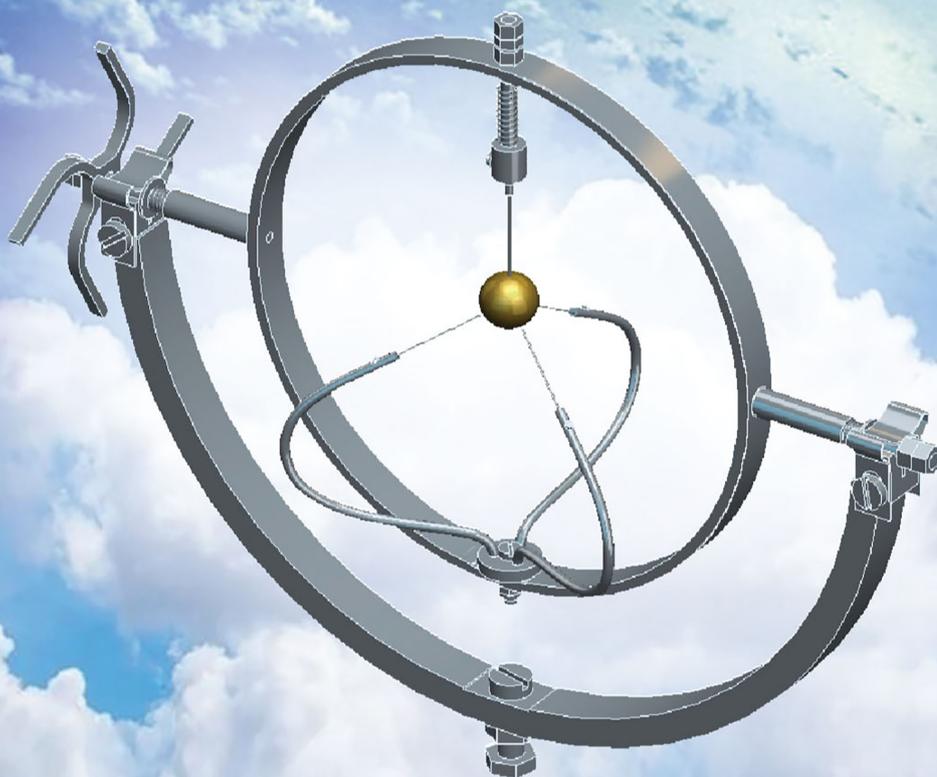


**О.С. Юльметова, А.Г. Щербак, И.Б. Челпанов
В.А. Валетов**



СПЕЦИАЛЬНЫЕ

**ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ПРЕЦИЗИОННЫХ УЗЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ
ГИРОСКОПИЧЕСКИХ
ПРИБОРОВ**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**О.С. Юльметова, А.Г. Щербак,
И.Б. Челпанов**

Под редакцией В.А. Валетова

**СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ УЗЛОВ И
ЭЛЕМЕНТОВ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ**

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлению подготовки 24.03.02 – Системы управления движением и
навигация, в качестве учебного пособия для реализации основных
профессиональных образовательных программ высшего образования
бакалавриата.



Санкт-Петербург

2017

Юльметова О.С., Щербак А.Г., Челпанов И.Б. / Под ред. Валетова В.А.
Специальные технологии изготовления прецизионных узлов и
элементов гироскопических приборов. Учебное пособие – СПб:
Университет ИТМО, 2017. – 131 с.

Рецензенты:

Мусалимов В.М., д.т.н., проф. кафедры мехатроники НИУ ИТМО

Куликов Д.Д., д.т.н., проф. кафедры технологии приборостроения
НИУ ИТМО

В учебном пособии рассматриваются технологические аспекты процесса создания узлов и элементов современных гироскопических приборов. Приведены используемые конструкционные материалы и их основные свойства, а также как традиционные, так и перспективные методы обработки и формообразования узлов и элементов, позволяющие решать сложные задачи современного гироскопического приборостроения.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2017

© Авторы, 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список использованных сокращений	5
Введение	6
Глава 1. Общие сведения о принципах работы и технологиях изготовления некоторых современных гироскопов	10
1.1. Общие сведения о гироскопах	10
1.2. Поплавковые гироскопы	13
1.3. Динамически настраиваемые гироскопы	14
1.4. Кольцевые лазерные гироскопы	16
1.5. Волоконно-оптические гироскопы	17
1.6. Волновые твердотельные гироскопы	18
1.7. Микромеханические гироскопы	19
1.8. Гироскопы с неконтактным подвесом	20
Вопросы к главе 1	25
Глава 2. Конструкционные материалы и их свойства	26
2.1. Основные понятия о физико-механических свойствах материалов	26
2.1.1. Физические свойства	27
2.1.2. Механические свойства	29
2.1.3. Химические свойства	32
2.1.4. Технологические свойства	32
2.2. Конструкционные материалы, применяемые при изготовлении гироскопических приборов	33
2.2.1. Бериллий	34
2.2.2. Молибден	35
2.2.3. Мель и ее сплавы	37
2.2.4. Хром	39
2.2.5. Ниобий	40
2.2.6. Титан и его сплавы	41
2.2.7. Конструкционные стали	43
2.2.8. Прецизионные сплавы	45
2.2.9. Кремний	47
2.2.10. Корундовая керамика	48
2.2.11. Углеситалл	49

Вопросы к главе 2.....	52
Глава 3. Формообразование деталей и узлов гироскопических приборов методами механической обработки	53
3.1. Основные технологические методы обработки материалов	53
3.1. Токарная обработка	55
3.2. Сверление отверстий	58
3.3. Фрезерование.....	60
3.4. Абразивная обработка	63
3.5. Технологические процессы механической обработки типовых деталей.....	65
3.6. Специфика обработки сферических деталей	72
Вопросы к главе 3	74
Глава 4. Ионно-плазменные и лучевые технологии изготовления прецизионных элементов гироскопических приборов	75
4.1. Ионно-плазменные технологии	
4.1.1. Физические методы осаждения тонкопленочных покрытий	75
4.1.2. Средства оснащения процесса нанесения вакуумных покрытий на сферические поверхности.....	81
4.1.3. Технология прецизионного травления.....	83
4.2. Лучевые технологии	85
4.2.1. Классификация лучевых технологий	85
4.2.2. Лазерное маркирование рисунка на роторе электростатического гироскопа.....	89
4.2.3. Управление параметрами функциональных элементов, формируемых с использованием лазерных технологий.....	91
Вопросы к главе 4.....	95
Глава 5. Неразъемные соединения узлов гироскопических приборов.....	96
5.1. Основные виды неразъемных соединений узлов гироскопических приборов	96
5.2. Электронно-лучевая сварка	98
5.3. Лазерная сварка.....	101
5.4. Контактная сварка.....	104
5.5. Диффузионная сварка в вакууме.....	105
Вопросы к главе 5.....	112
Глава 6. Аддитивные технологии	113
6.1. Типы аддитивных технологий	114
6.2. Критерии выбора изделий для их изготовления с использованием аддитивных технологий.....	116
Вопросы к главе 6.....	119
Заключение	120
Литература	122
История кафедры информационно-навигационных систем	127

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ЭСГ – электростатический гироскоп
БЭСГ – бескарданный электростатический гироскоп
МКС – Международная космическая станция
ИПЛТ – ионно-плазменные и лучевые технологии
ДУС – датчик угловой скорости
ПГ – поплавковый гироскоп
ДНГ – динамически настраиваемый гироскоп
СКБ – судостроительное конструкторское бюро
КЛГ – кольцевой лазерный гироскоп
ВОГ – волоконно-оптический гироскоп
ВТГ – волновой твердотельный гироскоп
ММГ – микромеханический гироскоп
МСГ – магнитостатический гироскоп
ЧЭ – чувствительный элемент
КГ – криогенный гироскоп
ЯМРГ – ядерно-магнитный резонансный гироскоп
МКУ – металлокерамические узлы
ТКЛР – температурным коэффициентом линейного расширения
ОЦК – объемно-центрированная кубическая решетка
ДПГ – двухстепенной поплавковый гироскоп
ОКГ – оптический квантовый генератор
ДСВ – диффузионная сварка в вакууме
АЭ – армирующие элементы

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современного общества во многом связано с непрерывным процессом получения, обработки и осмысления информации по оценке конкретных технических ситуаций и состояния сложных технических объектов, используемых человечеством в своих нуждах. Особого внимания требуют подвижные технические объекты, такие как космическая и ракетная техника, авиация, наземный колесный и гусеничный транспорт, объекты морского флота, суда и корабли, в том числе подводные лодки. Надежность и достоверность определения координат, углового положения и параметров движения таких объектов обуславливает объективность и адекватность принимаемых решений, связанных с конкретными действиями по управлению ими. Средствами получения необходимой информации для указанных объектов служат изделия точного приборостроения. Сюда, в первую очередь, можно отнести навигационные системы и комплексы, основными средствами измерений в которых являются гироскопические приборы.

Гироскопы сами по себе являются либо датчиками, либо чувствительными элементами гироскопических приборов. Их выходные сигналы содержат информацию об углах ориентации, составляющих вектора угловой скорости, а также, возможно, о других параметрах движения. Гироскопы входят в состав комплексов, обеспечивающих хранение или определение направлений, а также измерение угловых скоростей. В гироскопических приборах в качестве чувствительных элементов, помимо гироскопов, часто используются также и другие датчики, например, линейные акселерометры, измеряющие проекции векторной разности ускорений движения и сил тяжести.

Исторически гироскопы рассматривались как физические приборы, с помощью которых демонстрировались опыты из классической механики. В номенклатуре технических характеристик гироскопических приборов как чувствительных элементов или первичных преобразователей важное

место занимают показатели их точности и стабильности. В течение двух последних десятилетий и по настоящее время наиболее точными являются электростатические гироскопы, входящие в состав систем навигационных комплексов и предназначенные для автономной выработки координат на борту движущихся объектов морского флота, авиации и ракетно-космической техники.

Примерами высокоточных гироскопов являются разработанные в ЦНИИ «Электроприбор» (Санкт-Петербург) электростатический гироскоп (ЭСГ) и его вариант – бескарданный электростатический гироскоп (БЭСГ), представляющие собой датчики параметров угловой ориентации с оптоэлектронной системой съема данных об угловом положении по светоконтрастному рисунку на сферическом роторе.

Научно-технический прогресс в оснащении подвижных объектов разных классов связан с развитием исследований по созданию гироскопов других типов, таких как магнитостатический и поплавковый гироскопы, микромеханический, волоконно-оптический, ядерный магнитный и криогенный гироскопы. Примерами могут служить трехкоординатное средство измерений ускорений по трем осям для стабилизации и навигации комплексов морского базирования, а также многоканальная система измерения и спектрального анализа микроускорений на борту аппаратов «Прогресс», «Фотон», МКС.

Технология играет заметную роль при разработке конструкторской документации и решающую роль в реализации на производстве теоретических и конструкторских решений. От достигнутого уровня технологии в значительной мере зависят реальная точность и надежность изделий. Современная технология изготовления приборов и систем навигации и управления синтезировала и развила новейшие достижения в области точной механики, микроэлектроники, физики и химии твердого тела, материаловедения, вакуумной техники, оптики, метрологии и других дисциплин. В производстве приборов используются такие технологические решения, как высокоточное оборудование для механической и электроэрозионной обработки, высоковакуумные откачные посты, сварочное оборудование, специальное технологическое оснащение, высокоточная контрольно-измерительная аппаратура и специальные стенды для диагностики и испытания приборов.

К конструкционным элементам и узлам навигационных приборов предъявляются весьма высокие требования по точности и стабильности геометрических размеров и формы, для обеспечения которых требуется разработка сложных технологических схем изготовления и режимов обработки, специальных способов сборки. В конструкциях приборов применяется широкий спектр материалов различных классов: металлы, полимеры, керамика, стекло, диэлектрики, тонкопленочные функциональные покрытия. Металлы и сплавы, являющиеся основными конструкционными мате-

риалами, в зависимости от назначения должны обладать определенным сочетанием физико-механических и технологических свойств, характеризующих прочность, износостойкость, коррозионную стойкость, обрабатываемость, вакуумную совместимость и т.п. Конкретное сочетание материалов и количественные характеристики требований определяются функциональным назначением и условиями эксплуатации изделий. При этом имеют место такие тенденции, как расширение спектра используемых конструкционных материалов, усложнение конфигурации и расширение диапазона типоразмеров деталей, увеличение комбинаций сочетаний материалов, резко различных по свойствам, что одновременно сопровождается повышением технических требований в части максимизации или минимизации каких-либо характеристик узла или появлением новых требований.

В гироскопических приборах находят применение перспективные материалы – бериллий, титан, хромоникелевые стали, дисперсионно-твердеющие сплавы типа 36НХТЮ, 40ХНЮ, алюминиевые сплавы различных марок, ниобий, корундовая керамика, ферриты, оптические кристаллы, углеродные нанокompозиты и т.д. Проблемы конструкционных материалов решаются созданием и внедрением новых материалов, а также методов и средств их обработки и модификации их свойств. В процессе изготовления изделий необходимо реализовывать такие конфигурации, как тонкостенные оболочки вращения, телескопические конструкции, тонкопленочные покрытия и т.д., обеспечивая точности по отклонениям от заданной формы на уровне сотых и тысячных долей микрометра. Требования аналогичного порядка предъявляются и по точности позиционирования, и по взаимной ориентации деталей, и по размерной стабильности узлов, которая зависит от технологической предыстории, во многом определяемой процессами обработки.

Таким образом, технология прецизионного изготовления деталей и узлов гироскопических приборов требует учета, оценки и согласования целого ряда параметров и факторов процесса, которые находятся в сложной взаимосвязи и непосредственно влияют на функциональные характеристики изделия.

Технологические процессы изготовления узлов и элементов гироскопических приборов отличаются, как правило, большим количеством новых, неочевидных технических решений и широким использованием нестандартных приемов, методов и средств оснащения. Это целый ряд специальных технологий, в том числе:

- формообразование прецизионных деталей средствами высокоточной механической обработки;
- тонкопленочная технология нанесения покрытий;
- ионно-плазменные и лазерные технологии (ИПЛТ), используемые для формирования функциональных элементов на прецизионных узлах гироскопических приборов;

– технологические методы и средства управления процессом создания и корректировки параметров узлов, например, таких как моменты инерции и дисбаланс сферического ротора;

– технологии выполнения прецизионных неразъемных соединений.

В данном методическом пособии рассматриваются вышеперечисленные технологические решения, специфические для навигационного приборостроения.

ГЛАВА 1

Общие сведения о принципах работы и технологиях изготовления некоторых современных гироскопов

1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГИРОСКОПАХ

Первоначально понятие «гироскоп» буквально означало не больше, чем любое устройство для наблюдения абсолютного вращения основания, на котором оно установлено. С начала XX века «гироскоп» – уже не средство демонстрации, а чувствительный элемент прибора или самостоятельный прибор, используемый как средство точного измерения приращений углов ориентации в абсолютном пространстве или составляющих угловой скорости вращения основания [1–7]. Конструктивно под гироскопом понимался прибор, чувствительным элементом которого был быстро вращающийся на оси в подшипниках осесимметричный ротор с встроенным двигателем в двухколечном (или трехколечном) кардановом подвесе, как показано на рис. 1.1.

При точном совмещении центра масс ротора 2, находящегося на оси вращения xx_1 , с точкой пересечения осей карданова подвеса yy_1 , zz_1 , образованного кольцами 3, 4, закрепленными на рамке 1, теоретически получается свободный астатический гироскоп, в идеале (при отсутствии моментов, кроме уравнивающих друг друга вращающего момента двигателя и момента сил сопротивления) сохраняющий неизменное, первоначально заданное направление оси вращения ротора в абсолютном (инерциальном) пространстве. Естественно, в реальных условиях действие моментов любой природы и происхождения вокруг осей рамок подвеса приводит к тому, что ось вращения ротора плавно изменяет свою угловую ориентацию; это движение называется **прецессией** (точнее, медленной прецессией).

Для гироскопа, который должен хранить направление, прецессия квалифицируется как нежелательное явление, называемое дрейфом или уходом (от первоначально заданного направления). В гироскопических систе-

мах высокой точности осуществляется уменьшение влияния дрейфов путем введения компенсирующих поправок (по выходным сигналам на измененные постоянные скорости уходов) или приложением корректирующих моментов, вызванные не только смещением центров масс, но и другими факторами. Одной из причин (иногда главной) уходов гироскопа является момент, создаваемый силой тяжести при смещении центра масс по оси симметрии ротора. Неизбежные остаточные угловые скорости прецессии являются важнейшими характеристиками гироскопов; по их уровням, в частности, выстраиваются рейтинги гироскопов различных классов и типов.

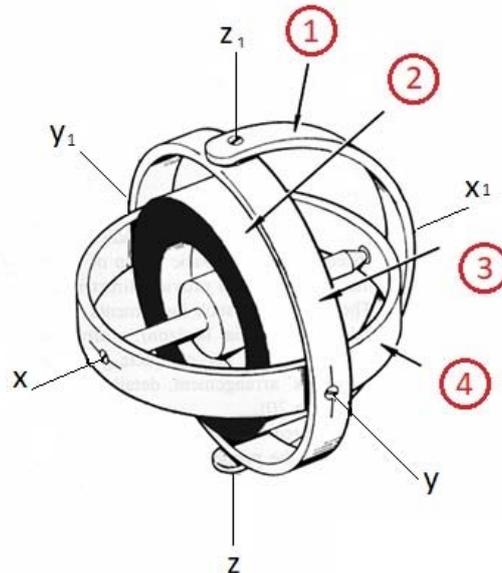


Рисунок 1.1. Гироскоп: 1 – рамка, 2 – ротор, 3 – наружное кольцо, 4 – внутреннее кольцо, x и x_1 – обозначения начала и конца оси вращения ротора, y и y_1 – обозначения начала и конца оси наклона ротора, z и z_1 – обозначения начала и конца оси смены направления

Теория гироскопов с центром масс, смещенным относительно точки пересечения осей карданова подвеса по оси вращения ротора, создавалась как раздел механики твердого тела. Принципиальным в теории гироскопов, работающих на неподвижном основании, было открытие того, что одновременно происходят два угловых движения: медленная прецессия (вращение с постоянной угловой скоростью по круговому конусу вокруг вертикали), а также быстрая, по конусу, высокочастотная прецессия (ее также называют нутационными колебаниями, поскольку она обычно имеет малые амплитуды). Применительно к гироскопу на неподвижном основании угловая скорость Ω медленной прецессии вокруг вертикальной оси по Лагранжу определяется выражением

$$\Omega = mgd(I\omega)^{-1} = gl(r^2\omega)^{-1}, \quad (1.1)$$

где I – осевой момент инерции, r – радиус инерции, ω – угловая скорость вращения ротора, l – смещение центра масс по оси относительно неподвижной точки. При начальном горизонтальном угловом положении оси ротора (если гироскоп используется как гироазимут) выражение (1.1) непо-

средственно характеризует линейно нарастающую во времени погрешность определения угловой ориентации подвижного объекта в плоскости горизонта. Дополнительно важными причинами уходов гироскопа на подвижном основании являются моменты сил инерции, возникающие при движении подвижного объекта, на котором он установлен.

Для гироскопа с быстро вращающимся ротором как хранителя направления из выражения (1.1) следует, что для уменьшения угловой скорости ухода (скорости медленной прецессии) желательно увеличивать отношение момента инерции ротора к массе. Для этого нужно было бы увеличивать размеры ротора гироскопа, увеличивать угловую скорость вращения ротора и как можно точнее совмещать центр масс с точкой пересечения кардановых осей. Эти рекомендации вступают в противоречие со многими практическими соображениями и дополнительными требованиями. Например, часто важны ограничения именно по массам и габаритным размерам, особенно для космической техники. Естественным ограничением является условие сохранения прочности и исключения пластических деформаций ротора под действием центробежных сил.

Однако свойство свободного гироскопа как хранителя направления в инерциальном пространстве – это лишь одно из возможных его функциональных назначений. Другое возможное назначение – определение составляющей по одной оси абсолютной угловой скорости объекта, на котором он установлен. В этом случае гироскоп с необходимой упругой связью становится датчиком угловой скорости (ДУС). Составляющие угловой скорости могут представлять самостоятельный интерес. По результатам измерения трех составляющих угловой скорости, т.е. по выходным сигналам модуля, включающего три ДУС, интегрированием уравнений Пуассона при учете начальных условий можно определить тригонометрические функции углов ориентации осей этого модуля, не имея средств хранения типа свободного астатического гироскопа.

Большое число гироскопических приборов и гироскопических систем получается сочетанием гироскопов и введением цепей коррекции с дополнительными датчиками. В настоящее время гироскопические приборы и системы нашли широкое применение в авиации и на флоте в таких приборах, как курсовертикали, гиригоризонткомпасы, гириазимутгоризонты, в строительстве при прокладке туннелей для метро и железнодорожного транспорта (наземные маркшрейдерские гирикомпасы), при измерении профилей буровых скважин (инклинометры). Они используются при автоматической стабилизации стволов танковых орудий, в гирикомпасах артиллерийских прицелов зенитной артиллерии, а также в других видах военной техники. Астатический уравновешенный гироскоп является основой для построения большого числа различных гироскопических приборов, предназначенных не для хранения первоначально заданного направления, а для определения особых направлений в пространстве. Чтобы построить

на астатическом гироскопе гироскопический прибор на подвижном основании для определения желаемых направлений, в конструкцию вводятся электромеханические цепи коррекции с входящими в них датчиками (часто акселерометрами) и моментными двигателями. Самые точные гироскопы являются некорректируемыми.

Несмотря на различия гироскопических приборов, особенностей их конструкций и условий использования, все они могут быть подразделены на три группы: указатели (индикаторы), средства измерений и регуляторы. Широкое распространение получили гиростабилизаторы и гиростабилизированные платформы; они используются для создания, поддержания и длительного обеспечения постоянной угловой ориентации точных приборов и аппаратуры.

В настоящее время известно более ста различных явлений, физических принципов и эффектов, которые имеют шансы быть использованными в гироскопии. Выданы многие тысячи патентов и авторских свидетельств на соответствующие открытия и изобретения. Во всех случаях необходимо создавать максимально более полные базы данных, чтобы облегчить активное использование приобретенного опыта разработки гироскопов всех типов. Далее, в приведенном ниже, заведомо неполном, выборочном и кратком описании гироскопов различных типов, обращается внимание на вытекающие из используемых физических законов требования к конструкциям, к специфическим технологиям, которые необходимо использовать, а иногда также важнейшие требования к режимам эксплуатации. На гироскопах в кардановых подвесах на протяжении десятилетий, с начала тридцатых годов строились все авиационные гироскопы. Скорости уходов имели порядок 1 о/час.

1.2. ПОПЛАВКОВЫЕ ГИРОСКОПЫ

Поплавковый гироскоп (ПГ), схема которого представлена на рис. 1.2, представляет собой классический двухстепенной роторный гироскоп, в котором для разгрузки подшипников подвеса все подвижные элементы, в первую очередь вращающийся ротор 1 в герметичной гирокамере 2, взвешены в жидкости с большой плотностью 3 так, что сила веса ротора 1 вместе с корпусом 4 с высокой точностью уравнивается гидростатической архимедовой силой. Стальные цапфы на опорах 5 фиксируют расположение поплавка 2 вдоль оси x (рис. 1.2).

Взвешивание поплавка 2 в жидкости 3 на порядки снижает моменты сил трения в подшипниках осей подвеса и увеличивает ударную и вибрационную стойкость прибора.

Герметичная камера, выполняющая роль внутренней рамки карданового подвеса, называется поплавком; ее поворот преобразуется датчиком угла поворота 6 поплавка 2 относительно корпуса 4 в выходной сигнал. Ротор 1 внутри поплавка 2 вращается электромагнитным полем, создаваемым уст-

ройством 7, на воздушной подушке в аэродинамических подшипниках с постоянной высокой угловой скоростью ω_y порядка 30–60 тыс. об/мин.

