  нм.

Оптическая схема измерений реализована на основе двухлучевой интерференции с использованием модифицированного интерферометра.

В качестве делительной пластины использованы два последовательно установленных акустооптических модулятора. Они выполняют функции как управляемых делителей входного оптического излучения, так и модулирующих элементов.

Устройство измерения наноразмерных перемещений обеспечивает измерения линейных перемещений в диапазоне от 1 нм до 10 мкм с дискретностью отсчета 0,1 нм. Структурная схема устройства приведена на рис. 1.11.



**Рис. 1.11.** Структурная схема устройства измерения наноразмерных перемещений: 1 – стабилизированный He-Ne-лазер; 2, 3 – группа акустооптических модуляторов; 4 – интерферометр двухчастотный; 5 – фотоприемное устройство; 6 – система приема и предварительной обработки информации; 7 – смеситель частот; 8, 9 – блоки высокочастотных генераторов; 10 – персональный компьютер; 11 – принтер

Измеритель наноперемещений содержит одночастотный стабилизированный He-Ne-лазер, оптически связанный последовательно с акустооптическими модуляторами. Электрические входы модуляторов через калибратор фазы подключены к генераторным блокам 8 и 9, осуществляющим модуляцию высокочастотным сигналом непрерывного лазерного излучения, проходящего через акустооптические модуляторы. Выход акустооптического модулятора 2 оптически связан с интерферометром, который обеспечивает совмещение интерферирующих световых пучков в плоскости фоточувствительного слоя фотоприемника, на выходе которого выделяется электрический сигнал разностной частоты.

В измерительном канале интерферометра установлен бесконтактный датчик наноперемещений, управляемый от функционального генератора. Генераторный блок связан электрически с помощью системы фазовой автоподстройки частоты с опорным входом высокоточного цифрового следящего фазометра, другой измерительный вход которого подключен к фотоприемному устройству для выделения информационного сигнала.

Выход фазометра сопряжен с компьютером для последующей обработки результатов измерений. Базовое программное обеспечение позволяет в режиме диалога осуществлять сбор измерительных данных, их обработку и представление в виде, удобном для пользования.

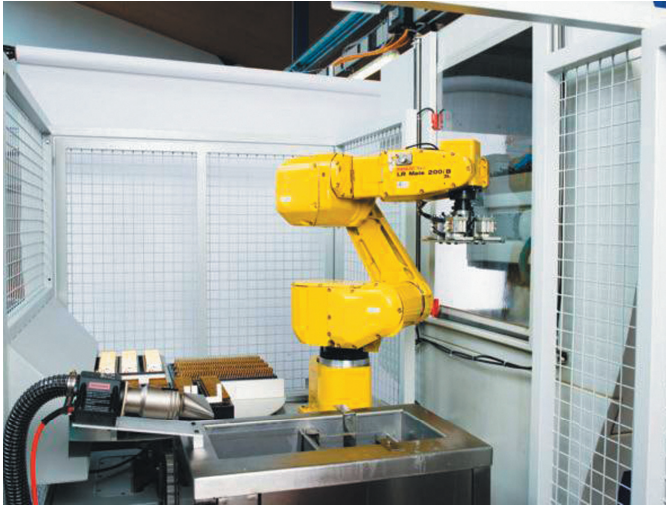
Наряду с устройствами лазерной интерферометрии-фазометрии, наноперемещения можно измерять и другими средствами, например вихретоковыми или емкостными датчиками ООО «Сенсорика-М» (г. Москва), предназначенными для высокоточного позиционирования с разрешающей способностью 0,1 нм.

Для установки заготовок на станке для обработки микродеталей без их деформации используются приспособления, в которых микродетали независимо от их формы закрепляются без сжимающего напряжения [4]. Для этого заготовки укладываются базовой поверхностью на смоченную водой пластину, которая охлаждается при помощи газового детандера (теплообменника) до температуры  $-30^{\circ}\text{C}$ . Лед удерживает эти маленькие заготовки так, что могут быть обработаны даже поверхности с размерами до 0,25 мм. Для сокращения времени переналадки применяют устройства автоматической смены инструмента (рис. 1.12).