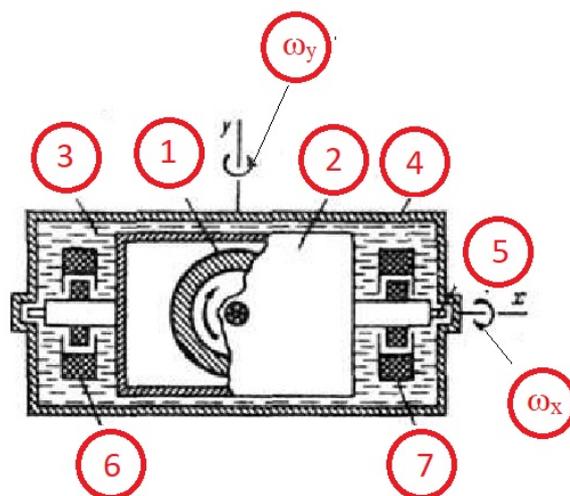


Рисунок 1.2. Схема поплавкового гироскопа: 1 – ротор гироскопа, 2 – поплавок, в теле которого расположен подшипник оси ротора, 3 – поддерживающая жидкость, 4 – корпус, 5 – стальные цапфы на опорах, 6 – датчик угла поворота поплавок относительно корпуса, 7 – электромагнитное устройство, прилагающее момент вокруг оси поплавок

Силовое взаимодействие поплавок 2 с корпусом 4 в первом варианте конструкции ПГ осуществляется с помощью упругих элементов, тогда ПГ функционально представляет собой ДУС. Во втором варианте взаимодействие осуществляется только через моменты сил вязкого трения самой жидкости; тогда приращение угла поворота поплавок пропорционально не угловой скорости, а углу поворота вокруг измерительной оси; такой ПГ называется интегрирующим гироскопом.

ПГ используются в качестве датчиков в гиростабилизаторах, когда измеряемые углы отклонений малы от задаваемых. Многие из технологических задач связаны с требованиями к специальной жидкости, заливаемой в корпус: необходимы высокая температурная стабильность вязкости в широких диапазонах, отсутствие растворенного воздуха, химическая стабильность. Определенные трудности представляют обеспечение герметичности при замене жидкости и хороший теплоотвод, обеспечивающий малые изменения температуры при тепловыделении. ПГ до настоящего времени остается одним из наиболее распространенных типов гироскопов в авиации, в частности, в трехосных гиростабилизаторах и гиropлатформах. ПГ, безусловно, будут широко применяться также и в ближайшие годы, так как их производство основывается на хорошо отработанных технологиях, используемых на мощной производственной базе.

1.3. ДИНАМИЧЕСКИ НАСТРАИВАЕМЫЕ ГИРОСКОПЫ

Динамически настраиваемый гироскоп (ДНГ) [8-11], схема которого представлена на рис. 1.3, функционально представляет собой ДУС и при-

надлежит к классу гироскопов с упругим (по отношению к углам поворота) соединением массы быстро вращающегося ротора 1 с его валом 3, приводимым во вращение электродвигателем. В конструкции ДНГ для такого упругого соединения ротора с валом используется так называемый внутренний карданов подвес, в данном случае в виде системы торсионов 2.

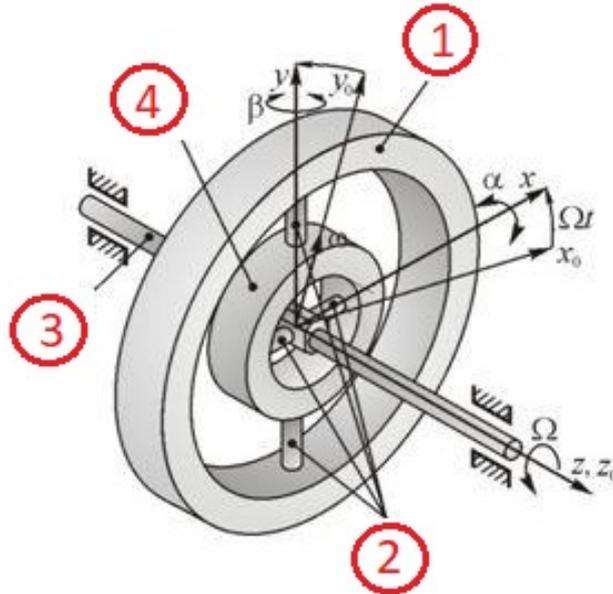


Рисунок 1.3. Динамически настраиваемый гироскоп: 1 – ротор, 2 – торсионы, 3 – вал, 4 – кольцо, x_0, y_0, z_0 – положение координатных осей в начальный момент времени, x, y, z – положение координатных осей после поворота, Ω – угловая скорость динамической оси x , α, β – знакопеременные углы разворота торсионов

Углы поворота плоскости вращения ротора относительно корпуса измеряются точными датчиками линейных перемещений. В зависимости от диапазона частот ДНГ можно считать, что он обладает свойствами ДУС или свободного гироскопа. Динамическая настройка ДНГ заключается в точном автоматическом подстраивании угловой скорости вращения ротора к собственной частоте его колебаний на валу; при такой настройке значительно возрастает его масштабный коэффициент.

Из частей конструкции наиболее ответственной является система торсионов 2; при знакопеременном деформировании должны быть обеспечены высокая стабильность, надежность, малые внутренние потери и долговечность. При выборе способов получения торсионов и соединений с валом и ротором часто приходится отказываться от обычного пути отдельного изготовления деталей с последующей сборкой и формировать весь узел, обеспечивающий требуемую упругую подвижность, из единой заготовки фрезерованием. При этом торсионы образуются как остающиеся тонкие перемычки.

К достоинствам ДНГ, широко используемых в авиации, следует отнести их малые массы и габариты, высокую стабильность характеристик, относительно невысокую стоимость.

1.4. КОЛЬЦЕВЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ГИРОСКОПЫ

Кольцевой лазерный гироскоп (КЛГ) [8,10,11], называемый также квантовым гироскопом, является немеханическим по принципу действия. Его основой во вращающемся кольцевом интерферометре является лазер с кольцевым резонатором в виде системы зеркал. В КЛГ по двум путям оптического контура одновременно по сторонам треугольника распространяются встречные световые волны (рис. 1.4), тем самым поддерживается стоячая волна. При появлении фазового сдвига встречных световых волн по разности фаз сигналов фотоприемников определяется угол поворота. Таким образом, КЛГ измеряет приращение угла.

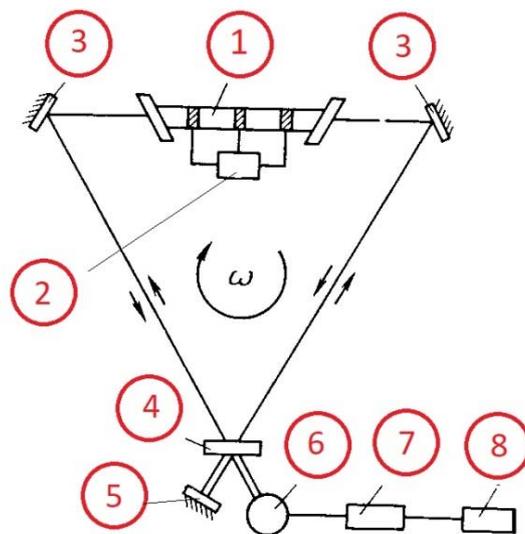


Рисунок 1.4. Схема лазерного гироскопа: 1 – активный элемент, 2 – генератор накачки активного элемента, 3 – непрозрачное зеркало, 4 – полупрозрачное зеркало, 5 – непрозрачное зеркало, 6 – фотокатод фотоэлектронного умножителя, 7 – частотомер, 8 – регистрирующее устройство, ω – угол поворота основания

Принцип действия КЛГ основан на использовании эффекта Саньяка. При повороте основания с кольцевым резонатором, образованным элементами 1–8, в инерциальном пространстве оптические пути, образованные элементами 1, 3 и 4 и проходимые лучами, движущимися по и против часовой стрелки, оказываются неодинаковыми. Разность между оптическими путями приводит в этом случае к возникновению разности частот воспринимаемых колебаний (эффект Саньяка), которая фиксируется с помощью фотоэлектронного умножителя 6 и частотомера 7, а результирующее фазовое детектирование осуществляется в устройстве 8. Функционально КЛГ представляет собой ДУС.

К достоинствам лазерных гироскопов следует отнести прежде всего отсутствие подвижных элементов – вращающегося ротора, подшипников. В настоящее время серийно выпускаются лазерные гироскопы, имеющие скорости уходов на уровне $2 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-1}$ °/ч.

Высокая точность достигается при стабильности линейных и угловых геометрических параметров. Поэтому предпочтительны моноблочные, толстостенные, малодеформируемые конструкции массивного корпуса с каналами для прохождения лучей из материалов с высокостабильными свойствами при минимуме соединений.

1.5. ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ГИРОСКОПЫ

Принцип действия волоконно-оптического гироскопа (ВОГ) [12,13], представляющего собой ДУС, в целом такой же, как КЛГ, т.е. базируется на эффекте Саньяка при определении получающегося вследствие вращения фазового сдвига лучей, распространяющихся по двум путям. Однако в ВОГ используется частотный детектор, вследствие чего измеряется угловая скорость. Схема ВОГ представлена на рис. 1.5.

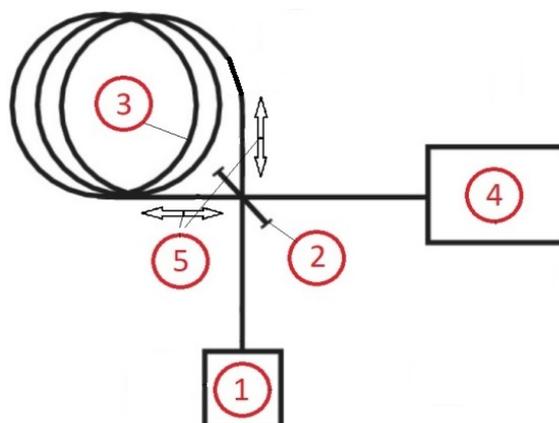


Рисунок 1.5. Схема волоконно-оптического гироскопа: 1 – источник света, 2 – светоделительная пластина, 3 – катушка с оптическим волокном, 4 – фотоприемник и блок обработки информации, 5 – направления световых потоков

Важная отличительная особенность ВОГ состоит в том, что чувствительным элементом является вращающаяся многovitковая катушка 3 с одномодовым волоконным световодом, обеспечивающим стабильность разности фаз встречных световых потоков 5, и светоделительной пластиной 2, осуществляющей разделение светового луча на два направления. Регистрация фазового сдвига светового потока осуществляется в блоке 4.

Большая суммарная длина световода (порядка сотен метров), а также применение световодов с низким затуханием и интегральных оптических компонентов позволяют получать большие значения масштабного коэффициента. Поэтому в технологии изготовления ВОГ основное внимание уделяется качеству материала световода. ВОГ из-за простоты конструкции при использовании массового изготавливаемого высококачественного оптоэлектронного кабеля является одним из наиболее дешевых гироскопов средней точности; предполагают, что он вытеснит КЛГ в диапазоне скоростей уходов 10^{-2} °/ч и даже ниже.

1.6. ВОЛНОВЫЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ГИРОСКОПЫ

Физический принцип функционирования волнового твердотельного гироскопа (ВТГ), представляющего собой ДУС или средство определения приращения угла поворота, поясняется рис. 1.6. Он основывается на инертных свойствах упругих изгибных волн в кольцевом резонаторе как в упруго деформируемом теле. Если возбудить действием силовых возбудителей 2 стоячие волны упругих колебаний на одной из собственных частот кольцевого резонатора 1, то вращение основания, на котором установлен резонатор, вызывает поворот стоячей волны на меньший, но пропорциональный угол, измеряемый датчиком (или системой датчиков) 3. При непрерывном равномерном вращении соответствующее относительное движение волны воспринимается как прецессия.

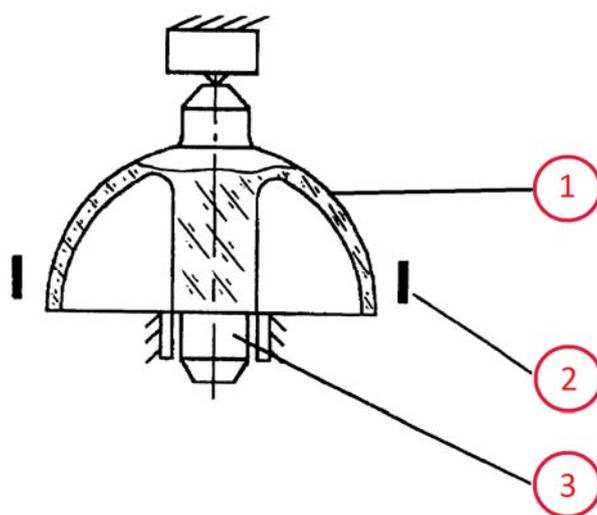


Рисунок 1.6. Схема волнового твердотельного гироскопа. 1 – полусферический резонатор, 2 – емкостные датчики (силовые возбудители), 3 – пьезоэлектрический датчик измерения углового положения пучностей

Конструктивно резонатор ВТГ в виде колокола представляет собой тонкую упругую оболочку вращения (например, полусферу с отверстием в полюсе для крепления, как показано на рис. 1.5), изготовленную из плавящего кварца, сапфира или другого материала, обладающего малыми потерями при колебаниях. Центр резонатора 1 (у полюса) жестко прикреплен к основанию. Другой край, называемый рабочим, свободен. На внешнюю и внутреннюю поверхности резонатора напыляются металлические электроды. Некоторые из электродов служат силовыми возбудителями 2 для воздействия на резонатор, они входят в систему поддержания постоянной амплитуды автоколебаний. Вторая группа электродов служит датчиками измерения углового положения пучностей 3 на резонаторе.

К достоинствам ВТГ относятся высокое отношение показателя точности к цене, способность переносить большие перегрузки, компактность, малые

массы, низкое энергопотребление, малое время готовности, слабая зависимость от температуры окружающей среды.

1.7. МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ГИРОСКОПЫ

Микромеханический гироскоп (ММГ) [14, 15] – это одноосный вибрационный гироскоп, изготавливаемый с помощью современных кремниевых микросхемных технологий. ММГ выполняют функции ДУС. Физически ММГ представляет собой функционально специализированный электронный чип с кварцевой подложкой, на которой методом фотолитографии и травления формируется плоское (толщиной порядка 40 мкм) инерционное тело, совершающее на упругих элементах первичные и вторичные (или линейные, или угловые) колебания. Схема ММГ на упругом подвесе 3 представлена на рис. 1.7.

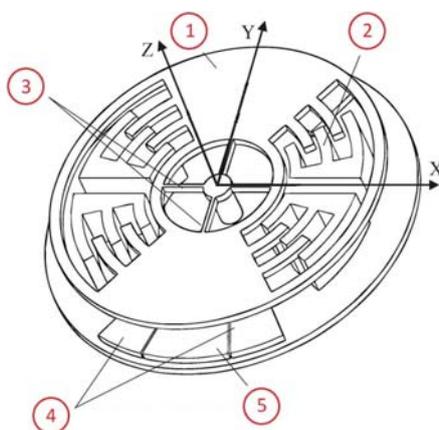


Рисунок 1.7. Схема микромеханического гироскопа. 1 – ротор, 2 – электростатический двигатель, 3 – упругие элементы подвеса, 4 – датчик угла вторичных колебаний, 5 – датчик момента, Z – ось первичных колебаний, X – ось вторичных колебаний, Y – ось чувствительности

На инерционном теле 1 формируется зубчатый электростатический двигатель 2 и электроды емкостных датчиков (4 и 5). Двигатель является частью автоколебательной системы первичных колебаний вокруг оси Z, вследствие чего появляется кинетический момент вдоль оси Z. Ось Y является осью чувствительности, вокруг которой ММГ вращается с постоянной скоростью Ω , которую нужно измерять. В результате взаимодействия вынужденных колебаний вокруг оси Z и вращения Ω кориолисовы силы вызывают переменный гироскопический момент и угловые колебания оси X, амплитуда и фаза которых содержат информацию о скорости Ω .

За счет использования технологий микроэлектроники удастся выполнить ММГ как весьма миниатюрные приборы, отвечающие острым потребностям в сверхминиатюризации. При очень малых габаритных размерах инерционного тела (порядка нескольких миллиметров) возможно выполнение элементов с шириной около 10 мкм с допусками порядка

0,2 мкм. Производство ММГ – крупносерийное, чувствительные элементы создаются («печатаются») на кремниевых пластинах сразу сотнями штук. После разрезания осуществляются индивидуальные операции контроля по параметрам, закрепления в корпусах, приварки электродов, корпусирования, вакуумирования герметизации корпусов и пр. Технологический процесс включает десятки этапов. К чистоте и точности выполнения предъявляются сверхвысокие требования, значительная часть которых типична для современной микроэлектроники в целом. Производство осуществляется на автоматических линиях, наиболее ответственные операции проводятся в вакууме. Тем не менее, обычно доля бракуемых изделий превышает половину, и это считается нормальным.

Хотя к настоящему времени скорость уходов ММГ находится на уровне 10 °/ч, ожидается, что ее можно будет повысить на порядок. Это открывает возможность массового использования ММГ в самых разнообразных областях. Для многих областей технических применений, когда точность практически не имеет значения, решающее значение имеет исключительно низкая стоимость ММГ. Не случайно в паспортных данных ММГ, производимых ведущими фирмами, сведения о скорости уходов вообще не приводятся. По отношению к особенностям технологий массового производства ММГ важнейшим является то, что за счет упругой подвижности инерционного тела при изготовлении чувствительного элемента полностью исключены сборочные операции, которые необходимы только при соединении электродов и корпусировании.

1.8. ГИРОСКОПЫ С НЕКОНТАКТНЫМ ПОДВЕСОМ

Развитие гироскопов с быстро вращающимся ротором продолжилось в направлении отказа от механического контакта подвижных деталей с неподвижными, так как именно этот контакт приводит к возникновению моментов сил, вызывающих уходы. В неконтактных подвесах удержание ротора в требуемом положении обеспечивается силовыми полями, которые могут иметь разную природу. Важным явилось то, что поверхности роторов таких гироскопов стали выполняться сферическими (полностью или частично). Такие гироскопы приспособлены для применения преимущественно в качестве некорректируемых хранителей направлений. При неконтактном подвешивании ротора такого гироскопа он удерживается в пределах тонких зазоров между ним и сферической поверхностью полости неподвижного корпуса. Сферичность допускает повороты ротора вокруг любой оси без изменения распределения зазоров. Гироскопы с различными физическими принципами бесконтактного взвешивания вращающегося ротора сменяли друг друга на протяжении второй половины XX века.

Первыми были гироскопы на аэростатическом и аэродинамическом подвесах; в них ротор поддерживался за счет избыточного давления в тонких зазорах между чашей статора и шаром ротора. Их несомненными достоин-

ствами были высокая несущая способность (грузоподъемность) и автономность (не требовалась система автоматического управления положением ротора с помощью изменения давления). При разработке аэростатических подвесов использовался опыт проектирования и эксплуатации газовых подшипников, в которых слой воздуха создавался за счет поддува. На флоте сферический аэродинамический подвес, в котором давление создавалось за счет подсоса при вращении, использовался в гировертикалях с тяжелыми роторами (с массами порядка 15 кг).

Далее представлялся перспективным управляемый электромагнитный (магниторезонансный) подвес. Гироскопы с магниторезонансным подвесом ферритового ротора (МСГ) имели свои достоинства. Известно, что подвешивание на магнитах позволяет получать высокую несущую способность. Но состояние равновесия на постоянных магнитах неустойчиво, подвес должен быть активным, автоматически регулируемым. Однако трудности обеспечения высокой стабильности магнитных свойств и исключения влияния остаточного намагничивания и паразитных полей привели к тому, что высокие точностные показатели не были достигнуты. Несмотря на более чем тридцатилетнюю историю разработок МСГ и экспериментальных исследований, он так и не стал объектом серийного производства. Испытание временем выдержал только электростатический гироскоп (ЭСГ), схема бескарданного варианта (БЭСГ) которого представлена на рис. 1.8.

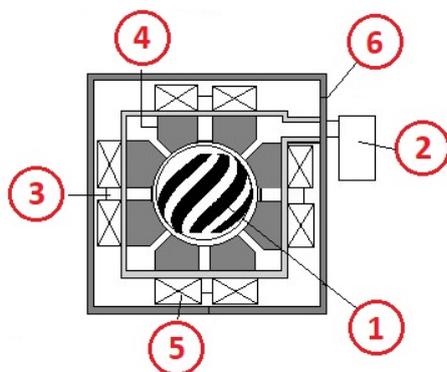


Рисунок 1.8. Схема электростатического гироскопа: 1 – ротор со светоконтрастным рисунком, 2 – система поддержания вакуума, 3 – оптический датчик угла, 4 – электроды электростатического подвеса, 5 – катушки системы разгона и демпфирования ротора, 6 – корпус

В БЭСГ проводящий сферический ротор 1 подвешен в вакуумированной полости (камере) корпуса 6 в регулируемом электрическом поле, создаваемом системой неподвижных электродов 2 на внутренней сферической поверхности корпуса. Если поверхность ротора – идеальная сфера, то распределенные силы электрического взаимодействия, действующие в каждой точке по нормали к проводящей поверхности ротора, не могут создать момента относительно его центра. Раскручивание ротора осуществляется вращающимся электромагнитным полем, создаваемым катушками системы

разгона и демпфирования 5. Для хорошо отработанной конструкции такого подвеса характерен очень низкий уровень сил торможения (при глубоком вакууме в полости подвеса порядка 10^{-8} мм рт. ст. постоянная времени выбега ротора после начальной раскручивания составляет около 100 лет). Угловое положение быстро вращающегося ротора осуществляется оптоэлектронной системой. Разумеется, подтвержденное достижение уходов гироскопа на уровнях в 10^{-4} - 10^{-5} °/ч – задача чрезвычайной сложности.

Мировой опыт показывает, что ресурсы повышения точности ЭСГ велики. Об этом свидетельствует завершившийся в 2006 году космический эксперимент по проверке общей теории относительности, проведенный Стэнфордским университетом и Национальным космическим агентством NASA. Задача эксперимента заключалась в измерении с помощью специального космического аппарата GravityProbeB [16,17] деформации пространства–времени (в соответствии с теорией Эйнштейна) вблизи вращающейся Земли. Успех этого фантастически тонкого эксперимента определяется тем, что на борту космического аппарата опорная система координат материализовалась четырьмя криогенными ЭСГ со случайным дрейфом порядка 10^{-11} ° /ч. Многие специалисты полагают, что в обозримой перспективе ЭСГ останется наиболее точным гироскопом.

В данном учебном пособии основное внимание уделяется технологии изготовления именно электростатического гироскопа [18]. Бесконтактное удерживание вращающегося металлического сферического ротора в сферической полости корпуса осуществляется силами электростатического взаимодействия с электродами, сформированными на поверхности керамического корпуса. Электростатический подвес, который с позиций механики имеет свойства упругого подвеса (но только при действии системы автоматической стабилизации), должен обеспечивать сохранение зазора в заданных узких пределах не только при действии силы тяжести, но и при перегрузках, возможных для подвижного объекта, на котором гироскоп установлен. Реально диапазон допустимых изменений зазора ограничивается снизу двумя требованиями: зазор должен быть таким, чтобы исключить касание ротора с корпусом при действии перегрузок, а также должен быть исключен электроискровой пробой зазора между ними. Очевидно, что аналогичные требования выдвигаются также для поверхности полости корпуса, в которой вращается ротор.

Важно, что электростатический подвес должен быть активным. Требуемые для удерживания ротора в полости корпуса без контакта с ее стенками регулируемые разности потенциалов создаются за счет работы замкнутой системы автоматической стабилизации. При идеально сферической форме ротора распределенные силы электростатического взаимодействия направлены точно к центру. Поэтому они не создают моментов, вызывающих уход. Сказывается лишь очень малая асферичность, количественно характеризующая отклонениями от сферы.

Осевой момент, необходимый для вращения ротора, создается вращающимся полем, но не электромагнитным, как у большинства других гироскопов, а электростатическим, неоднородным при поворотах вокруг оси вращения. При точной сферичности поверхности ротора необходимым условием воздействия такого вращающегося поля является изменение зазора при поворотах вокруг оси вращения; это создается дисбалансом, радиальным смещением центра масс относительно геометрической оси поверхности. При достаточно большой угловой скорости вращения можно считать, что при вращении ротора его центр масс остается неподвижным, а вследствие дисбаланса будет меняться зазор. Увеличенная напряженность электрического поля в малой зоне позволяет «вести», вращать ротор этим полем. Однако желательно уменьшить все моменты, действующие на ротор. Уменьшение моментов сил аэродинамического сопротивления достигается глубоким вакуумированием. Тем не менее, чтобы в рабочих режимах угловая скорость вращения ротора была стабилизирована в очень узких пределах, электростатический двигатель должен в установившемся режиме включаться редко и на относительно короткие интервалы времени.

Еще одна проблема заключается в том, что ось вращения ротора должна быть «привязана» к ротору, у ротора должна быть вполне определенная пара полюсов. Для этого его моменты инерции вокруг ортогональных осей должны различаться. Причем устойчивым будет вращение только вокруг оси наибольшего момента инерции. Поэтому ротор ЭСГ должен иметь наибольший момент инерции вокруг оси, относительно которой он должен быть закручен в режиме пуска.

Для всех гироскопов на неконтактных подвесах принципиальны трудности с измерением параметров углового положения оси вращения ротора. Когда углы отклонения оси ротора от некоторого номинального положения малы, предпочитают использовать датчики, измеряющие отклонения малого наблюдаемого фрагмента (пятна, выступа, плоской зеркальной площадки) на полюсе. В созданных ЭСГ, предназначенных для измерения углов в широких диапазонах, используются построенные на паре «светодиод–фотодиод» оптоэлектронные датчики оптического сигнала, получаемого в результате отражения света от ротора, на поверхности которого в широкой экваториальной полосе нанесены светоконтрастные полосы. Датчики устанавливаются на корпусе парами по двум диаметрам. Непосредственно получаемые от них сигналы в форме меандров являются периодическими. Информативными параметрами этих сигналов при отклонении оси вращения ротора являются сдвиги фаз для в каждой из пар датчиков. Они зависят от углов отклонения оси ротора от номинального положения в двух плоскостях, по ним и вычисляются углы отклонения оси поворота ротора относительно корпуса.

При конструировании ЭСГ и отработке технологии решаются следующие основные требования:

– выбор наилучшего конструктивного материала ротора, исходя из требований получения максимального кинетического момента при обеспечении необходимых запасов механической прочности под действием центробежных сил;

– обеспечение точности формы поверхности ротора с малыми отклонениями по асферичности (порядка сотых долей микрометра) и от номинального значения диаметра (в пределах десятых долей микрометра), выбираемого из требований получения нужной несущей способности, с одной стороны, и отсутствия пробоев зазора – с другой;

– требуемое нормированное различие осевых моментов инерции ротора для обеспечения стабильного положения полюса, чтобы ось его вращения и рисунок на поверхности ротора имели стабильные положения;

– обеспечение радиального дисбаланса ротора в заданных пределах для повышения надежности работы электростатического двигателя, вращающего ротор;

– нанесение рисунка в виде наклонных полос на поверхность с точным положением относительно экватора, с точными границами контуров создаваемых растровых полос на поверхности ротора и с необходимой контрастностью для получения высокой точности определения углового положения оси ротора относительно корпуса;

– высокая степень чистоты, высокая прочность и гладкость поверхности ротора с показателем шероховатости в сотые доли микрометра, чтобы уменьшить вероятность пробоев зазора, уменьшить натекание заряда на ротор и улучшить отражение светового сигнала от поверхности ротора для надежного функционирования оптоэлектронной системы;

– создание и поддержание во время всего срока службы глубокого вакуума для уменьшения аэродинамических потерь, чтобы в течение больших интервалов времени угловая скорость вращения ротора сохранялась в заданных узких пределах без включения двигателя.

Современные гироскопы с неконтактными подвесами – это сложнейшие приборы, которые вобрали в себя новейшие достижения техники. Только три страны в мире в настоящее время способны производить электростатические гироскопы. Кроме США и Франции, в их число входит и Россия. Опыт эксплуатации на морских объектах электростатических гироскопов, созданных в Санкт-Петербурге в ЦНИИ «Электроприбор», подтвердил высокую точность и достаточную надежность корабельных инерциальных навигационных систем на электростатических гироскопах.

Кроме перечисленных выше типов гироскопов, проводились и проводятся работы над экзотическими типами гироскопов, такими как ионные, ядерные и т.п. Однако изложенного материала достаточно для формулирования выводов о тенденциях развития гироскопов в настоящее время.

ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 1

1. Какие типы гироскопов вам известны?
2. Что такое точность гироскопа, в каких единицах она измеряется?
3. Поясните принцип работы двухстепенного поплавкового гироскопа.
4. Поясните принцип работы динамически настраиваемого гироскопа.
5. В чем заключается эффект Саньяка?
6. Поясните принцип работы кольцевого лазерного гироскопа.
7. Поясните принцип работы волоконно-оптического гироскопа.
8. Поясните принцип работы волнового твердотельного гироскопа.
9. Что вы знаете о гироскопах с неконтактным подвесом?
10. Какой гироскоп на сегодняшний день принято считать самым точным в мире?

ГЛАВА 2

Конструкционные материалы и их свойства

Используемые конструкционные материалы представляют собой вещественную основу любого гироскопического устройства в соответствии с его назначением, предопределяя геометрическую точность, размерную стабильность, износостойкость и прочие характеристики входящих в его состав деталей и узлов, которые, в конечном счете, обеспечивают правильность функционирования, требуемые свойства точности, надежности и долговечности. В этой главе приводятся как общие сведения о различных свойствах конструкционных материалов, так и данные об их конкретном применении в конструкциях приборов.

2.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ МАТЕРИАЛОВ

Свойства современных конструкционных материалов принято подразделять с известной степенью условности на физические, механические [19-25], химические и технологические. Классификация представлена на рис. 2.1.

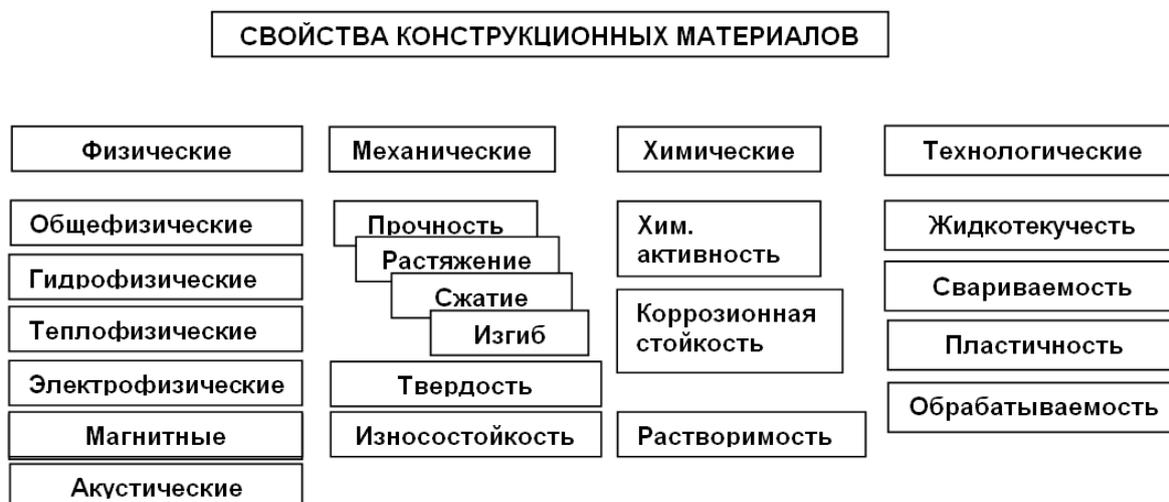


Рисунок 2.1. Классификация свойств конструкционных материалов

2.1.1. Физические свойства

К физическим свойствам относят общезфизические (цвет, удельный вес, строение), гидрофизические (гигроскопичность, морозостойкость), теплофизические (теплопроводность, теплоемкость), электрофизические (электропроводность), магнитные и акустические (звукопоглощение, вибропоглощение). Остановимся подробнее на рассмотрении некоторых физических свойств.

Цвет. По цвету значительно отличаются от других металлов только медь (розовато-красная) или золото (желтое). Большинство материалов может отличаться только оттенком: серебро имеет характерный серебристо-белый цвет; алюминий, магний, платина, олово, кадмий, ртуть – синевато-белый цвет; железо, свинец, и мышьяк – сероватый цвет. В сильно измельченном состоянии в виде порошка металлы имеют серый, коричневый или черный цвет. При пребывании в течение длительного времени на воздухе большинство металлов окисляется и темнеет. Металлы, не окисляющиеся на воздухе (серебро, золото и металлы платиновой группы), и металлы, у которых образуется на поверхности тончайший защитный слой оксида (алюминий, титан и др.), не изменяют своего цвета и блеска в течение длительного времени.

Удельной плотностью металлов называется масса 1 см³ вещества, выраженная в граммах. Кроме немногочисленной группы легких металлов (алюминий, магний), имеющих плотность менее 3 г/см³, большинство металлов имеет значительную плотность. Малая плотность алюминия и магния имеет исключительно большое значение при построении легких конструкций, и поэтому легкие сплавы этих металлов широко используют, а в научных исследованиях особенно тщательно изучают. В литейном деле большая разница удельной плотности металлов иногда вызывает затруднения при получении однородных сплавов. При сплавлении металлов, сильно различающихся по плотности, более легкий металл может плохо смешиваться и всплывать. Такое явление происходит, например, при изготовлении свинцовой бронзы, содержащей 60 % Pb и 40% Cu.

Температура плавления. Температура, при которой нагреваемый металл переходит из твердого состояния в жидкое, называется температурой плавления. Это, в первую очередь, важно для технологий литья. Необходимо также учитывать изменение температуры плавления при осуществлении сварных соединений.

Удельная теплоемкость. Количество тепла, которое необходимо для повышения температуры 1 кг металла на 1°С, называется теплоемкостью металла. Теплоемкость несколько изменяется с температурой. В таблицах приводятся обычно значения средней теплоемкости для интервала температур, например, от 0 до 100 °С.

Теплопроводность. Свойство металла проводить тепло называется теплопроводностью. Теплопроводность характеризуется коэффициентом те-

плопроводности, показывающим, сколько калорий тепла может пройти в единицу времени сквозь две грани куба 1 см^3 вещества при разности температур 1°C на двух противоположных его гранях, и обозначается буквой λ . По этому показателю металлы значительно различаются. Теплопроводность алюминия, например, в пять раз больше теплопроводности чугуна. Следует отметить, что металлы с большой теплопроводностью в то же время являются лучшими проводниками электричества.

Электросопротивление. В системе СИ за единицу сопротивления, называемую омом (обозначение – Ом), принимают сопротивление такого проводника с поперечным сечением 1 см^2 , по которому проходит ток силой 1 А при напряжении на его концах 1 В . Металлические материалы по электросопротивлению (или обратной величине – электропроводности) подразделяют на проводниковые и высокого сопротивления. Параметром металла, характеризующим электрические свойства проводимости, является его удельное сопротивление r ; оно имеет размерность Ом·мм²/м и показывает, какое сопротивление имеет проводник из данного металла длиной 1 м и сечением 1 мм^2 . Удельное сопротивление может быть измерено, если известны сопротивление R (Ом), длина l (м) и сечение S (мм²) образца:

$$r = \frac{R \cdot S}{l}. \quad (2.1)$$

Величина, обратная удельному сопротивлению, называется удельной проводимостью. Удельное сопротивление металлов с повышением температуры возрастает. Для большинства металлов при малых изменениях температуры справедлива линейная зависимость электросопротивления от температуры T :

$$r = r_{20}(1 + aT), \quad (2.2)$$

где a – температурный коэффициент электросопротивления, для большинства чистых металлов он находится в диапазоне $(4-6) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Существует широкий класс веществ, в том числе металлических, электросопротивление которых при охлаждении до температур T_K в несколько градусов Кельвина скачкообразно падает до нуля. Это явление называется сверхпроводимостью, а температура перехода T_K является критической температурой сверхпроводимости. Среди чистых материалов имеется около тридцати сверхпроводников. Из чистых металлов рекордно высокая $T_K = 9.8 \text{ К}$ наблюдается у ниобия, а из металлических сплавов – у соединения $Nb_3\text{Ge}$ с $T_K = 23 \text{ К}$.

Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР). Относительное (на единицу длины) приращение размера образца при нагревании его на 1°C называется температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР). Среднее значение ТКЛР по результатам испытаний образцов при изменении температуры на ΔT вычисляется по формуле

$$\bar{\alpha} = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta T} \quad (2.3)$$

где Δl – изменение длины при изменении температуры на ΔT , мм; l_0 – начальная длина образца, мм. Так как коэффициент ТКЛР очень мал, то в таблицах его значение обычно дается с коэффициентом 10^{-6} K^{-1} , т.е. в миллионных долях первоначальной длины, относительно длины при $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Для металлов характерно то, что с понижением температуры ТКЛР уменьшается, причем особенно резкое его уменьшение наблюдается ниже комнатной температуры. Свойство металлов расширяться при нагревании и сжиматься при охлаждении, необходимо учитывать при изготовлении деталей и узлов гироскопических приборов, т.к. при изменении температуры могут существенно изменяться зазоры, нарушаться перпендикулярность или параллельность осей и пр. Тепловое расширение, особенно неравномерное, имеет большое значение и для сварных конструкций, в которых возникают внутренние напряжения, влияющие на размерную стабильность изделия.

Магнитные свойства. Вещество при помещении его в магнитное поле само приобретает магнитные свойства, но намагничиваются разные вещества по-разному. Одни материалы при своем намагничивании внешним полем усиливают его (парамагнетики), а другие ослабляют (диамагнетики). К диамагнитным металлам относятся бериллий, сурьма, висмут, медь, золото, серебро, цинк, кадмий, ртуть и др. Парамагнитными металлами являются алюминий, кальций, барий, молибден, вольфрам и др. К парамагнитным относятся также ферромагнитные металлы – железо, никель, кобальт и редкий элемент – гадолиний; именно они используются в случаях, когда в ограниченных зазорах нужно получать большие значения магнитной индукции (измеряется в теслах Тл). Железо, кобальт и никель теряют свои магнитные свойства при высоких температурах (железо при $759 \text{ }^\circ\text{C}$, кобальт при $1110 \text{ }^\circ\text{C}$ и никель при $350 \text{ }^\circ\text{C}$).

2.1.2. Механические свойства

К механическим свойствам [19–25] (прочность, твердость, упругость, пластичность, ползучесть, релаксация напряжений, усталость и другие) относят такие свойства, значительные изменение которых приводит к разрушениям или необратимым деформациям.

Прочность [21] – это способность металла или сплава противостоять деформации и разрушению под действием приложенных нагрузок – растягивающих, сжимающих, изгибающих, скручивающих и срезающих. Нагрузки могут быть внешними (вес, давление и др.) и внутренними (вследствие изменений напряженного состояния от нагревания и охлаждения, изменений структуры металла и т. д.). Нагрузки могут быть статическими, т.е. постоянными по величине и направлению действия, или динамически-

ми, т.е. переменными по величине, направлению и продолжительности действия. Параметрами прочности являются механические напряжения.

Твердостью называется свойство металла или сплава оказывать сопротивление проникновению в него другого, более твердого тела. Испытания металлов и сплавов на твердость проводятся путем вдавливания в их поверхность более твердых предметов:

- стального закаленного шарика диаметром 2,5; 5 или 10 мм (твердость по Бринеллю);
- стального закаленного шарика диаметром 1,588 мм или алмазного конуса с углом 120° (твердость по Роквеллу);
- правильной четырехгранной алмазной пирамиды (твердость по Виккерсу).

Параметром твердости является размер отпечатка.

Упругостью называется свойство металла или сплава восстанавливать первоначальную форму и размеры после прекращения действия внешней нагрузки.

Пластичность определяет способность материала деформироваться под действием нагрузок без разрушения. Пластическое деформирование [23] исследуется при удлинении, сжатии, изгибе, кручении. Описание методики испытания металлов на растяжение и определение всех терминов приведены в ГОСТ 1497-73. Испытания на сжатие описаны в ГОСТ 25.503-97, а на кручение – в ГОСТ 3565-80.

В качестве примера на рис. 2.2 схематично представлена диаграмма растяжения образца (зависимость нормального напряжения σ от деформации ϵ), получаемая в результате испытаний образца на стенде.

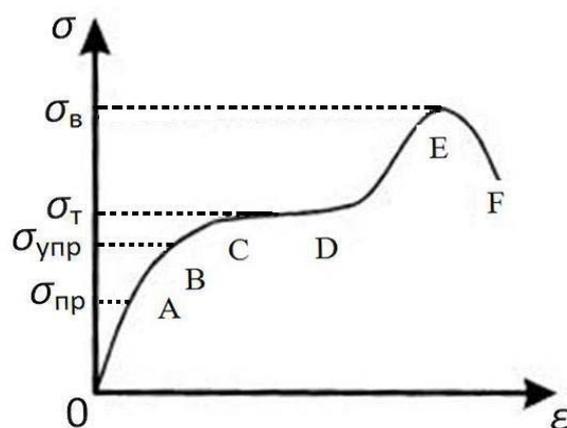


Рисунок 2.2. Диаграмма растяжения

Участок OA соответствует малым деформациям, где выполняется закон Гука, согласно которому удлинение пропорционально приложенной силе; $\sigma_{\text{пр}}$ – предел пропорциональности, характеризующий максимальное значение нагрузки, при котором выполняется закон Гука. Участок AB соответствует упругим деформациям, но закон Гука уже не выполняется; $\sigma_{\text{упр}}$ – предел упругости, при $\sigma < \sigma_{\text{упр}}$ остаточные деформации не возника-

ют. Участок BC – диапазон пластических деформаций. Участок CD – область текучести; σ_T – предел текучести, который характеризует напряжение, при котором деформации продолжают расти без увеличения нагрузки. σ_B – предел прочности, который характеризует напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, выдерживаемой образцом до разрушения. Участок EF оканчивается разрушением (разрывом) образца.

Таким образом, механические свойства металлов и сплавов определяются тем, как они воспринимают внешние нагрузки, т.е. сопротивляются деформированию и разрушению. При их деформировании наблюдается два различных вида деформаций, упругие и пластические, которые различаются и внешними проявлениями (в текущем времени и последствиями), и внутренними механизмами.

Упругие деформации являются обратимыми. Обратимость означает, что после снятия нагрузки тело принимает прежние форму и размеры, т.е. остаточная деформация отсутствует.

Самые важные параметры упругодеформированного состояния – предел упругости $\sigma_{упр.}$ и модули упругости. **Модули упругости** характеризуют деформируемость материала под действием нагрузки в упругом состоянии: модуль Юнга E определяет сопротивление нагрузкам, вызывающим растяжение, сжатие и изгиб, а модуль сдвига G – кручение.

Диапазон нагрузок, при которых происходят только упругие деформации, ограничен **пределом пропорциональности** $\sigma_{пр.}$. Далее с повышением напряжения в отдельных зернах возникают микропластические деформации, которые после снятия нагрузки остаются, т.е. носят необратимый характер. При таких нагрузках остаточные деформации незначительны (порядка 0,001–0,01%), но при высоких требованиях к стабильности размеров они могут быть важны.

Напряжение, при котором появляются остаточные деформации в установленных пределах, называется **условным пределом упругости**. В его обозначении числовой индекс указывает на предел остаточной деформации (в процентах), для которой произведено определение предела упругости, например $\sigma_{0.01}$. Допуски условных пределов упругости стандартизованы. Стандарт допускает определять предел упругости с меньшим допуском на величину остаточного удлинения. При еще меньшем допуске (0,0001 или 0,0002%) соответствующее ему напряжение называют **прецизионным пределом упругости**. Напряжение, при котором пластическая деформация имеет место во всех зернах металла, называется **условным пределом текучести**. Чаще всего он определяется при остаточной деформации на уровне 0,2% и обозначается $\sigma_{0.2}$.

Для материалов, используемых в узлах и элементах гироскопов, следует отметить такую важную характеристику, как **прецизионный предел упругости** $\sigma_{пну}$, который характеризует размерную стабильность металлов [15, 16].

2.1.3. Химические свойства

К химическим свойствам относят химическую активность, растворимость, коррозионную стойкость.

Химические свойства материала характеризуют его способность к химическим превращениям под влиянием веществ (воздействий), с которыми он находится в соприкосновении, а также способность сохранять постоянными состав и структуру материала в условиях инертной окружающей среды. Ряд материалов проявляет активность при взаимодействии с кислотами, водой, щелочами, растворами солей, агрессивными газами и т.д., в ряде случаев растворяясь в них. Эти свойства учитываются и используются в определенных вспомогательных технологических операциях. Например, тонкопленочное покрытие нитрида титана или ниобия хорошо растворяется в плавиковой кислоте. Это свойство используют для стратификации покрытия при наличии дефектов на нем, что позволяет осуществить повторное напыление.

Химическая **коррозионная стойкость** – свойство материала сопротивляться коррозионному воздействию среды (жидкой, газообразной, твердой) или физических воздействий (облучение, электрический ток). При контакте с агрессивной средой в структуре материала происходят необратимые изменения, что вызывает снижение его прочности и преждевременное разрушение конструкции.

2.1.4. Технологические свойства

К технологическим свойствам относят способность материала выдерживать различные методы технологической обработки.

Литейные свойства, например, характеризуют способность материала к получению из него качественных отливок, которые определяются жидкотекучестью, усадкой и ликвацией используемого материала. Указанные термины означают следующее:

- жидкотекучесть характеризует способность расплавленного металла заполнять литейную форму;
- усадка (линейная и объемная) характеризует способность материала изменять свои линейные размеры и объем в процессе затвердевания и охлаждения;
- ликвация характеризует неоднородность химического состава по объему.

Способность материала подвергаться обработке давлением (например, штамповке) – это способность материала пластически изменять размеры и форму под влиянием внешних нагрузок, не разрушаясь, фактически эта способность определяется таким механическим свойством, как пластичность материала.

Свариваемость – это способность материала образовывать неразъемные соединения требуемого качества. Оценивается по качеству сварного шва.

Способность к обработке резанием характеризует способность материала поддаваться обработке различным режущим инструментом, она оценивается по стойкости инструмента и по качеству поверхностного слоя.

Приведенный перечень охватывает лишь небольшую совокупность наиболее значимых свойств материалов, используемых в гиросприборостроении.

2.2. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Материалы, используемые в производстве чувствительных элементов гироскопических приборов, можно разделить на три большие группы:

- металлы и сплавы на их основе;
- неметаллы;
- композиционные материалы.

Среди металлов и сплавов, получивших наиболее широкое применение в гиросприборостроении, следует выделить:

- бериллий, обладающий уникальным сочетанием механических показателей (таких как модуль упругости, прецизионный предел упругости), необходимых для изготовления высокоточных и высокостабильных узлов;
- титан и молибден, хорошо согласующиеся с корундовой керамикой по термическим коэффициентам линейного расширения,
- титан в химическом соединении (нитрид титана), используемый в качестве износостойкого покрытия на поверхности роторов ЭСГ;
- медь, имеющая ряд свойств, определяющих ее преимущества для выполнения различного рода функциональных элементов в узлах гиросприборов.

Среди неметаллов в гиросприборостроении доминируют кремний как материальная основа всей микроэлектроники, а также стекло и пластик оптоволоконна ВОГ.

Среди композиционных материалов можно назвать:

- корундовую керамику, отличающуюся высоким удельным электрическим сопротивлением и размерной стабильностью, применяемую для полусфер гироскопов ЧЭ ЭСГ,
- нанокompозиты на основе углерода для ротора КГ;
- металлические и неметаллические покрытия;
- газовые смеси;
- изотопы элементов, используемых для оптических ячеек ЯМРГ.

Рассматривая конструкционные материалы как элементы, участвующие в процессах формообразования и сборки узлов гиросприборов, с точки зрения возможностей их использования, необходимо оценивать их механические (прочность, пластичность) и теплофизические (ТКЛР, температуры

фазовых переходов, адгезию) свойства, а также некоторые электрофизические и физико-химические характеристики. Очевидно, что при разработке технологий изготовления узлов гиросприборов эти параметры могут рассматриваться в качестве частных показателей, критериев при выборе материалов деталей и узлов, функциональных элементов, армирующих элементов, электродов, токопроводящих и износостойких покрытий и т.д. Ниже приводятся справочные данные по основным конструкционным материалам, используемым в гиросприборостроении.

2.2.1. Бериллий

Бериллий (Be, лат. Beryllium, первоначально был назван глицинием от греч. glykys – сладкий) – один из основных материалов, используемых при изготовлении роторов электростатических гироскопов [26–28]. Впервые бериллий был обнаружен и идентифицирован в 1798 г. французским химиком Л. Вокленом в полудрагоценном камне берилле. Воклен выделил только оксид неизвестного металла. Относительно чистый бериллий в виде порошка был получен через 30 лет независимо Ф. Велером в Германии и Э. Бюсси во Франции.