**Рис. 1.12.** Настольный станок с приспособлением для установки заготовок микродеталей с помощью специальных замораживаемых зажимных пластин





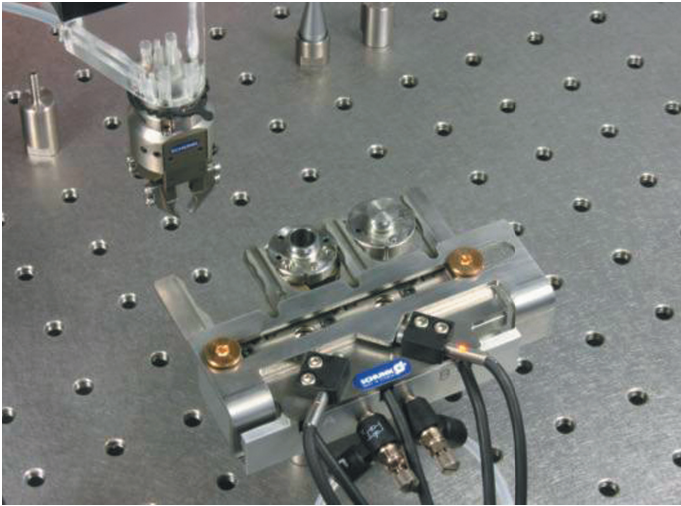
**Рис. 1.13.** Встроенный робот для перемещения заготовок пластин и обработанных микродеталей

Для изготовления микроэлектродов электроэрозионной обработки роботизированный 5-координатный обрабатывающий центр (ОЦ) оснащен роботом-манипулятором, который обеспечивает автоматическую смену заготовки. В ОЦ интегрирована измерительная головка, которая производит автоматическое измерение и контроль размеров конструктивных элементов (рис. 1.13).

Для предотвращения столкновений в ходе сложных движений с помощью функций, интегрированных в систему управления роботом, просчитываются траектории его руки относительно микродетали для корректировки их координат относительно траекторий движения узлов ОЦ в реальном времени. В случае угрозы столкновения система управления роботом останавливает процесс обработки [5].

Схваты роботов, предназначенные для манипуляций с микродеталью в рабочей зоне с внешним диаметром менее 30 мм и высотой 10 мм, состоят из миниатюрных унифицированных модулей, включающих сменные губки, модули точного позиционирования и тестовых контакты. Модули, по мере необходимости, автоматически заменяются при переходе на другое микроизделие (рис. 1.14).

Унификация позволяет отказаться от разработки специальных решений для каждой конкретной задачи микрообработки. Это позволяет за очень короткое время создавать с помощью стандартной программы схваты из взаимно совместимых узлов.



**Рис. 1.14.** Автоматизированная смена унифицированных модулей из миниатюрного магазина

Например, захватно-поворотный схват представляет собой комбинацию модуля вращения с пневматическим параллельным захватом. Он объединяет две функции – «захват» и «вращение», и, таким образом, обеспечивает комбинированное перемещение в минимальном пространстве. Параллельные захваты, используемые в модуле, обеспечивают усилие зажима от 15 до 33 Н.

Для вращения используется модуль высотой 25,5 мм и массой 26 г, который работает с помощью реечной передачи и имеет регулируемый во всем диапазоне угол поворота. Заданные угловые положения контролируются индуктивными датчиками в любой точке.

Со стороны робота схваты присоединяются без дополнительных переходных пластин и напрямую снабжаются сжатым воздухом через два соединения. Общий вид схвата, собранного из унифицированных узлов, показан на рис. 1.15.



**Рис. 1.15.** Общий вид схвата, собранного из унифицированных узлов