Ценность бериллия в гиросприборостроении определяется уникально высоким значением модуля упругости $E=290$ ГПа, который в 5–6 раз выше, чем у большинства металлов, и высоким уровнем размерной стабильности, характеризующейся значением прецизионного предела упругости $\sigma_{0,0001}=49$ МПа при 293К, что обеспечивается соответствующими режимами термообработки. Удельное электрическое сопротивление бериллия при 293 К составляет $0,036 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

Технический бериллий ДГП-56 или ТИП-56 содержит соответственно не менее 97% чистого металла. Бериллий марок S-200-F и S-200-F H производства фирмы Materion Brush Wellman Inc (США) содержит не менее 98,5% чистого металла. Максимальный размер зерна для марки ТИП составляет 30–35 мкм, для марки S-200-F – 10–11 мкм, а для марки S-200-FH – 6–8 мкм. Предел прочности σ_b у бериллия ДГП-56 составляет 355–407 МПа вдоль оси и 392–396 МПа поперек оси выдавливания, в то время для материала ТИП-56 соответствующие значения равны 437–451 МПа и 440–468 МПа. Предел текучести бериллия σ_t при температуре 295 К равен 266–287 МПа для материала ДГП-56 и 173–203 МПа для материала ТИП-56. Температура плавления бериллия $T_{пл} = 1560$ К, температура кипения $T_{кип}$ – около 2740°C.

При разработке технологии изготовления деталей и узлов из бериллия необходимо обращать особое внимание на химическую чистоту исходного материала, поскольку большинство примесей, даже в малых количествах, допускаемых техническими условиями, способно изменить фазовый состав бериллия, в частности, за счет образования дисперсных химических соединений, существенно влияющих на механические свойства. Например, при

повышении содержания алюминия с 0,02 % до 0,03 % относительное удлинение бериллия уменьшается с 25 % до 5 %.

Для разработки технологии изготовления деталей и узлов из бериллия, а также для оценки размерной стабильности сварных конструкций (например, сферических роторов ЭСГ) весьма важными являются упругопластические свойства бериллия. Модуль упругости E бериллия, который непосредственно влияет на сохранение формы ротора в процессе его изготовления и вращения в электростатическом подвесе, характеризуется диапазоном значений $(3,10-3,18) \cdot 10^5$ МПа. Анизотропия (неравномерность свойств) модуля Юнга для гироскопических марок бериллия составляет 2%. ТКЛР бериллия α зависит от температуры (при 20°C $\alpha = 12,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), что определяет соответствующие требования к материалам, используемым в неразъемных соединениях с бериллием.

Важным специфическим свойством бериллия является его высокая проницаемость для рентгеновских лучей, которая в 17 раз выше, чем у алюминия, поэтому чистый металлический бериллий применяют для изготовления окон рентгеновских трубок. Малое эффективное сечение захвата тепловых нейтронов в сочетании с малой атомной массой делают бериллий одним из лучших материалов для замедлителей и отражателей тепловых нейтронов атомных реакторов, материалов для оболочек тепловыделяющих элементов. Бериллий является интенсивным источником нейтронов при бомбардировке α -частицами. На этом свойстве основано использование бериллия в нейтронных источниках на основе радия, полония, актиния, плутония. Важное практическое применение бериллий получил как компонент меднобериллиевых сплавов – бериллиевых бронз. Отношение прочности к плотности у бериллия значительно выше, чем у авиационных сталей и сплавов на основе титана и алюминия. Ряд ценных физических свойств позволяет использовать бериллий в электротехнике, в связи, в электронике и радиотехнике. В лазерной технике находит применение алюминат бериллия для изготовления твердотельных излучателей (стержней, пластин). В литейном деле бериллий применяют как эффективный раскислитель. Небольшие присадки бериллия к алюминиевым и магниевым сплавам резко повышают их коррозионную стойкость. Оксид бериллия обладает большой химической устойчивостью и теплопроводностью в сочетании с высоким электрическим сопротивлением и термостойкостью, что позволяет применять его в качестве огнеупорного материала для изготовления тиглей, футеровочных материалов, керамических покрытий и т.д.

2.2.2. Молибден

Название металла молибден (Mo) происходит из греческого слова «молибдос», что в переводе означает «свинец». Такое название было выбрано из-за того, что минеральный молибден имеет характерный блеск, очень похожий на блеск свинца. В 1778 г. шведский химик К. Шееле впервые

получил минеральный молибденит путем прокаливания молибденовой кислоты, но только в 1817 г. Й. Берцелиусу удалось вывести этот элемент в чистом виде.

Использование молибдена в гироприборостроении во многом связано со значениями его ТКЛР (при 20°С ТКЛР $\alpha = 5,0 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$), близкими к ТКЛР корундовой керамики, что также определяет размерную стабильность металлокерамических узлов. У молибдена $T_{\text{пл}} = 2895 \text{ К}$, $T_{\text{кип}} = 5077 \text{ К}$. Предел прочности молибдена $\sigma_{\text{в}}$ составляет 820–1370 МПа и снижается с увеличением температуры. Предел упругости молибдена $\sigma_{0,2} = 438\text{--}600 \text{ МПа}$. Удельное электрическое сопротивление молибдена при 293 К составляет $0,057 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Среди наиболее распространенных в промышленности марок молибдена выделяются:

- МЧ – чистый молибден без легирующих элементов;
- МЧВП – чистый молибден без легирующих элементов, произведенный методом вакуумной плавки;
- МРН – молибден разного назначения, не содержит легирующих элементов, включает большее количество примесей по сравнению с марками МЧ и МЧВП;
- МК – кремний-содержащий молибден;
- ЦМ – в качестве легирующих элементов используются цирконий и/или титан;
- МР – сплав молибдена с рением;
- МВ – сплав молибдена с вольфрамом.

Из молибдена изготавливают сотовые панели космических летательных аппаратов, теплообменники, оболочки возвращающихся на землю ракет и капсул, тепловые экраны, обшивку кромок крыльев и стабилизаторы в сверхзвуковых самолетах.

Молибден – перспективный материал для оборудования, работающего в среде серной, соляной и фосфорной кислот. В связи с высокой стойкостью данного металла в расплавленном стекле его широко используют в стекольной промышленности, в частности, для изготовления электродов для плавки стекла. В настоящее время из молибденовых сплавов изготавливают прессформы и стержни машин для литья под давлением алюминиевых, цинковых и медных сплавов. Высокая прочность и твердость таких материалов при повышенных температурах обусловили их применение в качестве инструмента при горячей обработке сталей и сплавов давлением (оправки прошивных станков, матрицы, прессштемпели).

Еще одной областью применения является производство нагревательных элементов электропечей, работающих в атмосфере водорода при температурах до 1873 К. Также молибден широко используется в радиоэлектронной промышленности и рентгентехнике для изготовления различных

деталей электронных ламп, рентгеновских трубок и других вакуумных приборов.

Молибден существенно улучшает свойства сталей. Небольшие (0,15–0,8 %) добавки Мо в конструкционные стали настолько увеличивают их прочность, вязкость и коррозионную стойкость, что они используются при изготовлении самых ответственных деталей и изделий. Для повышения твердости молибден вводят в сплавы кобальта и хрома (стеллиты), которые применяют для наплавки кромок деталей из обычной стали, работающих на износ (истирание). Также он входит в состав ряда кислотоупорных и жаростойких сплавов на основе никеля, кобальта и хрома.

2.2.3. Медь и ее сплавы

Из всех цветных металлов медь (Cu) нашла в истории наиболее раннее применение. Ее сплавы, называемые бронзами, были известны человечеству с доисторических времен, когда они были единственным металлом, из которого изготавливались оружие и орудия труда (с этим связано название «бронзовый век»).

Медь имеет красновато-розовый цвет, химически мало активна, обладает высокой коррозионной стойкостью в атмосферных условиях и в парах воды. Характерными физическими свойствами меди являются ее высокие тепло- и электропроводность. Удельное электрическое сопротивление меди при 293К составляет $0,017 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, а теплопроводность – порядка 390 Вт/(мК). По электропроводности медь занимает первое место среди других технических металлов. Медь – очень пластичный металл, имеет невысокую механическую прочность. Предел прочности меди σ_b составляет 160 МПа при 293К, а модуль упругости – 120 ГПа. Температура плавления меди $T_{пл} = 1356$ К, температура кипения $T_{кип}$ – около 2870К. Упругость паров меди при 1473 К составляет 0,185 Па, т.е. тонкопленочные медные покрытия достаточно легко можно получить методом термического испарения в вакууме. Плотность меди – $8,93$ г/см³, а ТКЛР при комнатной температуре – $16,8 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹.

Современная промышленность выпускает медные заготовки в виде листового материала, труб, проволоки, прутков и шин. Различают бескислородную (М0) и раскисленную (М1) медь, изделия из которых нашли широкое применение в электротехнической, электронной и электровакуумной промышленности. В бескислородных марках кислород содержится в пределах 0,001%, в раскисленных – 0,01%.

При холодном деформировании влияние примесей заметно проявляется при производстве проволоки. При одинаковом пределе прочности на разрыв σ_b медные образцы марок М0 и М1 имеют разное относительное удлинение – 35% и 30% соответственно. Использование бескислородной меди для производства проводников тока обусловлено не столько величиной электропроводности, сколько технологическим фактором.

Медь широко используется в технике низких температур, вплоть до гелиевых. При низких температурах она сохраняет показатели прочности, пластичности и вязкости, характерные для комнатной температуры. Наиболее часто используемое свойство меди в криогенной технике – ее высокая теплопроводность.

Можно привести примеры использования меди в гироскопическом приборостроении в качестве армирующих элементов при изготовлении сплошных бериллиевых роторов БЭСГ для создания требуемой разницы моментов инерции, поскольку плотность меди намного больше, чем у бериллия. Кроме того, в существующей технологии при формировании тонкопленочных молибденовых электродов на цилиндрах ДПГ на поверхность этих электродов методом магнетронного напыления наносятся медные площадки, к которым пайкой присоединяются проволочные токоподводы.

Основное количество меди используют для приготовления сплавов. В технической литературе медные сплавы разделяют на три группы: латуни, бронзы и медно-никелевые сплавы.

Латунями называются сплавы меди с цинком. Различают двухкомпонентные латуни и специальные, в которые дополнительно введены другие легирующие элементы. Цинк повышает прочность и пластичность меди. Максимальной пластичностью обладает латунь, содержащая 40% цинка. В обозначении марок латуней принята буквенно-цифровая система: первая буква "Л" означает «латунь», затем – перечень символов, входящих в сплав компонентов, затем – их процентное содержание. Первая цифра указывает на содержание меди, остальные – на содержание других легирующих элементов. Например: томпак Л90 – это латунь, содержащая 90% меди, остальное – цинк; латунь алюминиевая ЛА77-2 содержит 77% меди, 2% алюминия, остальное – цинк; латунь ЛАНКМц75-2-2,5-0,5-0,5 содержит 75% меди, 2% алюминия, 2,5% никеля, 0,5% кремния, 0,5% марганца, остальное – цинк.

По сравнению с медью латуни обладают большей прочностью, коррозионной стойкостью и упругостью. Они обрабатываются литьем, давлением и резанием. По технологическому назначению их подразделяют на обрабатываемые давлением и литейные.

Бронзы (название произошло от королевства Бурунди в Италии, откуда в древности поставлялась медь в Европу) – сплав меди с оловом, алюминием, бериллием, кремнием, свинцом, хромом и с другими элементами, кроме цинка и никеля. Как и латуни, бронзы подразделяются на литейные и деформируемые. Марка бронзы состоит из букв "Бр.", после них – символы компонентов, затем их процентное содержание. Например, Бр. А7 – бронза с содержанием алюминия 7%, Бр. ОЦС4-4-2 содержит 4% олова, 4% цинка и 2% свинца.

Бронзы подразделяются на оловянистые – на основе олова и безоловянистые – сплавы с другими металлами. Бронзы применяются при изготовлении антифрикционных деталей (вкладышей подшипников скольжения), арматуры, работающей в пресной воде, жидком топливе и паре при температурах до 523К; используются в химической и пищевой промышленности. Оловянистые бронзы хорошо льются и применяются в художественном литье.

Медно-никелевые сплавы маркируются буквой М, затем – по легирующим элементам аналогично бронзам. Например, мельхиор МНЖМц 30-08-1 содержит 30% никеля, 0,8% железа, 1% марганца. Он имеет высокую коррозионную стойкость, применяется для теплообменных аппаратов, работающих в морской воде, и для украшений.

Константан МНМц40-1,5 имеет большое электрическое сопротивление и применяется в виде проволоки и лент в реостатах, электроизмерительных приборах.

Монель-металл НМЖМц29-2,5-1,5 – сплав на основе меди с высоким содержанием никеля, отличается высокой коррозионной стойкостью в агрессивных средах, широко применяется в судостроении, электротехнике и других отраслях промышленности.

2.2.4. Хром

Хром (Cr) впервые упоминается в труде М.В. Ломоносова «Первые основания металлургии» (1763 г.) как красная свинцовая руда $PbCrO_4$, ее современное название – крокоит. В 1797 г. французский химик Л.Н. Воклен выделил из него новый тугоплавкий металл (скорее всего, Воклен получил карбид хрома) и назвал его хромом (Chrome, от греческого слова – окраска) из-за разнообразия цветов его соединений.

Электролитический рафинированный хром получают в виде чешуек. Чешуйчатый хром широко применяется также в электронике для вакуумного испарения и осаждения тонких пленок в установках с электронно-лучевым нагревом. Из чешуйчатого хрома методом термической обработки в атмосфере чистого азота получают нитрид хрома Cr_2N или азотированные продукты других составов, используемые для легирования специальных сталей и сплавов.

Хром (ГОСТ 5905-2004) в гироприборостроении [17] применяется в качестве материала электродов подвеса в виде тонкопленочных покрытий, например, на керамических полусферах ЧЭ ЭСГ. Температура плавления хрома $T_{пл} = 2150K$, температура кипения $T_{кип} = 2473K$. ТКЛР хрома сильно зависит от температуры и при 20 °С равен $4,4 \cdot 10^{-6} K^{-1}$. Упругость паров хрома, что является важным показателем, учитывая формирование тонкопленочных покрытий хрома методом термического напыления в вакууме, составляет 0,034 Па при 1473 К. Удельное электрическое сопротивление хрома

при 293К равно $0,131 \cdot 10^{-6}$ Ом·м. Предел прочности хрома $\sigma_b = 193$ МПа при $T = 20$ °С.

2.2.5. Ниобий

Ниобий (Nb) был открыт в 1801 г. английским ученым Чарльзом Хэтчетом в минерале, присланном еще в 1734 г. в Британский музей из штата Массачусетс. Минерал был назван колумбитом, а химический элемент получил название «колумбий» (Cb) в честь страны, откуда был получен образец – Колумбии (в то время синоним США). В 1802 г. А.Г. Экеберг открыл тантал, который совпадал практически по всем химическим свойствам с ниобием, и поэтому долгое время считалось, что это один и тот же элемент. Лишь в 1844 г. немецкий химик Генрих Розе установил, что этот элемент отличен от тантала и переименовал его в ниобий в честь дочери Тантала Ниобы, чем подчеркнул сходство между элементами. Однако в некоторых странах (США, Англия) долго сохранялось первоначальное название элемента – колумбий, и только в 1950 г. решением Международного союза теоретической и прикладной химии элементу окончательно было присвоено название ниобий. Впервые чистый ниобий был получен в конце XIX века французским химиком Анри Муассаном электротермическим путем: он восстановил оксид ниобия углеродом в электропечи.

Ниобий по комплексу важнейших физико-химических, механических и технологических свойств является наиболее перспективным металлом новой техники.

Он обладает хорошей прочностью и жаростойкостью. Тугоплавкость считается одним из важных физических свойств металла, и именно благодаря этому ниобий стал востребованным во многих областях промышленности. Плавится и кипит ниобий при температурах $T_{пл} = 2773$ К и $T_{кип} = 5200$ К соответственно. В отличие от многих тугоплавких металлов (вольфрама, молибдена, хрома и др.), хрупких при комнатной температуре, чистый ниобий имеет высокую пластичность при комнатной и минусовых температурах (до 73К).

Ниобий парамагнитен. Он имеет ОЦК кристаллическую решетку с параметром ячейки 3,3 ангстрем. Удельное электрическое сопротивление при 73К составляет $0,152 \cdot 10^{-6}$ Ом·м. Ценными качествами ниобия являются также его высокая коррозионная стойкость в атмосферных условиях, относительно малая плотность ($8,5$ г/см³ против $19,3$ г/см³ для вольфрама и $16,6$ г/см³ для тантала), отсутствие взаимодействия с водой, перегретым паром и с жидкими металлическими теплоносителями (расплавленным натрием, литием и др.).

Все указанные выше качества делают ниобий и его сплавы весьма ценным конструкционным материалом для атомной и ракетной техники. Некоторые сплавы ниобия (60% Nb, 40% Ta и др.) по своей коррозионной стойкости в сильных кислотах не уступают чистому танталу и платине и

являются замечательным конструкционным материалом для химического аппаратостроения.

Сплавы ниобия с оловом, цирконием, танталом, ванадием и другими элементами – лучшие сверхпроводящие материалы, получившие широкое применение при создании сверхмощных ускорителей, отражателей горячей плазмы, для создания квантовых генераторов и других объектов новой техники. Применение их в качестве обмотки электромагнитов позволяет создать сверхмощные магнитные поля при минимальной затрате энергии и ничтожном весе самих магнитов.

В гироприборостроении важным свойством ниобия считается его сверхпроводимость, которая эффективно используется для изготовления изделий криогенной техники. Температура перехода ниобия в сверхпроводящее состояние равна 9,28 К. Чистый ниобий легко обрабатывается давлением на холоде и сохраняет удовлетворительные механические свойства при высоких температурах.

В отличие от молибдена и вольфрама, ниобий отлично сваривается всеми видами сварки, хорошо паяется. Примеси некоторых элементов, особенно водорода, азота, углерода и кислорода, сильно ухудшают пластичность и повышают твердость ниобия. Химически ниобий довольно устойчив. При прокаливании на воздухе окисляется до Nb_2O_5 . При взаимодействии ниобия и графита образуются карбиды Nb_2C и NbC , твердые жаропрочные соединения. В системе Nb–N существуют несколько фаз переменного состава – нитриды Nb_2N и NbN . Нитрид ниобия NbN используется для производства тонких и ультратонких сверхпроводящих пленок с критической температурой от 5 до 10 К с узким переходом, порядка 0,1 К.

2.2.6. Титан и его сплавы

Титан (*Ti*) был открыт в форме окисла TiO_2 . Это открытие сделали практически одновременно и независимо друг от друга англичанин У. Грегор и немецкий химик М.Г. Клапрот. Грегор, исследуя состав магнитного железистого песка, выделил новую «землю» (оксид) неизвестного металла, которую назвал менакеновой. В 1795 г. Клапрот открыл в минерале рутиле новый элемент и назвал его титаном. Спустя два года Клапрот установил, что рутил и менакеновая земля – оксиды одного и того же элемента, за которым и осталось название «титан», предложенное Клапротом. Через 10 лет открытие титана состоялось в третий раз. Французский ученый Л. Воклен обнаружил титан в анатазе и доказал, что рутил и анатаз – идентичные оксиды титана.

Первый образец металлического титана получил в 1825 г. Й.Я. Берцелиус. Титан не находил промышленного применения, пока Г. Кролл в 1940 г. не запатентовал простой магниетермический метод восстановления металлического титана из тетрахлорида. Этот метод (процесс Кролла) до на-

стоящего времени остается одним из основных в промышленном получении титана.

Титан и его сплавы по своим физико-механическим свойствам и технологичности превосходят большинство современных конструкционных материалов, включая самые распространенные – сталь и алюминий. Титан и его производные характеризуются высокими температурой плавления и удельным электросопротивлением, прочностью, сравнимой с большинством марок легированных сталей, коррозионной стойкостью на воздухе, в воде и в химически агрессивных средах, немагнитностью и многими другими полезными свойствами. При этом титан очень легкий – его удельная плотность составляет 56% удельной плотности стали, он биологически инертен и хорошо обрабатывается давлением. Все перечисленное сделало титан универсальным конструкционным материалом, который с начала 40-х годов XX века широко используется в высокотехнологичных областях промышленности.

Титановые сплавы маркируют буквами ВТ или ОТ и порядковым номером. По технологическому назначению их делят на деформируемые и литейные, а по прочности – на три группы:

- ВТ1, ВТ1-0, ВТ1-00, ВТ1-1, ОТ4-0 ($\sigma_B = 300\text{--}700$ МПа);
- ВТ3-1, ОТ4, ВТ5, ВТ5-1 ($\sigma_B = 700\text{--}1000$ МПа);
- ВТ6, ВТ14, ВТ15 (σ_B более 1000 МПа после закалки и старения).

Также можно провести классификацию титановых сплавов по составу легирующих элементов. Легирующие элементы разделяют на три группы: α -стабилизаторы, β -стабилизаторы и нейтральные упрочнители. Приведем некоторые примеры:

- α -стабилизаторы – алюминий, кислород, углерод, азот;
- β -стабилизаторы – молибден, ванадий, железо, хром, никель;
- нейтральные упрочнители – цирконий, олово, кремний.

Например, если в состав титанового сплава входят алюминий и ванадий, то такой сплав называется ($\alpha+\beta$)-сплавом.

Сплавы с α -структурой – ВТ1-0, ВТ1-00, ВТ5, ВТ5-1, ОТ4, ОТ4-0. Эта группа сплавов отличается хорошей свариваемостью и термической стабильностью, т.е. отсутствием увеличения хрупкости при совместном длительном воздействии высоких температур и напряжений.

Сплавы с ($\alpha+\beta$)-структурой – сплавы ВТ14, ВТ9, ВТ8, ВТ6, ВТ6С, ВТ3-1, ВТ22, ВТ23. Благодаря более пластичной β -фазе эти сплавы более технологичны и лучше обрабатываются давлением, чем α -сплавы.

Сплавы с β -структурой – опытные сплавы ВТ15, ТС6 с высоким содержанием хрома и молибдена. Эти сплавы сочетают хорошую технологическую пластичность с очень высокой прочностью и хорошей свариваемостью.

Технический титан ВТ-1-0 (ГОСТ 19807-91), используемый в гиросприборах, имеет высокую удельную прочность, коррозионную стойкость и

пластичность, а также обладает исключительной способностью поглощать различные газы и удерживать их в широком диапазоне температур, т.е. является хорошим геттером. Титан ВТ-1-0 имеет предел прочности σ_B до 500 МПа и предел упругости $\sigma_{0,2}$ до 380 МПа при $T=293\text{K}$., а при $T=523\text{ }^\circ\text{K}$ σ_B снижается до 280 МПа. У чистого титана $T_{\text{пл}} = 1941\text{ }^\circ\text{K}$, $T_{\text{кип}} = 3442\text{ }^\circ\text{K}$. Его ТКЛР в зависимости от температуры изменяется в пределах $\alpha_{(293-373)\text{ K}} = 8,2 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ и $\alpha_{(293-873)\text{ K}} = 9,5 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$, т.е. в первом приближении титан по ТКЛР согласован с корундовой керамикой, что определяет его использование в составе металлокерамических узлов (МКУ). Модуль упругости титана $E = 11,2 \cdot 10^4$ МПа.

Нитрид титана – бинарное химическое соединение титана с азотом. Представляет собой фазу внедрения с широкой областью гомогенности, которая составляет от 14,8 до 22,6 % азота (по массе), что можно обозначить брутто-формулами от $TiN_{0,60}$ до $TiN_{1,0}$ соответственно. Нитрид титана широко используется в качестве материала защитных износостойких тонкопленочных покрытий [17]. Плотность нитрида титана составляет $5,44\text{ г/см}^3$. Температура плавления нитрида титана $T_{\text{пл}} = 3220\text{ K}$. ТКЛР нитрида титана зависит от температуры и при 273K составляет $4,7 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$. Электрическое сопротивление нитрида титана составляет $0,04 \cdot 10^{-6}\text{ Ом}\cdot\text{м}$. Микротвердость нитрида титана превышает 20 000 МПа.

Нитрид титана характеризуется широкой цветовой гаммой нестехиометрических соединений (в пределах области гомогенности), связанной с изменением его цвета от светло-золотисто-желтого при недостатке азота до темно-золотисто-желтого при избыточном количестве азота, что определяет использование этого эффекта при формировании растрового рисунка на роторах ЭСГ. Это позволяет при использовании ионно-плазменных технологий управлять контрастностью раstra за счет регулирования коэффициента отражения базовой поверхности, в качестве которой выступает нитрид титана.

2.2.7. Конструкционные стали

Конструкционные стали [29–32] в зависимости от состава подразделяются на углеродистые и легированные.

Углеродистые стали подразделяются на стали общего назначения (ГОСТ 380-88), качественные стали (ГОСТ 1050-94) и инструментальные стали (ГОСТ 1435-99).

Стали общего назначения в точном приборостроении не применяются. Качественные стали содержат до 0,85% углерода и обозначаются двумя цифрами, означающими среднее содержание углерода в сотых долях процента. Например, стали 10, 20, 35 соответственно содержат 0,1; 0,2; 0,35% С. Инструментальные стали содержат от 0,7 до 1,2% С и обозначаются буквой “У” и цифрой, которая означает десятые доли процента углерода. Например, в сталях У7, У8, У12 содержится соответственно 0,7; 0,8; 1,2% С.

В зависимости от содержания углерода углеродистые стали подразделяют на малоуглеродистые (до 0,25% С), среднеуглеродистые (от 0,30 до 0,55%) и высокоуглеродистые (более 0,60% С).

Малоуглеродистая сталь обладает невысокой прочностью, высокой пластичностью и хорошей свариваемостью, что позволяет использовать ее для кожухов приборов, в том числе герметичных, получаемых холодной штамповкой с глубокой вытяжкой.

Среднеуглеродистая сталь является сталью средней прочности, и ее используют после нормализации, улучшения и термического упрочнения закалкой и низким отпуском. Из среднеуглеродистой стали изготавливают оси, рычаги, штифты, кольца, зубчатые колеса, нагруженный крепеж. Во избежание коррозии детали из углеродистой стали необходимо защищать гальваническими покрытиями или смазкой. Среднеуглеродистая сталь с 0,35% С, обладая хорошими литейными свойствами, используется для изготовления литых и литосварных карданных колец, корпусов, кронштейнов и других гироскопических деталей. Эта сталь обозначается 35Л.

Высокоуглеродистая сталь имеет по сравнению с низко- и среднеуглеродистыми наивысшие прочность и твердость. В приборостроении наиболее широкое применение эта сталь получила при изготовлении пружин и других упругих элементов. Пружинные стали содержат обычно 0,5–0,6% С (ГОСТ 14959-79) и требуют закалки и среднего отпуска. Высокоуглеродистая инструментальная сталь находит применение при изготовлении деталей несложной конфигурации, требующих повышенной твердости: эксцентрики, осей, валиков, втулок и др.

Легированные стали по структуре охватывают все три основных класса. По сравнению с углеродистыми они имеют более высокие прочность и коррозионную стойкость, лучшие прокаливаемость и способность к поверхностному упрочнению, а также более низкую температуру перехода в хрупкое состояние. Легированные стали маркируют цифрами и буквами. Двухзначные цифры в начале марки показывают содержание углерода в сотых долях процента. Следующие за ними буквы обозначают легирующие элементы: Х – хром, С – кремний, Н – никель, Ф – ванадий, Ю – алюминий, Г – марганец, М – молибден, В – вольфрам, Т – титан, Р – бор, К – кобальт, Д – медь, Ц – цирконий, Б – ниобий, П – фосфор, Ч – редкоземельные металлы, А – азот. Цифры после буквы определяют содержание элемента в процентах. Уменьшение содержания вредных примесей серы и фосфора повышает качество стали. Для обозначения высококачественных и особо высококачественных сталей в конце марки ставят буквы А и Ш соответственно.

Среди сталей по ГОСТ 4543-71 наиболее широкое применение в гироскопии получили марки 40Х, 30ХГСА, 38Х2МЮА. Наилучшие свойства стали марок 40Х и 30ХГСА приобретают после закалки и отпуска. Сталь марки 40Х предназначена для шестерен, валиков, осей, упоров и других

деталей приборов. Сталь 30ХГСА (хромансиль) относится к высокопрочным сталям, а отсутствие в ней никеля делает ее дешевой. Сталь предназначена для ответственных деталей приборов, работающих в условиях повышенных нагрузок и трения (валики, шестерни, оси, муфты, установочные кольца). Сталь 38Х2МЮА предназначена для ответственных азотируемых деталей типа направляющих, втулок, кареток, кулачков, пальцев и других деталей. Азотированные и полированные детали существенно повышают сопротивляемость общей коррозии.

2.2.8. Прецизионные сплавы

Применяемые в приборостроении сплавы на основе Fe, Ni, Co, Cr с содержанием железа не более 50% называются прецизионными и по назначению могут быть объединены в четыре группы:

- 1) магнитно-мягкие сплавы (79НМ, 80НХС, 81НМА, 50Н, 36КНМ и др.);
- 2) магнитно-твердые деформируемые (52К5Ф и др.) и литые (типа ЮНДК) сплавы;
- 3) сплавы с заданным температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР) (Н36, 29НК и др.);
- 4) сплавы с заданными свойствами упругости (36НХТЮ, 40ХНЮ-ВИ, 42НХТЮ и др.).

Обозначение прецизионных сплавов состоит из цифр и букв. Как правило, первые две цифры обозначают содержание в процентах основного легирующего элемента, буквенное обозначение которого следует за этими цифрами. Последующие буквы обозначают другие легирующие элементы, иногда в совокупности с предшествующими им цифрами, выражающими процентное содержание этих элементов.

Магнитно-мягкие сплавы (пермаллои) по ГОСТ 10160-75 используют в качестве сердечников магнитопроводов и магнитных экранов. Большинство этих сплавов получено на основе никеля.

Сплав 79НМ широко применяется для шихтованных магнитопроводов электрических вычислительных устройств, работающих в переменных электрических полях, в качестве сердечников малогабаритных трансформаторов и дросселей.

Сплав 50Н, обладая более высокой, чем предыдущий, индукцией насыщения, находит применение при изготовлении витых магнитопроводов, сердечников силовых трансформаторов, реле и других деталей магнитных цепей.

Пермаллой 80НХС отличается от других марок пермаллоев более высоким электрическим сопротивлением, что определяет его широкое применение в сердечниках и магнитопроводах, работающих при высоких частотах.

Исключительно полезными свойствами для некоторых приборов навигационных систем характеризуется пермаллой 81НМА, обладающий наивысшей магнитной проницаемостью в слабых постоянных и переменных

полях намагничивания, а также повышенной стабильностью свойств при механических напряжениях. Он находит применение при изготовлении роторов магнитных подвесов гравиметрических градиентометров и вариометров, магнитных систем, магнитных экранов, в том числе при работе при повышенных частотах внешних магнитных полей.

Сплав 36КНМ имеет худшие магнитные свойства, чем у перечисленных пермаллоев, но обладает высокой коррозионной стойкостью. Кроме того, его магнитная проницаемость практически не изменяется после механической обработки, поэтому его применяют для высокоточных магнитно-мягких деталей, для которых из-за потери геометрической точности недопустим высокотемпературный отжиг в качестве заключительной операции, например, для многозубцовых магнитопроводов роторов и статоров вращающихся трансформаторов.

К прецизионным **магнитно-твердым сплавам (викаллоям)** относятся деформируемые высококобальтовые сплавы викаллои типа 52К5Ф (53% Со; 4,5% V; ост. Fe) и литые магнитно-твердые сплавы на кобальт-железоникель-алюминиевой основе типа ЮНДК с содержанием кобальта от 24 до 40%. Викаллои применяют в шихтованных роторах гистерезисных двигателей. Сплавы типа ЮНДК по ГОСТ 17809-72 отличаются очень высокими значениями коэрцитивной силы, что позволяет применять их для коротких магнитов в магнитоэлектрических приборах, имеющих системы с сильными размагничивающими полями.

Следующая группа прецизионных сплавов включает **сплавы с заданным ТКЛР** [33]. Среди них выделяются железоникелевые сплавы (инары) с содержанием никеля около 36%, обозначаемые Н36, или более сложного состава (ГОСТ 10994-74), но отличающиеся тем, что их ТКЛР (ГОСТ 14080-78) имеет чрезвычайно низкие значения (около $1 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹), что на порядок ниже ТКЛР стали. Эти сплавы применяют для прецизионных деталей, размеры которых важно сохранить с высокой точностью в переменных температурных полях, например, для СВЧ-резонаторов, деталей измерительных приборов, базовых деталей лазерных гироскопов и т.п.

Другая широко применяемая группа сплавов с заданным ТКЛР – коваровые сплавы, предназначенные для вакуумно-плотных соединений со стеклами. Различные марки ковара имеют ТКЛР от $4 \cdot 10^{-6}$ до $7 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹. Наиболее широко используется ковар марки 29НК (29% Ni; 17% Со; ост. Fe). Область применения ковара в гироскопии – это герметичные вводы, крышки вакуумных гироскопических и других приборов и чувствительных элементов.

Уникальным сочетанием высокого сопротивления малым пластическим деформациям и релаксационной стойкости обладают **дисперсионно-твердеющие прецизионные сплавы**. Наиболее широкое применение из сплавов этой группы получили 36НХТЮ (36% Ni; 12% Cr; 3% Ti; 1% Al; 1% Mn; ост. Fe) и 40ХНЮ-ВИ (40% Cr; 3,5% Al; ост. Ni).

Сплав 36НХТЮ используют для изготовления витых и плоских пружин. Из прутков этого сплава (ГОСТ 14119-85) изготавливают детали гироскопов и других ЧЭ, от которых требуется высокая размерная стабильность и повышенная твердость – до 35 НРС_Э. Эти материалы обладают высокой прочностью в условиях статического, циклического или динамического нагружения, а также высоким сопротивлением малым пластическим деформациям в условиях как кратковременного, так и длительного нагружения. Это позволяет использовать их, например, в качестве гибких элементов (мембран) в узлах регулируемых гермовводов, свариваемых с центрирующими кольцами ЧЭ ЭСГ.

Еще более высокие значения прочности и твердости имеет сплав 40ХНЮ-ВИ. Ввиду высокой твердости сплав может применяться в узлах трения. Имеется опыт применения этого сплава для изготовления основных деталей закрытого обращенного шарового гироскопа (ротор, ось, опоры и др.), обработанных в зависимости от функционального назначения на разную твердость, но имеющих близкие ТКЛР. Сплав 40ХНЮ-ВИ является сплавом на основе системы Ni-Cr. По совокупности таких свойств, как высокая размерная стабильность, стабильный коэффициент линейного расширения и высокий модуль упругости, сплав 40ХНЮ-ВИ является одним из наилучших для обеспечения высокой точности сохранения геометрических параметров прецизионных узлов и деталей. Он широко применяется для различных высокоточных изделий точного приборостроения, таких как корпусные детали, ответственные прецизионные узлы гироскопов с точностью до единиц и десятых долей микрометра, например, опоры и фланцы газодинамических подшипников, детали акселерометров, скважинных модулей ориентации и т.п.

2.2.9. Кремний

Впервые в чистом виде кремний (Si) как элемент был выделен в 1811 г. французскими учеными Жозефом Луи Гей-Люссаком и Луи Жаком Тенаром.

Кристаллическая решетка кремния – кубическая гранецентрированная типа алмаза, параметр решетки $a=0,357$ нм (при высоких давлениях получены и другие полиморфные модификации кремния), но из-за большей длины связи между атомами Si-Si по сравнению с длиной связи C-C твердость кремния значительно меньше, чем алмаза. Кремний хрупок, и только при нагревании выше 800 °С он становится пластичным веществом. Он прозрачен для инфракрасного излучения, начиная с длины волны 1,1 мкм. Кремний в монокристаллической форме является полупроводником.

Полупроводниковые свойства кремния обеспечивают ему место базового материала в электро- и радиотехнике. Кремний в буквальном смысле слова служит основой современной электротехники. На его основе изго-

тавливают транзисторы, фотоэлементы, интегральные схемы, диоды и т.д. Сверхчистый кремний составляют основу солнечной энергетики.

При создании электронных элементов на основе кремния используется преимущественно приповерхностный слой монокристалла толщиной до десятков мкм, поэтому качество поверхности кристалла может оказывать существенное влияние на электрофизические свойства кремния и, соответственно, на свойства созданного электронного устройства. При создании некоторых устройств, например, микромеханического гироскопа, используется технология, модифицирующая поверхность монокристалла путем обработки поверхности кремния различными химическими реагентами и последующим облучением для создания требуемой топологии.

К недостаткам материала можно отнести лишь относительную хрупкость при хорошей твердости. Физические свойства кремния следующие: температура плавления $T_{пл} = 1690$ К ; температура кипения $T_{кип} = 2873$ К; плотность $2,33$ г/см³; модуль упругости поликристаллического образца $162,7$ ГПа.

Для промышленности наибольший интерес представляют электрофизические характеристики неметалла. Свойства его определяются примесями, что позволяет получать кристаллы кремния с заданными свойствами. Так, добавка бора, алюминия, индия дает возможность вырастить кристалл с дырочной проводимостью, а введение фосфора или мышьяка – кристалл с электронной проводимостью.

2.2.10. Корундовая керамика

Корундовая керамика создается на основе корунда– одной из кристаллических модификаций оксида алюминия (Al_2O_3), обладающей высокими электрическими, механическими и тепловыми свойствами. В составе корундовой керамики 95% Al_2O_3 , остальную часть составляет стеклофаза. Параметры корундовой (алюмооксидной) керамики варьируются незначительно, в зависимости от содержания оксида алюминия (95– 99%). Ее изготавливают при высоких температурах обжига (1973–2273 К). В состав сырья входят технический глинозем и электрокорунд, используются добавки MgO (до 1,5%), тормозящие рост кристаллитов, TiO_2 (до 1%). Технология производства достаточно сложна.

Предел прочности керамики на сжатие $\sigma_{в(сж)}$ составляет 2000 МПа при 293 К. Корундовая керамика сохраняет некоторые механические характеристики при очень высоких температурах. Модуль Юнга при 293 К равен 378000 МПа, однако предел прочности на растяжение $\sigma_{в}$ корундовой керамики лежит в пределах 120–140 МПа. ТКЛР корундовой керамики зависит от температуры и при 293 К равен $6,0 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹.

Этот материал отличается низкими диэлектрическими потерями в диапазоне радиочастот и при повышенных температурах, обладает высокой термостойкостью (до 1873 К), а также большой механической прочностью

и хорошей теплопроводностью, которая в 10–20 раз выше, чем у изоляторного фарфора. Благодаря высокому электрическому сопротивлению, электрической прочности и значительной теплопроводности корундовая керамика используется для производства изоляторов для свечей зажигания, проходных изоляторов, клеммных сборок, наконечников и других изделий, применяется также при производстве различных элементов для электротехники. В гироскопостроении корундовая керамика широко используется для изготовления корпусных узлов гироскопов электростатических гироскопов различных модификаций.

2.2.11. Углеситалл

Углеситалл (УСБ-15) – нанокompозитный материал на основе углерода, структура которого представляет собой дисперсные сферические частицы размером в десятки нанометров, связанные в монолит. К достоинствам углеситалла стоит отнести его высокую износостойкость, газонепроницаемость, устойчивость к температурным воздействиям и малый ТКЛР (порядка $3,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), химическую и биологическую инертность.

Углеситалл получают путем направленной кристаллизации, что приводит к сегментарному характеру структуры материала. Микротвердость составляет 1103 МПа, плотность $1,8 \text{ г/см}^3$, предел прочности на изгиб 318 МПа (на сжатие 455 МПа, на растяжение 115 МПа), модуль упругости при изгибе 23 ГПа. Химический состав: Бор (В) – 14,07%, Углерод (С) – 85,93%. Удельное электрическое сопротивление $15 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Материал показывает хорошую совместимость с ниобиевым покрытием толщиной до 200 мкм, нанесенным электролитическим осаждением, что делает его перспективным для применения в качестве подложки для ротора криогенного гироскопа.

Очевидно, что обеспечение технических требований к изделию во многом связано с выбором конструкционных материалов, из которых изготавливаются узлы и элементы гироскопа, а также методов и средств их обработки. На рис. 2.3 представлена конструкция ЧЭ ЭСГ, которая служит наглядным примером эффективного сочетания различных конструкционных материалов.

ЧЭ ЭСГ представляет собой вакуумную сферическую полость, образованную двумя полусферами 1 состыкованными на центрирующем керамическом кольце 2, с тонкопленочными электродами подвеса 4, в которой размещен оболочковый бериллиевый ротор 3. Ротор раскручивается до сотен тысяч оборотов в минуту и вращается длительное время в режиме выбега в высоком вакууме, который необходим для исключения сил молекулярного трения. Ротор поддерживается в подвешенном состоянии полем системы электродов 4, к которым подведено через гермовводы 5 высокое напряжение. Ротор разгоняется до рабочих скоростей магнитным полем катушек, в которых симметрично возбуждается ток высокой частоты.

Для съема информации о положении ротора относительно оболочки используются расположенные по полюсам керамических полусфер оптические чувствительные элементы, световой сигнал к которым, отраженный от ротора, поступает через сапфировые окна 8. В керамическое кольцо герметично впаяны микронасос, поддерживающий необходимый высокий вакуум в рабочем зазоре, и электрод для снятия заряда с ротора. На внутренней поверхности керамических полусфер размещено несколько опор с алмазоподобным покрытием, необходимых для создания антифрикционного контакта при аварийных посадках ротора.

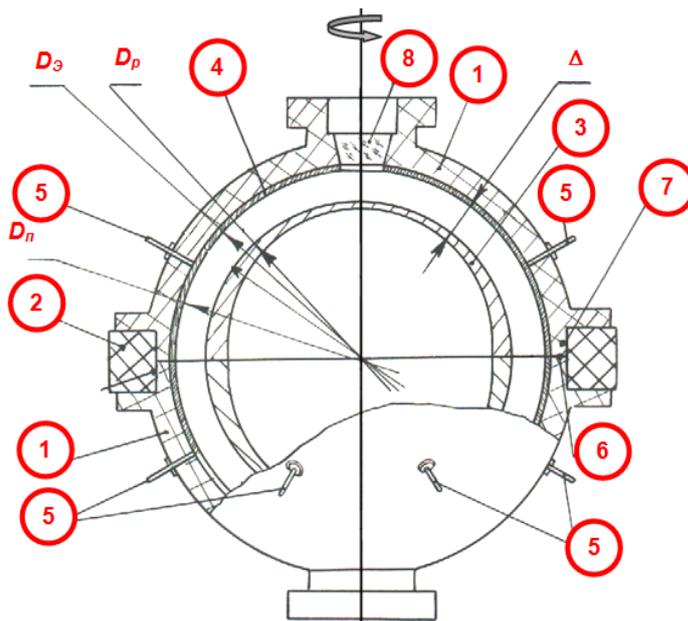


Рисунок 2.3. Конструктивная схема ЧЭ ЭСГ. 1 – керамические полусферы гиросферы; 2 – центрирующее керамическое кольцо, на котором стыкуются полусферы 1; 3 – тонкостенный бериллиевый ротор; 4 – тонкопленочные электроды подвеса; 5 – гермовводы для подачи высокого напряжения на электроды подвеса 4; 6 – плоскость стыковки полусфер, образующих сферическую внутреннюю полость гиросферы, в которой размещен ротор 3; 7 – направляющие поверхности полусфер 1 при стыковке; 8 – окна из лейкосапфира; Δ – зазор между ротором 3 и сферой электродов 4; D_p – диаметр ротора; D_n – внутренний диаметр полусфер 1; $D_э$ – диаметр сферы электродов подвеса 4

К основным материалам, используемым в различных модификациях ЭСГ, можно отнести бериллий, из которого изготавливаются сферические роторы; корундовую керамику для выполнения корпусных узлов гиросферы; хром и титан, являющиеся основой тонкопленочных электродов подвеса. Кроме того, в качестве износостойкого покрытия на поверхности ротора формируется покрытие из нитрида титана, на котором для обеспечения функционирования оптоэлектронной системы съема информации формируется светоконтрастный растровый рисунок. Растровый рисунок представляет собой модифицированные припо-

верхностные слои в виде соединений различного состава, включая возможные интерметаллиды, сложные оксиды и нестехиометрические фазы, получаемых при обработке базовой поверхности износостойкого покрытия нитрида титана.

В процессе конструкторско-технологического проектирования важно учитывать свойства материалов – механические, электрофизические, оптические и др., поскольку оптимальное сочетание и согласованность этих свойств во многом определяют качество выполнения узлов и элементов и, соответственно, рабочие параметры гироскопа.

ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 2

1. Приведите классификацию свойств конструкционных материалов. Что относится к физическим, химическим, механическим и технологическим свойствам материалов?
2. Дайте определения таким механическим свойствам конструкционных материалов, как прочность, твердость, упругость, вязкость, пластичность, ползучесть, усталость.
3. Что такое упругие и неупругие деформации? Поясните с использованием диаграммы растяжения образца.
4. Что такое прецизионный предел упругости? Что такое условный предел текучести?
5. Назовите конструкционные материалы, применяемые на сегодняшний день в гиросприборостроении.
6. Почему бериллий нашел широкое применение при изготовлении роторов шаровых гироскопов?
7. Что вы можете рассказать о физико-химических, механических и технологических свойствах молибдена?
8. Что такое латуни, и что такое бронзы?
9. Когда впервые упоминается в литературных источниках хром и каково его применение в гиросприборостроении сегодня?
10. Где используется сверхпроводимость?
11. Расскажите о свойствах и применении титана и соединения нитрида титана.
12. Какие виды сталей вам известны?
13. Расшифруйте обозначения следующих марок легированных сталей: 40Х, 30ХГСА, 38Х2МЮА.
14. Что такое прецизионные сплавы и где они используются?
15. Что такое пермаллой и викаллой, и как они используются при изготовлении гироскопических изделий?
16. Что вам известно про сплавы с заданным ТКЛР?
17. Что такое дисперсионно-твердеющие прецизионные сплавы?
18. Почему кремний нашел широкое применение в микроэлектронике?
19. Что такое углеситалл, как его получают и где он применяется в гиросприборостроении?
20. Опишите строение чувствительного элемента электростатического гироскопа и поясните, какие материалы используются при его изготовлении.

ГЛАВА 3

Формообразование деталей и узлов гироскопических приборов методами механической обработки

2.2.11. ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Существующие на сегодняшний день методы обработки конструкционных материалов охватывают широкий спектр различных по своей физической природе технологий [34–40]. На рис. 3.1 представлена условная классификация наиболее распространенных методов технологической обработки, используемых при изготовлении гироскопических приборов.

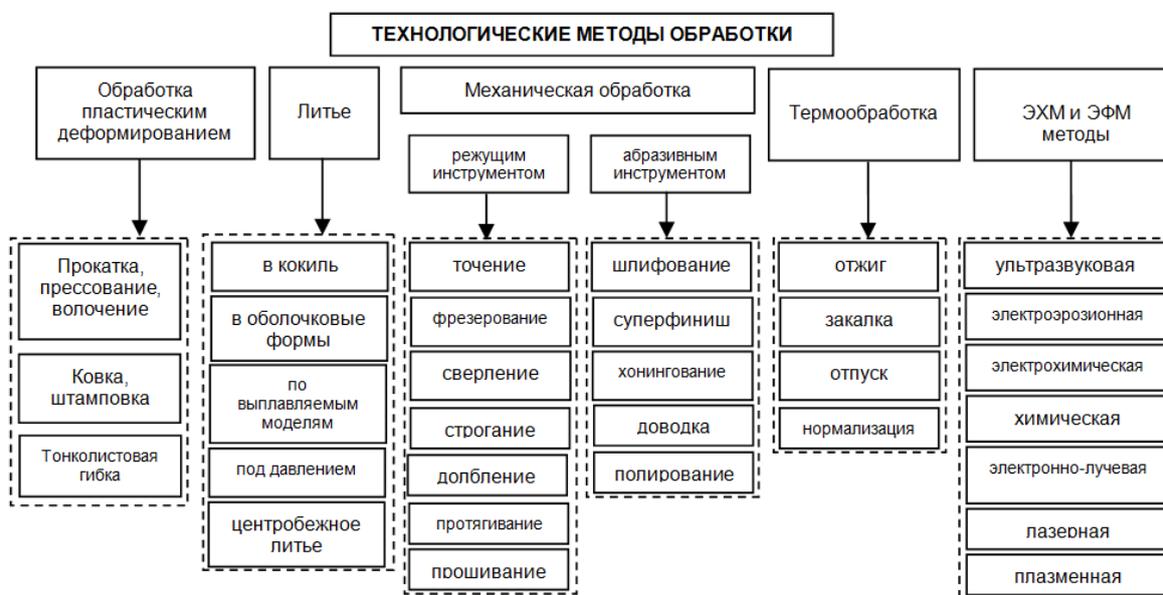


Рисунок 3.1. Классификация технологических методов обработки материалов

Согласно представленной схеме, на первом уровне классификации можно выделить пять основных методов.

Обработка пластическим деформированием. Несмотря на большое многообразие процессов обработки давлением, их можно объединить в три группы.

К первой группе относятся прокатка, прессование и волочение – процессы, используемые в металлургическом производстве для создания заготовок в виде листов, полос, лент и профильного проката (трубы, профили, проволока и т. п.).

Прокатка – способ обработки металлов и сплавов давлением, состоящий в обжатии их между вращающимися валками прокатных станов.

Прессование – способ обработки материалов давлением для их уплотнения и придания определенной формы с помощью специального инструмента – пресса.

Волочение – способ обработки давлением, заключающийся в протягивании заготовок через сужающееся отверстие (фильеру) в инструменте, называемом волокой.

Во вторую группу входят такие процессы, как ковка и объемная штамповка. И штамповка, и ковка бывают горячими и холодными. Горячей называется обработка, которая начинается и, главное, заканчивается при температуре выше температуры рекристаллизации материала. Холодной называется такая обработка, которая начинается при любой температуре, но заканчивается обязательно при температуре ниже температуры рекристаллизации обрабатываемого материала. Штамповка, в отличие отковки, определяется большей точностью и производительностью, благодаря использованию штампов.

К третьей группе следует отнести тонколистовую гибку, при которой пластически деформируется лишь часть материала, а в сочетании, например, с вырубкой, прошивкой, сверлением и другими простейшими операциями гибка позволяет получить детали с довольно сложной конфигурацией (держатели, угольники, кронштейны, скобы), находящие широкое применение при изготовлении различных гироскопических приборов.

Литье – технологический метод обработки, при котором специальные формы заполняют материалом, находящимся в жидком агрегатном состоянии, с последующим охлаждением. Различают следующие виды литья: в кокиль, в оболочковые формы, по выплавляемым моделям, под давлением, центробежное литье. В гироскопостроении литье используется редко, в основном для изготовления литьевых корпусных деталей.

Термообработка – это совокупность операций нагрева, выдержки и охлаждения твердых металлических сплавов с целью получения заданных свойств за счет изменения внутреннего строения и структуры. Термическая обработка используется либо в качестве промежуточной операции для улучшения обрабатываемости давлением или резанием, либо как окончательная операция технологического процесса, обеспечивающая заданный уровень свойств изделия, чаще всего для придания материалу требуемой

твердости. В рамках тепловой обработки выделяют следующие операции: отжиг, закалка, отпуск и нормализация.

Отжиг – вид термической обработки, заключающийся в нагреве до определенной температуры, выдержке в течение определенного времени при этой температуре и последующем, обычно медленном, охлаждении до комнатной температуры.

Закалка – вид термической обработки материалов (металлов, их сплавов, стекла), заключающийся в их нагреве выше критической температуры (температуры изменения типа кристаллической решетки) с последующим быстрым охлаждением.

Отпуск и нормализация – виды температурной обработки сталей, регламентированные соответствующими ГОСТами. Отпуск необходим для снятия внутренних напряжений, а также для придания материалу требуемого комплекса механических и эксплуатационных свойств. В большинстве случаев материал становится более пластичным при некотором уменьшении прочности.

Электрохимические (ЭХМ) и электрофизические (ЭФМ) методы обработки – это методы технологической обработки, в основу которых положены различные химические и физические процессы – ультразвуковое воздействие, электронно-лучевое, плазменное, химическое и т.д. Подробно лазерная, электронно-лучевая и ионно-плазменная обработка рассмотрены в разделе 4 данного пособия.

Механическая обработка – обработка изделий из металлов, сплавов и других материалов с помощью механического режущего воздействия с применением резца, сверла, фрезы и другого режущего и абразивного инструмента. Обработка осуществляется на металлорежущих станках согласно технологическому процессу. К типовым деталям, подвергаемым механической обработке, в гироприборостроении следует отнести валы, втулки, корпуса, фланцы, пружины и т.д.

3.1. ТОКАРНАЯ ОБРАБОТКА

Точение на токарных станках – наиболее распространенный метод изготовления деталей типа тел вращения (валов, дисков осей, втулок и т.д.) [34–37]. На них можно производить обработку цилиндрических, конических, сферических и профильных поверхностей деталей, подрезание торцов, вытачивание канавок, нарезание внешних и внутренних резьб, накатывание рифлений, сверление, зенкерование. При токарной обработке главным движением является вращательное движение заготовки, движением подачи – медленное поступательное движение резца. На рис. 3.2 показаны схемы различных видов работ, выполняемых на токарных станках:

- продольное точение гладких цилиндрических и полицилиндрических ступенчатых поверхностей (рис 3.2, а);
- точение наружных конических поверхностей (рис 3.2, б);

- обработка плоских торцов и уступов (рис 3.2, в);
- прорезание канавок и отрезка заготовок (рис 3.2, г);
- растачивание цилиндрических и конических отверстий (рис 3.2, д, е);
- сверление, зенкерование и развертывание отверстий (рис 3.2, ж);
- нарезание наружной и внутренней резьбы резцом (рис 3.2, з);
- нарезание внутренней резьбы метчиком (рис 3.2, и) и наружной – плашкой;
- фасонное обтачивание (рис 3.2, к-л);
- накатывание рифленых поверхностей (рис 3.2, м).

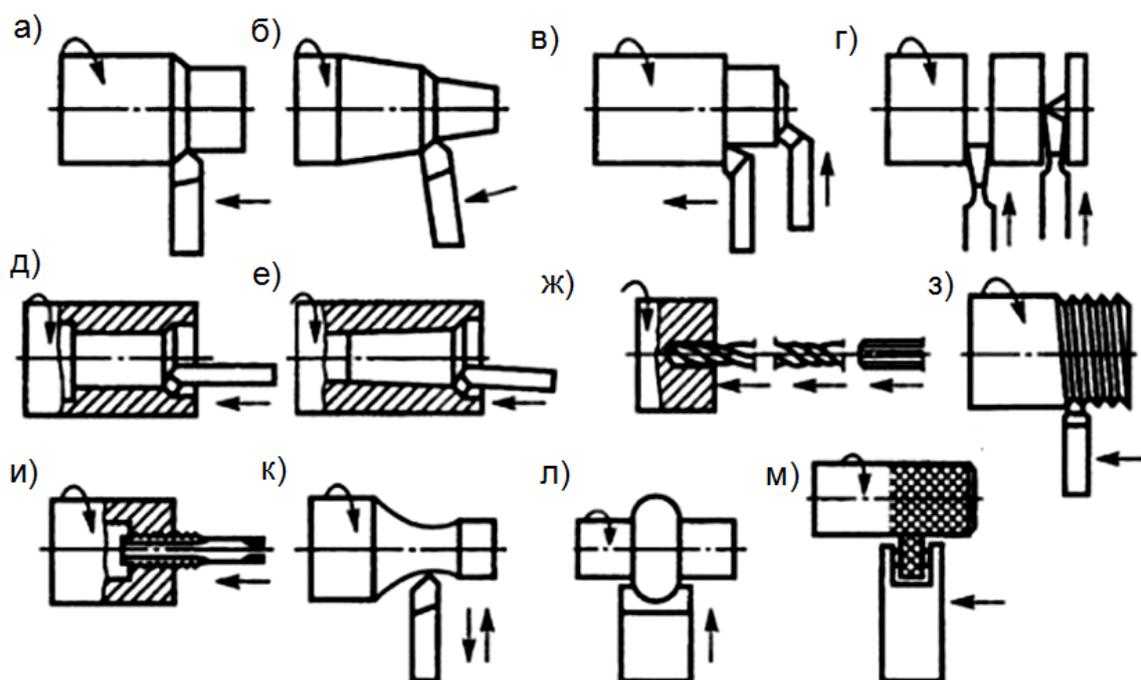


Рисунок 3.2. Операции, выполняемые на токарных станках: а) продольное точение; б) наружное точение конической поверхности; в) обработка торцов и уступов; г) точение канавок; д) растачивание цилиндрических отверстий; е) растачивание конических отверстий; ж) сверление отверстий; з) нарезание резьбы резцом; и) нарезание резьбы метчиком; к-л) фасонное обтачивание; м) накатывание рифлений

Элементы токарного резца. Токарный резец (рис. 3.3) состоит из державки 1, служащей для закрепления резца в резцедержателе, и рабочей части, образованной элементами 3–8. Передней поверхностью резца 8 называют поверхность, по которой сходит стружка. Задние (главная 3 и вспомогательная 4) поверхности обращены к обрабатываемой заготовке. Главная режущая кромка 6 выполняет основную работу резания. Она геометрически образуется пересечением передней 8 и главной задней 3 поверхностей резца. Вспомогательная режущая кромка 7 образуется пересечением передней 8 и вспомогательной задней 4 поверхностей. Место пересечения главной 6 и вспомогательной 7 режущих кромок называют вершиной резца 5.

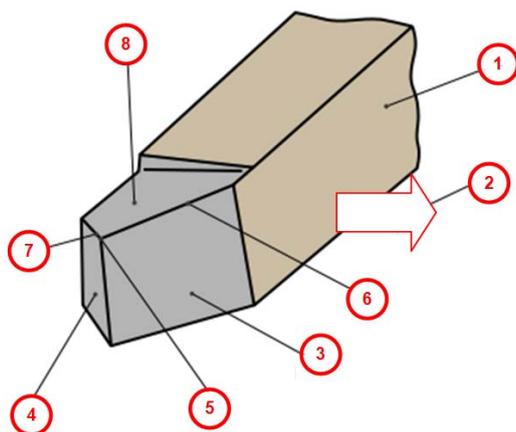


Рисунок 3.3. Элементы токарного резца: 1 – державка, 2 – направление подачи, 3 и 4 – главная и вспомогательная поверхности, 5 – вершина резца, 6 – главная режущая кромка, 7 – вспомогательная режущая кромка, 8 – передняя поверхность резца

Типы резцов представлены на рис. 3.4. Прямой проходной резец, проходной отогнутый и проходной упорный (рис. 3.4, а–в) достаточно универсальны и используются для точения наружных цилиндрических, конических, фасонных поверхностей, ими можно осуществлять подрезку торцов. Подрезной резец (рис. 3.4, г) используется для подрезки торцов. Для отрезки используется специальный отрезной резец (рис. 3.4, д). Фасонный резец (рис. 3.4, е) со специально профилированной режущей кромкой предназначен для обработки фасонных поверхностей. Нарезание резьбы осуществляется специальным резьбонарезным резцом (рис. 3.4, ж). Для растачивания внутренних отверстий используется проходной расточной резец (рис. 3.3, 4).

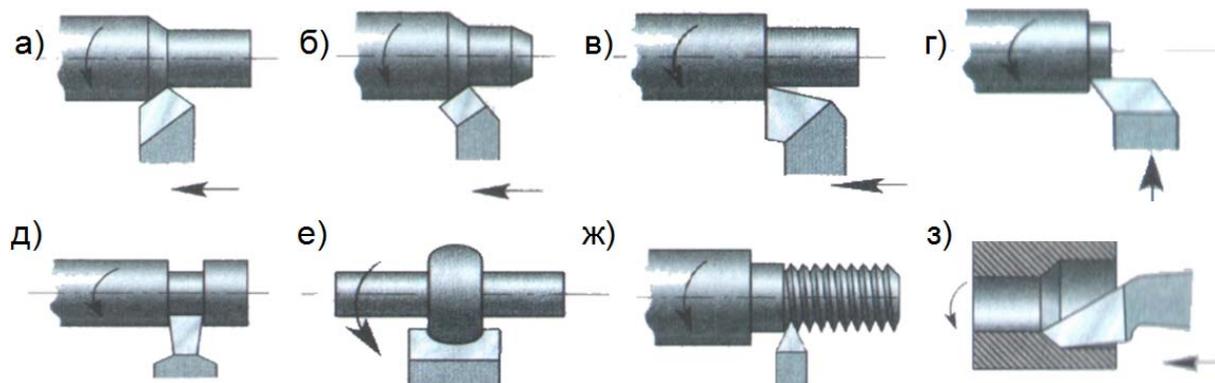


Рисунок 3.4. Типы резцов: а) проходной прямой; б) проходной отогнутый; в) проходной упорный; г) подрезной; д) отрезной; е) фасонный; ж) резьбовой; з) проходной расточной

Современный станочный рабочий инструмент – резцы, фрезы, сверла и пр. – это достаточно сложные изделия, которые производятся специализированными организациями, а на больших предприятиях имеется свое инструментальное производство. Как правило, инструмент имеет твердосплавные вставки, на которых и создаются режущие кромки. Требования к ре-

жущему инструменту во многом зависят от степени автоматизации единиц технологического оборудования, линий и комплексов. Для станков с числовым программным управлением (ЧПУ) резцы должны иметь точную и стабильную геометрию, обеспечивать быстросменность, быть приспособленными для размерной настройки и контроля на автоматических устройствах.

Токарные станки могут иметь различные уровни механизации и автоматизации. У самого простого токарного станка механизация сводится только к коробке передач: переключением может задаваться скорость вращения патрона с заготовкой. При этом в зажимном устройстве суппорта устанавливается и закрепляется один резец. В токарно-револьверных станках в гнездах барабана суппорта закрепляется по одному резцу, а их смена производится или вручную или по командам с помощью специального привода. В станках-автоматах автоматизированы почти все основные технологические и вспомогательные операции, за исключением транспортирования заготовок до обработки и готовых деталей после обработки. Следующие этапы автоматизации начинаются с автоматических линий и кончаются гибкими автоматизированными производственными комплексами.

Режимы резания. При назначении режимов резания в зависимости от требований определяют, а потом на станке задают скорость резания, подачу и глубину резания [34–37]. Скоростью резания V называют расстояние, пройденное точкой режущей кромки инструмента относительно заготовки в единицу времени. Если главное движение – вращательное (точение), то скорость резания вычисляется по формуле

$$V = \pi D_{\text{заг}} n / 1000, \text{ мм/мин}, \quad (3.1)$$

где $D_{\text{заг}}$ – наибольший диаметр обрабатываемой поверхности заготовки, мм; n – частота вращения заготовки в минуту.

Подача s количественно определяется как путь точки режущей кромки инструмента относительно заготовки в направлении движения подачи за один оборот и измеряется в мм/об. Глубиной резания t называют расстояние между обрабатываемой и обработанной поверхностями заготовки, измеренное перпендикулярно к последней. Глубина резания измеряется в миллиметрах. При точении цилиндрической поверхности глубину резания определяют как полуразность диаметров до и после обработки.

3.2. СВЕРЛЕНИЕ ОТВЕРСТИЙ

Сверление – процесс получения отверстия в сплошном материале, выполняемый на сверлильных, расточных станках или обрабатывающих центрах (рис. 3.5, а). Основные виды работ, выполняемые на сверлильных станках, представлены на рис. 3.5.

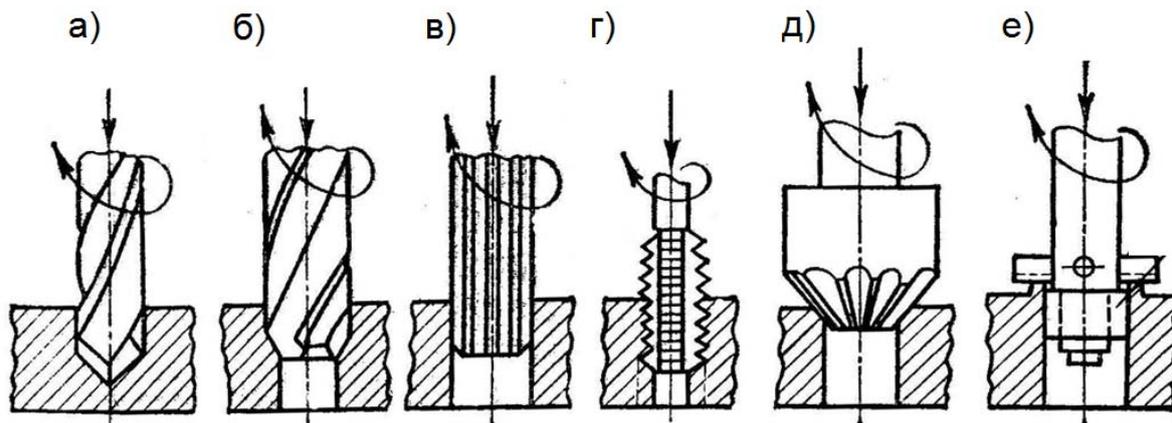


Рисунок 3.5. Основные виды работ на сверлильных станках: а) сверление; б) зенкерование; в) развертывание; г) нарезание резьбы; д) зенкование; е) цекование

Рассверливание – это вторичная обработка ранее просверленного отверстия сверлом большего диаметра. При нормальном сверлении достигается точность отверстия по 12–10-му квалитетам.

Зенкерование – это процесс обработки отверстия, предварительно вырубленного, литого или просверленного, с целью улучшения геометрической формы и коррекции диаметра (рис. 3.5, б). Зенкеры применяются для обработки отверстий диаметром до 100 мм. Припуск на зенкерование (после сверления) обычно составляет 0,5–3 мм на сторону.

Развертывание – вид чистовой механической обработки отверстий резанием (рис. 3.5, в). Производится после предварительного сверления и зенкерования для получения отверстия с меньшей шероховатостью. Вращающийся инструмент – развертка – снимает лезвиями тонкие стружки с внутренней поверхности отверстия. Развертывание применяется для получения точных калиброванных отверстий с малой шероховатости поверхности отверстий.

Нарезание резьбы производят после сверления отверстия под размер нарезаемой резьбы метчиками различных конструкций.

Зенкование применяют после сверления отверстия для снятия фаски, например, под потайную головку винта. Режущий инструмент – зенковка (рис. 3.5, д).

Цекование (разновидность зенкерования) – это процесс обработки поверхности детали вокруг отверстия, предназначенный для образования подрезки торца бобышки или для получения ступенчатого отверстия. Режущий инструмент – цековка (рис. 3.5, е).

Определение режимов резания. Сверление осуществляют при одновременном задании вращательного движения инструмента вокруг оси (главного движения) и поступательного его движения вдоль оси – движения подачи. Оба движения на сверлильном станке сообщаются инструменту. Скорость резания (в м/мин) при сверлении – это окружная скорость точки режущей кромки, наиболее удаленной от оси сверла:

$$V = \pi Dn / 1000, \quad (3.2)$$

где D – наружный диаметр сверла, мм; n – частота вращения сверла, об/мин. Подача s в (мм/об) равна осевому перемещению сверла за один оборот. За глубину резания t (мм) при сверлении отверстий в сплошном материале принимают половину диаметра сверла.

3.3. ФРЕЗЕРОВАНИЕ

Фрезерование – процесс обработки резанием [34–37], при котором режущий инструмент – фреза – совершает главное вращательное движение, а обрабатываемая заготовка – поступательное движение подачи. Фрезерованием обрабатывают горизонтальные, вертикальные, наклонные плоскости, фасонные поверхности, уступы, пазы различного профиля.

Фреза представляет собой тело вращения, на поверхности которого размещены или вставлены режущие зубья.

В зависимости от направления вращения фрезы и направления подачи (при работе цилиндрическими и торцовыми фрезами) различают: попутное фрезерование (рис. 3.6, а), когда направления подачи и вращения фрезы совпадают; встречное фрезерование (рис. 3.6, б), когда направление подачи противоположно направлению подачи.

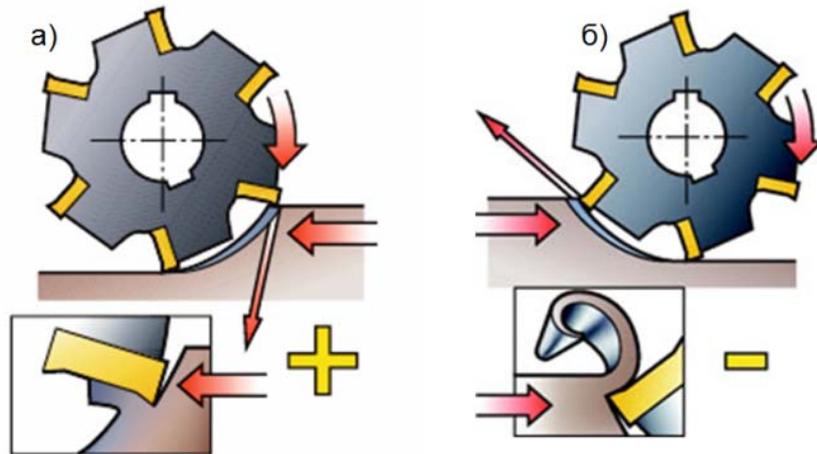


Рисунок 3.6. Схемы фрезерования: а) попутное фрезерование; б) встречное фрезерование

При попутном фрезеровании зуб фрезы сразу начинает срезать слой максимальной толщины и подвергается максимальной нагрузке. Это исключает начальное проскальзывание зуба, уменьшает износ фрезы и шероховатость обработанной поверхности. При фрезеровании против подачи нагрузка на зуб фрезы возрастает от нуля до максимума, и сила, действующая на заготовку, стремится оторвать ее от стола, что приводит к вибрациям и увеличению шероховатости обработанной поверхности.

Типы фрез. На рис. 3.7. представлены схемы фрезерования различными типами фрез.

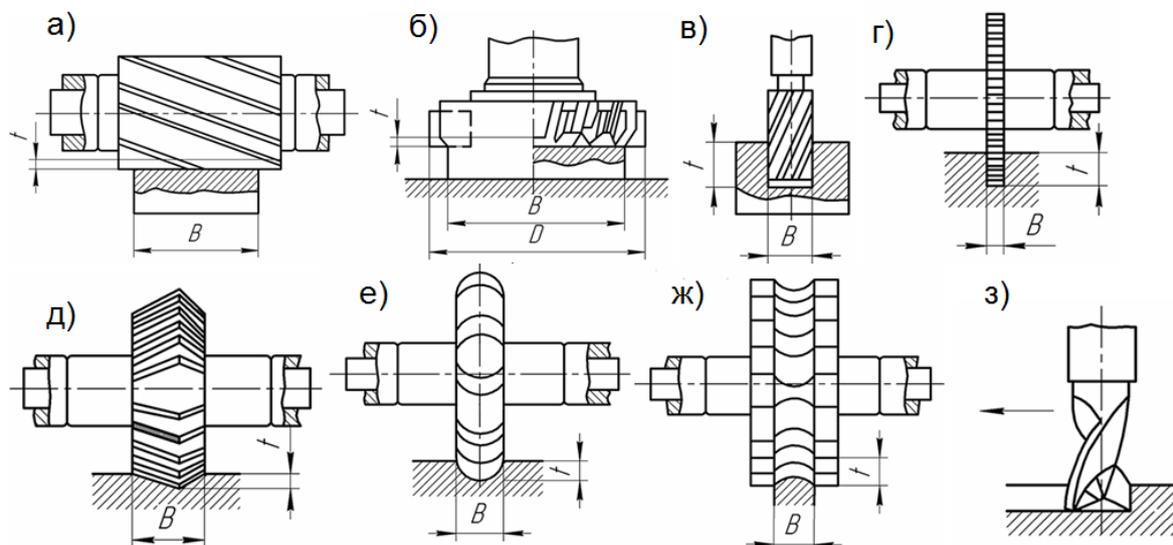


Рисунок 3.7. Схемы фрезерования: а) цилиндрической фрезой; б) торцевой фрезой; в) концевой фрезой; г) дисковой фрезой; д) двухугловой фрезой; е) фасонной выпуклой фрезой; ж) фасонной вогнутой фрезой; з) шпоночной фрезой; t – глубина фрезерования, B – ширина фрезерования, D – диаметр фрезы

В зависимости от формы и назначения фрезы подразделяются на следующие типы:

- цилиндрические фрезы (рис. 3.7, а), у которых режущие зубья расположены только на образующей, предназначены для обработки плоских поверхностей;
- торцевые фрезы (рис. 3.7, б), имеющие зубья на цилиндрической и торцевой поверхностях, служат для обработки плоских поверхностей;
- концевые фрезы (рис. 3.7, в), имеющие зубья на цилиндрической и торцевой поверхностях, применяют для обработки плоскостей, пазов, уступов, криволинейных контуров по разметке и копиру;
- дисковые фрезы (рис. 3.7, г) бывают одно-, двух- и трехсторонние. Трехсторонняя фреза имеет режущие зубья на обоих торцах и на цилиндрической поверхности. Двухсторонняя фреза имеет режущие зубья на одном торце и на цилиндрической части. Односторонняя (прямозубая) – только на цилиндрической части. Применяются для обработки уступов, пазов, боковых плоскостей на прямоугольных и круглых заготовках;
- угловые и двуугловые фрезы (рис. 3.7, д) применяются для обработки поверхностей, расположенных под некоторым углом;
- фасонные фрезы (рис. 3.7 е, ж) применяют для обработки сложных фасонных поверхностей. Профиль фрезы соответствует профилю изделия;
- шпоночные фрезы (рис. 3.7, з) применяются для фрезерования шпоночных пазов;

- комбинированные фрезы представляют собой комбинацию перечисленных выше типов фрез и используются для формирования профилей со сложной геометрией.

Режимы резания. Режимы резания при фрезеровании определяются скоростью резания V , подачей s , глубиной резания t и шириной фрезерования B [34-37]. Подача определяется перемещением обрабатываемой заготовки относительно фрезы. Различают три способа количественного задания подач:

- подача на один зуб фрезы s_z , мм/зуб (перемещение заготовки относительно фрезы за время ее углового поворота на один зуб);
- подача на один оборот фрезы s_o , мм/об (перемещение заготовки относительно фрезы за один ее оборот);
- подача в минуту s_m , мм/мин (перемещение заготовки относительно фрезы в минуту).

Эти подачи связаны между собой зависимостями:

$$s_M = s_o \cdot n = s_z \cdot z_n, \quad (3.3)$$

где z – число зубьев фрезы, n – частота вращения фрезы.

Скорость резания V – окружная скорость наиболее удаленной от оси вращения точки режущей кромки фрезы:

$$V = \pi D_{\text{фр}} n / 1000, \quad (3.3)$$

где $D_{\text{фр}}$ – диаметр фрезы, мм; n – частота вращения фрезы, об/мин.

Глубина резания t определяется как толщина слоя материала, снимаемого фрезой за один проход, измеряемая перпендикулярно к обрабатываемой поверхности. Ширина фрезерования B , мм, определяется как длина поверхности контакта фрезы с обрабатываемой заготовкой, измеренная в направлении, перпендикулярном направлению подачи.

Существуют общепринятые технические комплексные критерии процессов и ограничения на скорость резания, подачу и глубину резания. С одной стороны, повышение этих параметров как по отдельности, так и совместно сокращает время обработки и повышается производительность оборудования. С другой стороны, нужно учитывать, что резание сопровождается тепловыделением, которое растет при росте каждого из трех указанных параметров. При большом тепловыделении может происходить непредусмотренная локальная термообработка (локальная температура для стальных заготовок может быть грубо оценена по цветам побежалости стружки). Кроме того, растут нагрузки на режущий инструмент, увеличивается его износ и вероятность поломки, повышается шероховатость обработанной поверхности. Исходя из компромисса между противоречивыми требованиями, вырабатываются рекомендации по выбору параметров технологического процесса или формулируются рекомендации по выбору диапазонов их допустимых изменений.

3.4. АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА

Операции абразивной обработки, в первую очередь шлифование, чаще всего используются для окончательной (отделочной) обработки точных ответственных поверхностей. К отделочным операциям также относят притирку, суперфиниш, полировку и накатку.

При использовании абразивного инструмента может быть получена достаточно высокая точность обработанных поверхностей, несмотря на то, что рабочая поверхность дисков такую точность не имеет и не сохраняет.

Шлифование – один из наиболее распространенных методов обработки металлов резанием. При шлифовании припуски на обработку срезают быстро вращающимися шлифовальными кругами. Резание осуществляется кромками зерен или кристаллов твердого абразивного материала (корунда, алмаза и пр.). Широкое применение различных методов шлифования обусловлено гладкостью и высокой точностью получаемых поверхностей, а также возможностью обработки поверхностей с твердостью $HRC > 40$. Точность выдерживается в 5–6 квалитете, достигается шероховатость 10 класса. Шлифование обеспечивает получение высокой чистоты обработанной поверхности и высокой точности размеров, положения и форм обрабатываемых деталей. Абразивный инструмент представляет собой твердое тело, имеющее в своем составе зерна абразивного (шлифовального) материала, спеченные при участии связующих материалов между собой в единый массив. Абразивные инструменты в подавляющем большинстве используются в виде приводимых во вращательное движение тел вращения различной формы сечений, в частности, в виде шлифовальных кругов. По назначению они обычно делятся на зачистные, обдирочные и шлифовальные. Кроме того, абразивные материалы и инструмент могут использоваться при ручной или механизированной доводке в виде брусков, шкурок, паст и порошков.

Основные схемы шлифования представлены на рис. 3.8. Чаще всего используется шлифование наружных цилиндрических поверхностей (рис. 3.8, а и б). Если протяженность обрабатываемой цилиндрической поверхности больше толщины шлифовального круга, то обрабатываемое цилиндрическое тело, наряду с вращением, совершает возвратно-поступательное перемещение подачи, как это показано на рис. 3.8, а.

Бесцентровое шлифование наружных цилиндрических поверхностей (рис. 3.8, в) – более производительный процесс, так как шлифование осуществляется одновременно двумя шлифовальными кругами.

Схема внутреннего шлифования представлена на рис. 3.8, г. Внутришлифовальные станки менее производительны, чем круглошлифовальные станки, и обладают ограниченными технологическими возможностями. Это связано с тем, что шлифовальный круг диаметром $D_{\text{круга}} = 0,8D_{\text{детали}}$ быстро изнашивается и требует частой правки и замены.

Схемы плоского шлифования представлены на рис. 3.8, д-е, их применение позволяет осуществлять финишную обработку плоских поверхностей, торцов и уступов. Обработка может вестись как цилиндрической, так и торцевой частью шлифовального круга.

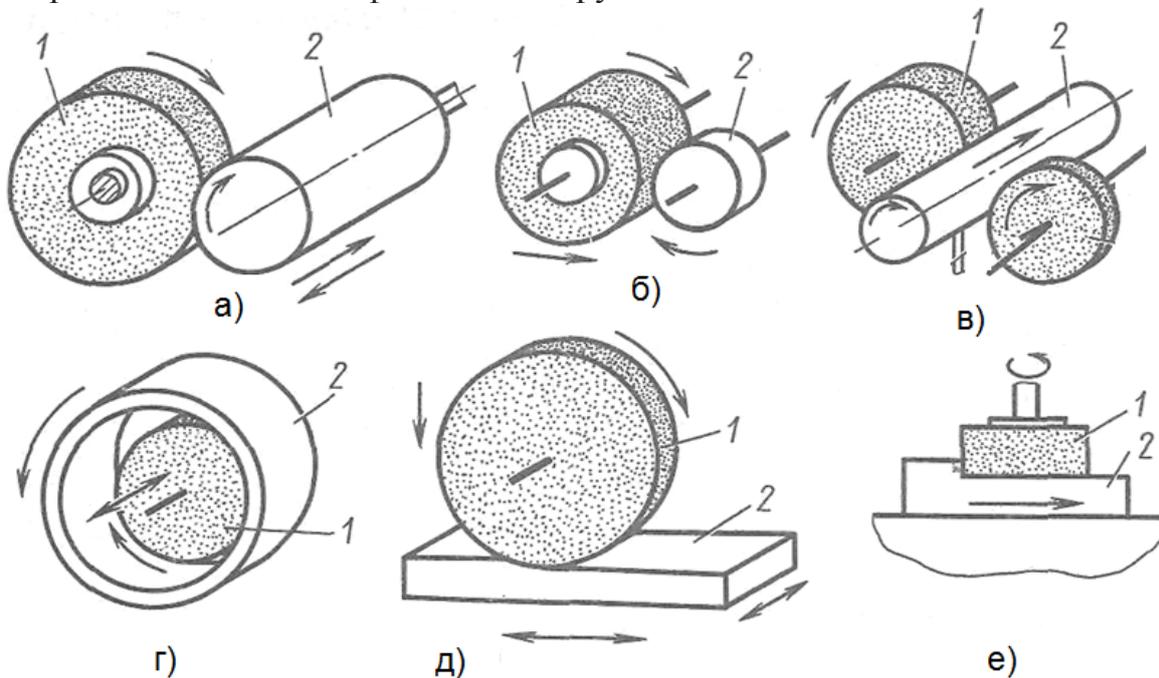


Рисунок 3.8. Основные схемы шлифования: а,б) обработка наружных цилиндрических поверхностей; в) бесцентровое шлифование; г) внутреннее шлифование; д, е) плоское шлифование; 1 – шлифовальный круг, 2 – заготовка

Притирка – процесс доводки деталей, работающих в паре, для обеспечения наилучшего контакта рабочих поверхностей. Притирку осуществляют абразивным микропорошком, смешанным с маслом, или специальными пастами, которые предварительно наносят на притир. Притиры обычно изготавливают из чугуна, бронзы или меди. Притирка не требует применения сложных, дорогих станков, ее можно выполнять вручную. Притиркой достигают 6-5-го качества.

Суперфиниширование. Процесс применяют для сверхтонкой обработки наружных поверхностей заготовок колеблющимися брусками из абразивных микропорошков. Бруски совершают по поверхности детали 4–20 циклов продольных возвратно-поступательных движений в секунду с амплитудой 3–5 мм, деталь вращается с линейной скоростью в пределах $v = 0,25–0,5$ м/с. Припуск на суперфиниширование не оставляется, так как снимаемый слой металла тонок. Суперфиниширование используют для улучшения внешнего вида и качества поверхности ($Rz = 0,04$ мкм). При этом точность размеров и правильность геометрической формы не обеспечиваются.

Полирование. Применяют для получения зеркального блеска поверхности. Полирование производят на полировальных станках быстро вра-

щающимися мягкими кругами из фетра или сукна. В процессе работы круг периодически смазывается специальной полировальной пастой. Кроме мягких кругов применяют абразивную ленту. Полированием не исправляют остаточные погрешности геометрической формы, а также дефекты, полученные или оставшиеся от предыдущих операций (вмятины, раковины и др.). Линейные скорости на полировальном круге или на абразивной ленте до 40 м/с. Параметр $Rz = 0,04$ мкм.

Хонингование. Применяют для обработки поверхности заготовок специальным инструментом – хонем, снабженным мелкозернистыми брусками. Цель хонингования – получение высокой точности геометрической формы отверстия и высокого качества поверхности. Оно не исправляет положения оси отверстия. Хонингованием обрабатывают отверстия диаметром от 15 мм, при этом получают 6-5-й квалитет и $Ra = 0,08–0,04$ мкм.

Хонингование выполняют на специальных хонинговальных станках. Абразивные бруски устанавливают в хонинговальной головке. В устройстве крепления брусков число позиций предусматривается кратным трем (6, 9, 12 и т.д.); для малых отверстий применяют головки с одним бруском. Конструкция головки обеспечивает установку брусков на требуемый диаметр и разжимание брусков. В процессе работы хонинговальной головке сообщают вращательное движение вокруг оси обрабатываемого отверстия и возвратно-поступательное – вдоль этой оси. Хонинговальные головки с принудительно разжимными брусками позволяют исправить малые конусность и овальность отверстия. Хонингование применяют в серийном и массовом производстве при обработке высокоточных отверстий, имеющих длину больше диаметра.

3.5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ТИПОВЫХ ДЕТАЛЕЙ

Разработка технологических процессов не только требует определения последовательности операций, назначения инструмента и оборудования, расчета режимов резания, но также предусматривает разработку схем и устройств крепления заготовки на каждом этапе обработки, что вызывает необходимость изучения основ базирования – процесса ориентации изделия в пространстве относительно выбранной системы координат. Рассмотрим основные понятия процесса базирования.

Базирование при механической обработке – это придание заготовке с помощью комплекта баз требуемого положения для ее обработки. В теории базирования различают несколько видов баз.

Технологическая база – это поверхность, сочетание поверхностей, ось или точка, принадлежащая заготовке и используемая для определения ее положения в процессе изготовления. В значительной степени маршрут операций технологического процесса предопределяется выбором и назначением комплектов технологических баз.

Комплект баз для деталей, не являющихся телами вращения, определяется, как правило, тремя базами: установочной, направляющей, опорной. Установочная база лишает заготовку трех степеней свободы – перемещения вдоль одной координатной оси и поворота вокруг двух других осей. Направляющая база лишает заготовку двух степеней свободы – перемещения вдоль одной координатной оси и поворота вокруг другой оси. Опорная база лишает заготовку одной степени свободы – перемещения вдоль одной координатной оси или поворота вокруг оси.

В некоторых случаях для базирования таких деталей, как тела вращения, используются двойная направляющая база, лишаящая деталь четырех степеней свободы, и двойная опорная база, лишаящая деталь двух степеней свободы в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Базирование (закрепление заготовки) в ряде случаев технически осуществляется с помощью опор, зажимов и установочных элементов.

При выборе и назначении технологических баз необходимо соблюдать ряд правил. Поверхность, принимаемая за технологическую базу, должна по возможности являться одновременно и конструкторской базой, т.е. технологическая база должна совпадать с конструкторской (правило совмещения баз). Конструкторской называется база, используемая для определения положения детали в изделия в рабочей документации, в чертежах. При несовпадении технологической базы с конструкторской появляется погрешность базирования, величину которой необходимо определять расчетом.

Для определения точности взаимного расположения поверхностей детали, подлежащих обработке в разных операциях технологического процесса, желательно сохранять в них постоянство установочной технологической базы. Это правило называется правилом постоянства баз. В качестве установочной технологической базы целесообразно применять по возможности наиболее протяженные и наиболее точно и чисто обработанные поверхности.

Необработанные поверхности допустимо применять в качестве технологических установочных (черновых) баз только для первых операций технологического процесса обработки. При выборе черновых баз для первой операции желательно использование таких поверхностей заготовки, которые являются окончательными и будут оставаться необработанными после окончательной обработки детали.

Выбор технологических баз определяется как типовыми формами обрабатываемых поверхностей, так и используемым технологическим оборудованием, а также имеющимися средствами фиксации обрабатываемой заготовки на рабочей позиции. Так, при точении на токарных станках обычно базирование и закрепление частично обработанной заготовки осуществляется захватыванием в трехкулачковом патроне цилиндрической поверхности (при большой свободной длине необходимо дополнительное

базирование центра). При предварительном анализе необходимо проверять условия надежного сохранения базирования при действии технологических усилий, а при недостаточной жесткости – оценивать, находятся ли упругие перемещения сечений обрабатываемых деталей в допустимых пределах.

При фрезерной и ряде других видов обработки базирование обычно осуществляется по плоским поверхностям на двухкоординатном подвижном столе с Т-образными пазами с помощью крепежных приспособлений. При возможных больших погрешностях положений и форм поверхностей технологических баз предусматриваются средства тонкого регулирования при наладке с применением контрольных датчиков положения.

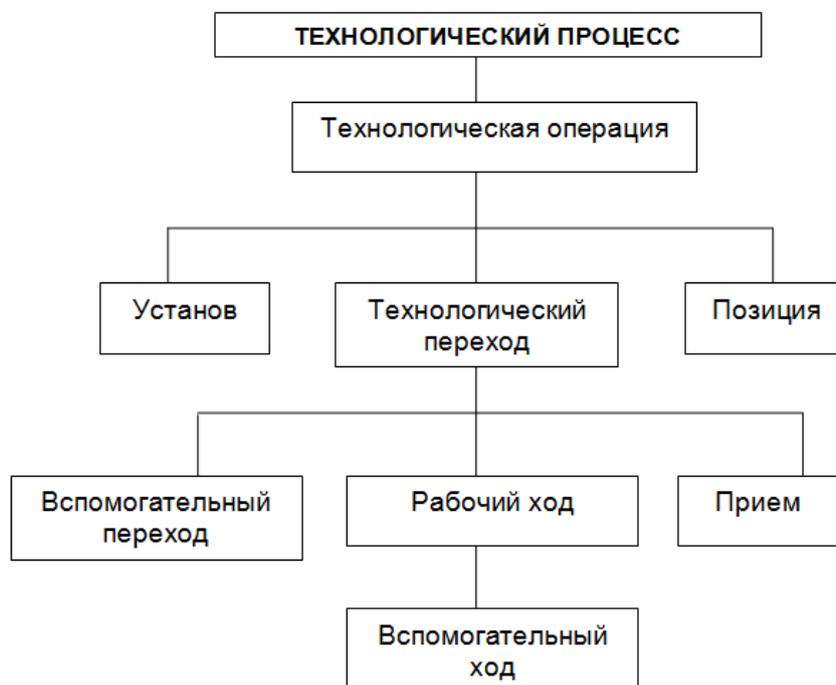


Рисунок 3.9. Структура технологического процесса

Структура технологического процесса. Технологический процесс (ТП) – совокупность действий, направленных на изменение геометрии, формы и физико-химических свойств материала заготовки.

Общая структура технологического процесса представлена на рис. 3.9.

Основной структурной единицей технологического процесса является операция – законченная часть ТП, выполняемая на одном рабочем месте непрерывно над одной деталью или узлом.

Технологический переход – законченная часть технологической операции, характеризующаяся постоянством применяемого инструмента, режимов работы оборудования, обрабатываемых поверхностей детали или узла.

Вспомогательный переход – часть технологической операции, состоящая из действий оператора и оборудования, которые не вызывают изменения формы, размеров и качества поверхности заготовки, однако необходи-

мы для выполнения технологического перехода (установка заготовки, смена инструмента и т.д.).

Установ – часть операции, выполняемая при одном закреплении обрабатываемой детали на станке.

Позиция – каждое отдельное положение детали, занимаемое ею относительно оборудования при неизменном ее закреплении в приспособлении.

Под рабочим ходом понимают законченную часть технологического перехода, состоящую из однократного перемещения инструмента относительно заготовки, сопровождаемого изменением формы, размеров, качества поверхности или свойств заготовки. Примером рабочего хода на токарном станке является снятие резцом одного слоя стружки непрерывно, на сверлильном – сверление отверстия на заданную глубину.

Вспомогательный ход – перемещение инструмента без снятия стружки, которое выполняется для позиционирования инструмента.

Рабочий прием – определенное законченное действие рабочего из числа необходимых для выполнения данной операции – например, выполнение рабочим установки заготовки, пуска станка и т. п.

Перейдем к рассмотрению технологических процессов изготовления типовых деталей типа тел вращения (валов, втулок, фланцев), которые находят широкое применение в приборостроении.

Технология изготовления валов. Вал – деталь, передающая крутящий момент и поддерживающая вращающиеся детали. Различают валы прямые (гладкие и ступенчатые), они могут быть с резьбой, шпоночными пазами или шлицами. На рис. 3.10 представлены примеры конструктивного исполнения валов. Основные цилиндрические поверхности и резьба создаются токарной обработкой, продольные пазы – фрезерной.

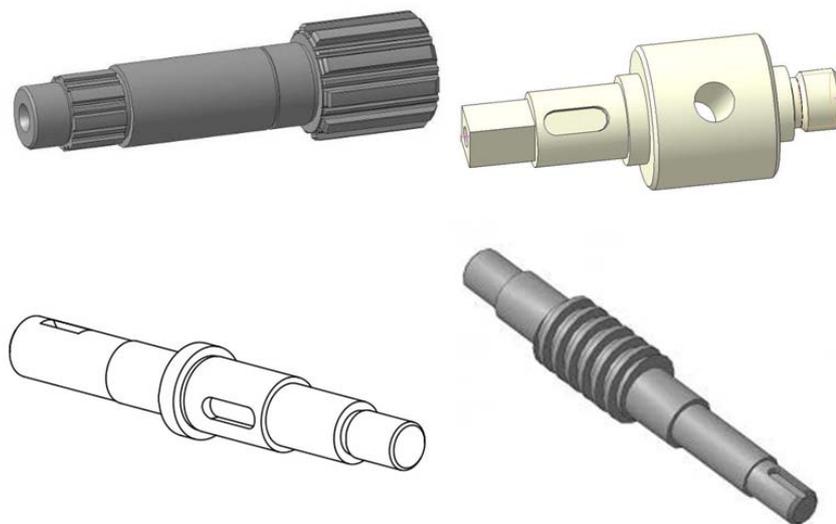


Рисунок 3.10. Примеры конструктивных исполнений валов

Выбор оборудования и технологии изготовления валов зависит от габаритных размеров детали, требуемой точности, масштабов и типа производства. Гироприборостроение следует отнести к серийному производству. Поэтому чаще всего валы изготавливаются из прутка на токарно-револьверных станках и прутковых автоматах. Предельные размеры деталей по диаметру при обработке из прутка на револьверных станках не должны превышать 100 мм, на автоматах – 50 мм; наибольшая длина деталей должна быть не более 200 мм и 70 мм соответственно.

При обработке вала по 12-му качеству применяют одну обточку, по 11-му качеству на длинных участках – черновую и чистовую обточку, на коротких – одну обточку. При обработке по 8-му качеству и выше применяют черновую и чистовую обточку чистовым резцом с припуском на чистовую обточку 0,5 мм на диаметр. Все наружные цилиндрические поверхности с точностью выше 8 качества с шероховатостью $Ra=1,6-0,4$ мкм после чистового точения шлифуют. Операция производится на кругло- и бесцентрово-шлифовальных станках. Заготовки устанавливаются в центрах, патроне, цанге или специальном приспособлении. Тонкое (алмазное точение) применяется для отделочной обработки деталей из цветных металлов и сплавов, при этом достигают 7–6-го качества точности с шероховатостью $Ra=1,25-0,08$ мкм.

Типовой маршрут изготовления вала является многоэтапным и включает ряд характерных операций [34–37].

- Заготовительная операция. Для заготовок из проката производится рубка прутка на прессе или обрезка прутка на фрезерноотрезном или другом станке.
- Токарная (черновая) операция. Производится точение наружных поверхностей (с припуском под чистовое точение и шлифование) и канавок. Это обеспечивает получение точности по 12 качеству при шероховатости $Ra = 6,3$ мкм.
- Токарная (чистовая) операция аналогична приведенной выше. Производится чистовое точение шеек (с припуском под шлифование). Обеспечивается максимальная точность по 11 качеству, шероховатость $Ra = 3,2$ мкм.
- Фрезерная операция. Производится фрезерование шпоночных канавок, спиц, зубьев, всевозможных лысок.
- Сверлильная операция. Производится сверление всевозможных отверстий.
- Резьбонарезная операция. Внутренние резьбы нарезают машинными метчиками на сверлильных, револьверных и резьбонарезных станках в зависимости от типа производства. Наружные резьбы нарезают следующим образом: в единичном и мелкосерийном производствах – на токарно-винторезных станках плашками, резьбовыми

резцами или гребенками; в мелкосерийном и серийном производствах резьбы не выше 7-й степени точности – плашками, а резьбы 6-й степени точности – резьбонарезными головками на револьверных и болторезных станках; в крупносерийном и массовом производствах – гребенчатой фрезой на резьбофрезерных станках или накатыванием.

- Термическая операция. Осуществляется объемная или местная закалка согласно чертежу детали.
- Шлифовальная операция. Шейки вала шлифуют на круглошлифовальных или бесцентрошлифовальных станках.
- Контрольная операция. Осуществляется контроль размеров и качества поверхностей.

Технология изготовления втулок. Втулка (рис. 3.11) – деталь цилиндрической или конической формы (с осевой симметрией), имеющая осевое отверстие, в которое при сборке входит сопрягаемая деталь. Примеры конструктивных исполнений втулок представлены на рис. 3.11.

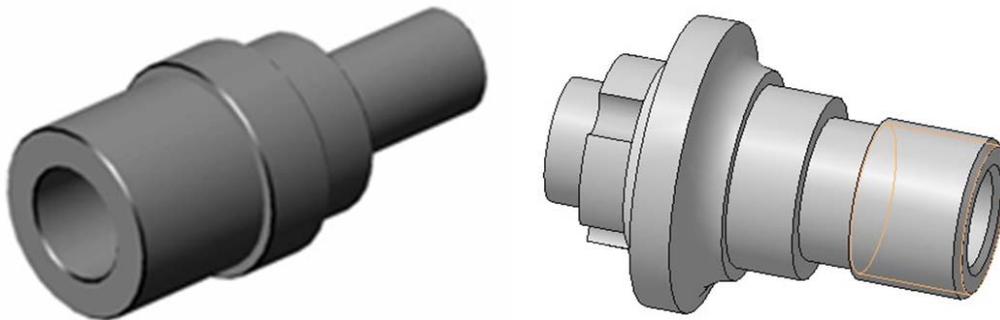


Рисунок 3.11 – Примеры конструктивных исполнений втулок.

Типовой маршрут включает следующие операции [34–37].

- Заготовительная операция – резка заготовки из проката или трубы или штамповка.
- Токарная операция. Выполняется за одну операцию и два установа.

Первый установ (базирование по наружной поверхности и торцу в патроне) – подрезка свободного торца, сверление и зенкерование или растачивание отверстия (с припуском под шлифование), растачивание канавок и фасок.

Второй установ (базирование по отверстию и торцу на оправке) – подрезка второго торца, точение наружных поверхностей (с припуском под шлифование), точение канавок и фасок.

Операция выполняется: в единичном производстве – на токарно-винторезных станках; в серийном – на токарно-револьверных станках и станках с ЧПУ; в массовом – на токарно-револьверных, одношпиндельных или многошпиндельных токарных полуавтоматах.

- Сверлильная операция – сверление, зенкерование отверстий, нарезка резьбы. Производится на вертикально-сверлильных станках, сверлильных станках с ЧПУ, агрегатных станках.
- Термическая операция – закалка согласно чертежу.
- Внутришлифовальная операция – шлифование отверстия на внутришлифовальном станке. Деталь базируется по наружному диаметру и торцу в патроне.
- Круглошлифовальная операция – шлифование наружных поверхностей торца на круглошлифовальном или торцекруглошлифовальном станках.
- Контрольная операция – контроль размеров.

Технология изготовления фланцев. Фланец (рис. 3.12) – плоская деталь квадратной, круглой или иной формы с отверстиями для болтов и шпилек, служащая для соединения валов и других вращающихся деталей (фланцевое соединение). Примеры конструктивных исполнений фланцев представлены на рис. 3.12.

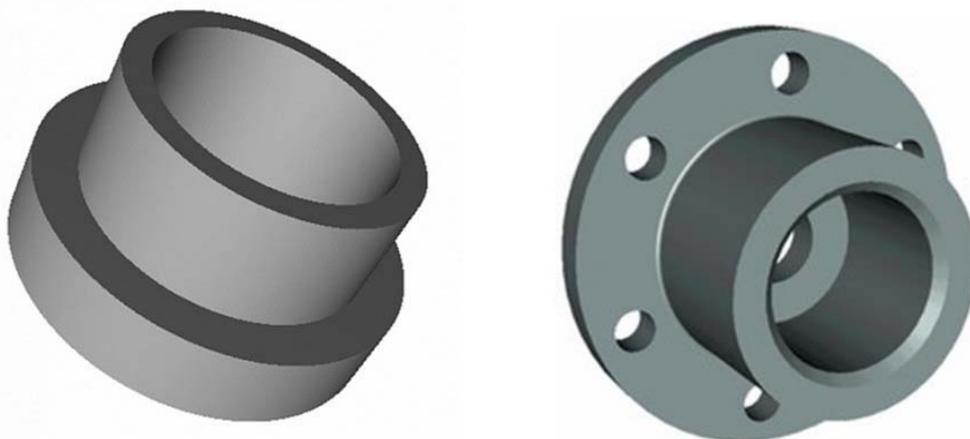


Рисунок 3.12. Примеры конструктивных исполнений фланцев

Типовой маршрут изготовления фланца включает следующие операции.

- Заготовительная операция. В зависимости от типа производства и материала заготовку можно выбрать в виде отливки, поковки, штамповки или отрезного проката.
- Токарная операция. Подрезать торец фланца, точить наружную цилиндрическую поверхность с припуском под шлифование, точить канавку и фаски. Технологическая база – наружная поверхность и торец фланца. Переустановить деталь, подрезать второй торец, обточить наружную поверхность и выполнить фаску. Станок – токарный, многошпиндельный токарный полуавтомат, токарный с ЧПУ.
- Сверлильная операция. Сверлить и зенковать отверстия. Станок – вертикально-сверлильный, сверлильный с ЧПУ.

- Фрезерная операция. Фрезеровать фланец с лысками. Станок – вертикально-фрезерный.
- Шлифовальная операция. Шлифовать наружную поверхность центрирующего пояска и торец. Технологическая база – наружная поверхность большого фланца и торец. Станок – универсально-шлифовальный или торцекруглошлифовальный.
- Контрольная операция. Осуществляется контроль размеров.

3.6. СПЕЦИФИКА ОБРАБОТКИ СФЕРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

От механической обработки типовых деталей перейдем к достаточно специфичным операциям обработки прецизионных сферических поверхностей, рассмотрев сферодоводку роторов электростатических гироскопов.

Технология сферодоводки занимает весьма важное место в производстве гироскопов. Сферодоводка является основной операцией при изготовлении сферических роторов шаровых гироскопов – электростатического, криогенного и т.д.

Для изготовления полых бериллиевых роторов ЭСГ используются заготовки в виде тонкостенных полусферических оболочек. Соединяя эти полусферы по плоскостям разъема методом диффузионной сварки, который подробно рассмотрен в гл. 5, формируют сферическую заготовку ротора. Далее этот сферический узел подвергается операции сферодоводки с целью получения требуемых диаметра, дисбаланса и сферичности узла.

Технология сферодоводки основана на использовании чашечных притиров, когда шар обрабатывается внутренним радиусом чашеобразного инструмента – притира, с абразивной суспензией (рис. 3.13).

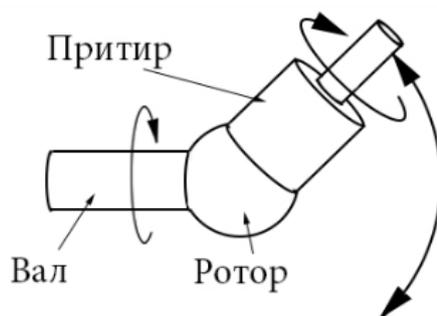


Рисунок 3.13. Сферодоводка ротора

Существует множество вариаций данного метода, с различным количеством притиров и способом их взаимного расположения. Однако все они используют один и тот же принцип, с помощью которого было получено большинство когда-либо созданных прецизионных сфер. Чашечный притир с осевым усилием обрабатывает ротор вращательным движением. Под действием вращающего момента, передающегося от чашечного притира через силы трения, ротор начинает вращаться. Добавление дополнитель-

ных чашечных притиров приводит к тому, что ротор начинает вращаться в соответствии с векторной суммой моментов сил трения, действующих на ротор. Таким образом, выбор пространственной ориентации притиров, их скоростей и направлений вращения позволяет управлять положением оси вращения ротора.

Для равномерной обработки ротора необходимо выполнить ряд условий:

- оси чашечных притиров должны пересекаться в центре обрабатываемой сферы;
- давление по площади контакта притира на сферу должно быть равномерным;
- сфера должна непрерывно вращаться, меняя положение через определенные промежутки времени, зависящие от скорости вращения чашечных притиров;
- ось вращения сферы не должна находиться на одной оси ни с одним из притиров.

Важным аспектом процесса сферодоводки является возможность корректировки дисбаланса ротора посредством повторяющихся операций направленной доводки и сферодоводки. Дисбаланс характеризует смещение геометрического центра относительно ротора от его центра масс и является важнейшей характеристикой, предопределяющей динамику узла в гироскопе. Дисбаланс ротора корректируется по схеме, представленной на рис. 3.14.

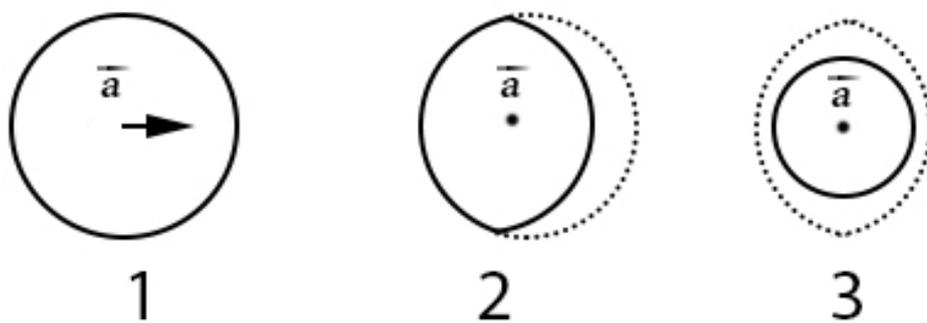


Рисунок 3.14. Схема корректировки дисбаланса: 1 – измерение суммарного вектора дисбаланса, 2 – корректировка дисбаланса путем удаления сферического сегмента, 3 – восстановление геометрии сферы

Согласно представленной схеме, на первом этапе осуществляется измерение суммарного вектора дисбаланса, на втором этапе – сьем материала для компенсации величины дисбаланса, на третьем этапе – восстановление геометрии сферического узла.

ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 3

1. Какие методы технологической обработки вам известны?
2. Что такое обработка пластическим деформированием? Чемковка отличается от штамповки?
3. Что такое прокатка, прессование и волочение?
4. Что такое литье, какие виды литья применяются в гиросприборостроении?
5. Для чего применяется термообработка материалов?
6. Что такое закалка, отпуск, отжиг, нормализация?
7. Что такое электрофизические методы обработки?
8. Приведите примеры электрохимических методов обработки.
9. Расскажите об известных вам видах механической обработки.
10. Каково строение токарного резца? Какие типы резцов вам известны?
11. Как определяются режимы резания при токарной обработке?
12. Какие поверхности обрабатываются при токарной обработке?
13. Что такое встречное и что такое попутное фрезерование? Какие типы фрез и схемы фрезерования вам известны?
14. Как определяются режимы резания при фрезеровании?
15. Что такое зенкование, зенкерование и цекование?
16. Поясните, что такое абразивная обработка? Что такое притирка, суперфиниш и хонингование?
17. Какие схемы шлифования вам известны?
18. Что такое технологический процесс? Опишите его структуру.
19. Что такое базирование, какие типы баз вам известны?
20. Приведите основные принципы базирования.
21. Что такое вал? Приведите типовой маршрут его изготовления.
22. Что такое втулка? Приведите типовой маршрут его изготовления.
23. Что такое фланец? Приведите типовой маршрут его изготовления.
24. Что такое дисбаланс ротора, каковы причины его появления?
25. Расскажите о схемах сферодоводки и балансировки роторов шаровых гироскопов.

ГЛАВА 4

Ионно-плазменные и лучевые технологии изготовления прецизионных элементов гироскопических приборов

В условиях, когда требуемые точности составляют десятые и сотые доли микрометров, перспективы создания высокоточных изделий связаны с использованием на финишных этапах их изготовления технологий, рабочим инструментарием которых выступают высокоэнергетические потоки частиц (электроны, ионы, молекулы, фотоны и т.д.). Представителями таких технологий в современном приборостроении являются электрофизические методы обработки, обозначенные на классификационной схеме (см. гл. 2, рис. 2.1) – лазерные, электронно-лучевые, плазменные технологии и технологии ионного травления, которые целесообразно рассматривать в комплексе и объединить в единый класс под названием ионно-плазменные и лучевые технологии (ИПЛТ) [41,42]. В данном разделе рассмотрены физические принципы осаждения тонкопленочных покрытий в вакууме, специфика ионного травления, а также особенности технологий электронно-лучевой и лазерной обработки.

4.1. ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

4.1.1. *Физические методы осаждения тонкопленочных покрытий*

Одним из наиболее эффективных средств повышения эксплуатационных свойств изделия является нанесение на его поверхность тонкопленочного покрытия, обладающего специальными свойствами.

Осаждение тонких пленок в вакууме включает три этапа: генерация частиц, перенос их к подложке и рост пленки на поверхности подложки [43, 44]. Теоретические и экспериментальные исследования позволили выделить четыре схемы формирования тонкопленочных покрытий (рис. 4.1):

- схема *I* – возникновение трехмерных зародышей и изолированный (островковый) их рост с последующей коалесценцией. Образующаяся

- структура типична для тонких металлических покрытий и пленок, осажденных на поверхность диэлектриков и полупроводников;
- схема *II* – послойный рост покрытия, характерный для родственных сочетаний основного материала и покрытия;
 - схема *III* – послойное зарождение с последующим ростом по островковому механизму формирования покрытия;
 - схема *IV* – вертикальный (столбчатый) рост кристаллов.

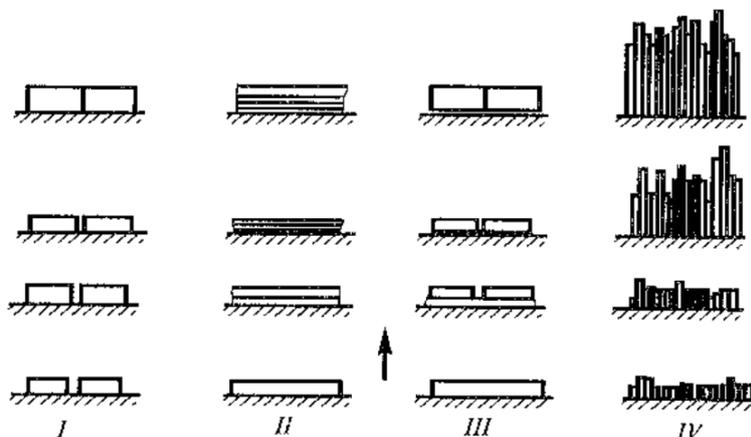


Рисунок 4.1. Возможные схемы роста тонких пленок и покрытий. *I* – островковый рост (механизм Фольмера-Вебера), *II* – послойный рост (механизм Франка-ван-дер-Мерве), *III* – послойные с последующим островковым ростом (механизм Странски-Крастоновой), *IV* – столбчатый рост

Состав и структура полученной пленки во многом зависят от исходных материалов, методов и режимов нанесения. Рассмотрим классификацию методов нанесения тонких пленок в вакууме, в основу которой положены физические принципы генерации и переноса потоков частиц (атомов, молекул, ионов).

Все вакуумно-плазменные методы [43–49], используемые для нанесения покрытий, можно условно разбить на четыре группы: осаждение термическим испарением, осаждение ионным распылением, осаждение взрывом, осаждение дуговым разрядом.

Основными технологическими параметрами процесса нанесения тонких пленок в вакууме являются:

- давление в рабочей камере остаточных газов (вакуума);
- давление рабочего газа (инертного, химически активного или смеси газов);
- температура подложки (изделия);
- скорость осаждения пленки;
- энергия осаждающихся атомов, молекул, ионов и кластеров;
- доля ионизированных частиц.

Осаждение термическим испарением. Схема осаждения тонких пленок в вакууме методом термического испарения [43] представлена на рис. 4.2.

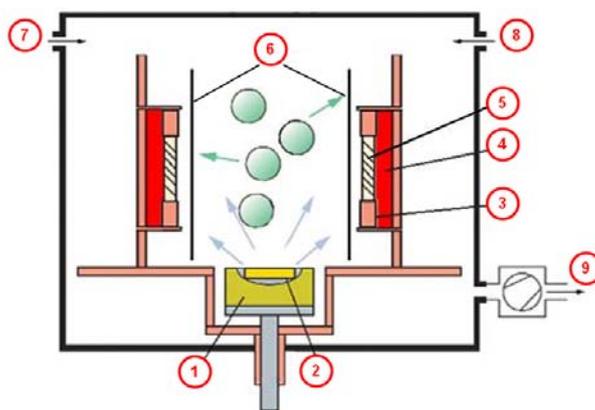


Рисунок 4.2. Схема нанесения покрытия методом термического испарения в вакууме:

- 1 – нагреватель, 2 – источник напыляемого вещества, 3 – держатель подложки,
 4 – нагреватель, 5 – подложка, 6 – заслонки, 7 – инертный газ, 8 – активный газ,
 9 – вакуумный насос

Согласно представленной на рис. 4.2 схеме, нанесение покрытия на подложку 5 осуществляется путем подведения к напыляемому веществу 2 тепловой энергии резистивным нагревом 1 (прямым или косвенным), высокочастотным нагревом (ВЧ), электронной бомбардировкой, электронно-лучевым нагревом и нагревом с помощью лазерного излучения. Подложка 5 крепится в вакуумной камере с помощью подложкодержателя 3. Для лучшей адгезии покрытия подложка нагревается нагревателем 4. При температуре вещества, равной либо превышающей температуру его испарения, частицы покидают нагреватель 1, заслонку 6 отводят в сторону, и пары вещества переносятся в вакууме на подложку и конденсируются на ее поверхности в виде тонкой пленки. Вакуум поддерживается специальным насосом 9.

Если помимо физических процессов, происходящих во время осаждения тонкой пленки, при напуске в рабочую камеру реактивного газа 8 в пространстве между источником и подложкой или на поверхности подложки протекает химическая реакция, то соответствующий метод называется реактивным. Например, при получении пленок нитрида титана происходит взаимодействие: $2\text{Ti} + \text{N}_2 = 2\text{TiN}$.

Скорость испарения вещества определяется количеством вещества, испаряемого с единицы площади в 1 сек., и выражается формулой:

$$V_{\text{исп}} = 0,0585 \cdot p_s \cdot \sqrt{\frac{M}{T}}, \quad (4.1)$$

где $V_{\text{исп}}$ – скорость испарения, г/ (см²сек); p_s – давление насыщенного пара (10^{-2} мм рт. ст.); M – молекулярный вес испаряемого вещества, г/моль; T – температура испарения вещества, К.

К достоинствам метода осаждения тонких пленок термическим испарением относятся высокая чистота осаждаемого материала (процесс проводится при высоком вакууме), универсальность (наносятся пленки металлов, сплавов, полупроводников, диэлектриков) и относительная простота

реализации, а также достаточно высокая скорость осаждения. Ограничениями метода являются нерегулируемая скорость осаждения и низкая воспроизводимость свойств пленок при осаждении веществ сложного состава.

Термическое испарение в вакууме широко используется в гироприборостроении, например, для формирования тонкопленочных хромовых электродов, наносимых, на поверхность керамических полусфер чувствительного элемента ЭСГ.

Осаждение ионным распылением [43]. Сущность метода заключается в выбивании (распылении) атомов вещества из поверхностных слоев мишени высокоэнергетическими ионами рабочего газа (обычно инертного Ar). Ионы образуются в газовом разряде при давлении рабочего газа $(5-10) \cdot 10^{-2}$ Па и ускоряются до энергии $0,7-5$ кэВ вследствие приложения к мишени отрицательного потенциала. Распыленные из мишени атомы осаждаются в виде тонкой пленки на поверхности подложки. На рис. 4.3 представлена схема магнетронного распыления.

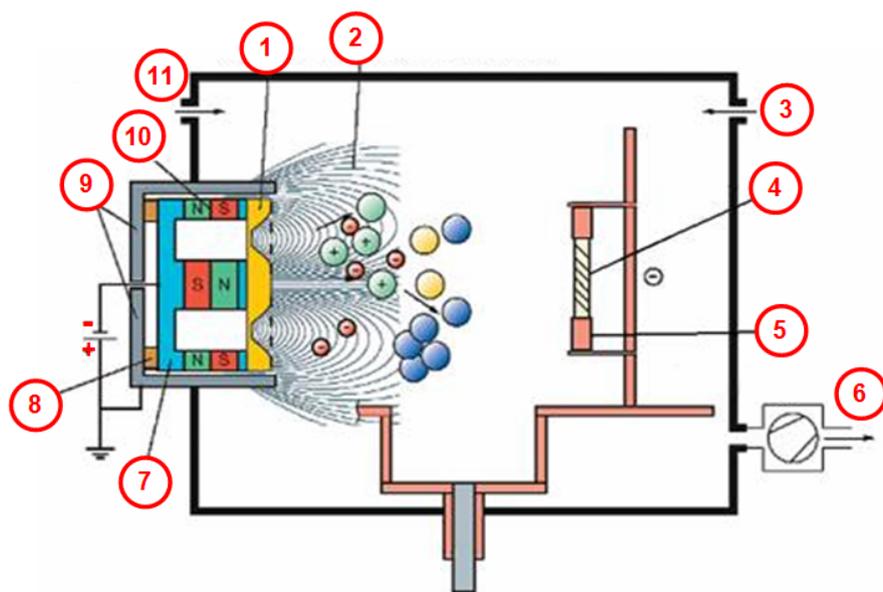


Рисунок 4.3. Схема магнетронного распыления. 1 – мишень, 2 – линии магнитного поля, 3 – активный газ, 4 – подложка, 5 – держатель, 6 – вакуумный насос, 7 – катод, 8 – изоляция, 9 – анод, 10 – магнитная система, 11 – инертный газ

Принцип магнетронного напыления основан на распылении материала, из которого изготовлена мишень 1 для магнетрона, при его бомбардировке ионами рабочего газа Ar 11, образующимися в плазме тлеющего разряда. Основные элементы магнетронной распылительной системы – это катод 7, анод 9 и магнитная система 10, предназначенная для локализации плазмы у поверхности мишени. Магнитная система 10 состоит из центрального и периферийных постоянных магнитов, расположенных на основании из магнитомягкого материала. На катод 7 подается постоянное напряжение от источника питания. Подложка 4 также крепится на специальном приспособлении – подложкодержателе 5. Высокий вакуум обеспечивается ваку-

умным насосом 6. Основные преимущества магнетронного способа распыления при использовании мишени для магнетрона – высокая скорость распыления и точность воспроизведения состава распыляемого материала. При использовании в качестве рабочего газа смеси из Ag 11 и химически активного газа 3 (O₂, N₂ и т.п.) реализуется реактивный метод осаждения оксидов, нитридов и т.п.

Достоинствами метода осаждения тонких пленок ионным распылением являются универсальность (можно наносить металлы, сплавы, диэлектрики, магнитные композиции) и регулируемая скорость осаждения. К недостаткам относятся невысокая чистота осаждаемой пленки (из-за наличия рабочего газа).

Магнетронное ионное распыление используется для напыления износостойких покрытий, например нитрида титана, на аэродинамические опоры и фланцы, входящие в состав двухступенного поплавкового гироскопа.

Скорость роста толщины покрытия в произвольной точке *A* на поверхности детали в случае магнетронного распыления определяется следующей зависимостью:

$$V_{MP} = k \frac{h_m}{l^2} \cos \varphi \cdot \cos \varepsilon, \quad (4.2)$$

где *k* – коэффициент пропорциональности, зависящий от размеров частиц напыляемого материала и стехиометрии формируемого покрытия, мкм·мм² / частицу; *h_m* – максимум диаграммы направленности распыления, частиц/с; *l* – расстояние от рассматриваемой точки *A* на поверхности детали до поверхности мишени, мм; *φ* – угол направленности, соответствующий рассматриваемой точке *A* (в литературе он называется углом распыления); *ε* – угол падения потока распыляемого материала для точки *A*.

Осаждение вещества взрывом [43] – метод осаждения вакуумных покрытий при импульсном воздействии на него лазерного излучения или электронного пучка, а также при пропускании мощного импульса тока через образец из наносимого материала в форме тонкой проволоки или фольги. Продукты взрыва с большой скоростью (энергия частиц *E* составляет 1–10 эВ) переносятся к подложке (детали) и конденсируются на ее поверхности в виде тонкой пленки.

Достоинством метода является высокая скорость осаждения и хорошая адгезия тонкопленочного покрытия, однако его применение ограничено сложностью реализации и большой неравномерностью толщины пленки.

Осаждение дуговым разрядом осуществляется в вакууме и происходит за счет эрозии вещества в сильноточных дуговых разрядах (с холодным и горячим катодом), образования ионизированной паровой фазы (20–100% ионов), переносе ее с большой скоростью (энергия частиц *E* – до 10 эВ) и конденсации на поверхности подложки [43].

Большинство методов электродугового испарения, часто называемого вакуумно-дуговым, основано на испарении наносимого материала катод-

ными пятнами вакуумной дуги, ионизации металлического пара и последующей конденсации чистого металла либо его соединения с реакционным газом на рабочих поверхностях изделия. Для реализации указанных процессов могут использоваться различные комбинации электрических и магнитных полей, способы генерации плазмы (анодный и катодный) и ее ускорения – электростатическое или холловское. Кроме того, вакуумно-дуговое испарение может осуществляться в импульсном или непрерывном режимах.

Технология осаждения дуговым разрядом с холодным катодом, так называемая катодно-ионная бомбардировка, используется для напыления износостойкого покрытия нитрида титана на роторы шаровых гироскопов, а также для нанесения алмазоподобного покрытия на упоры, составляющие пару трения с износостойким покрытием нитрида титана. Упоры являются необходимым конструктивным элементом чувствительного элемента ЭСГ, так как при запуске и посадке ротора они не допускают касания ротором поверхности тонкопленочных электродов.

Скорость распыления дуговым разрядом V можно оценить по формуле, учитывающей размер кратера катодного распыления D за время распыления t , с:

$$V = D \frac{\rho}{2t}, \quad (4.3)$$

где D – диаметр кратера катодного пятна, см; ρ – плотность распыляемого материала, г/см³.

Метод осаждения тонких пленок дуговым разрядом в вакууме имеет следующие достоинства:

- практически неограниченная электрическая мощность;
- высокий коэффициент ионизации испаряемых частиц;
- возможность получения пленок сплавов, окислов, нитритов, карбидов и т.п., причем как путем использования мишеней из этих материалов, так и реактивным методом;
- отсутствие необходимости в дополнительном газе для ионизации;
- максимально возможная скорость осаждения (ограничивается допустимым потоком энергии на поверхность конденсации).

Недостатками метода являются наличие в потоке осаждаемого вещества капельной фазы, нерегулируемая энергия частиц и относительная сложность конструкции дуговых источников.

Особенностью технологии формирования тонких пленок является возможность управлять параметрами тонкопленочных покрытий за счет изменения структуры и геометрических размеров пленки (в первую очередь толщины), а также ее состава. Получать пленки с заданным составом можно реактивным нанесением, путем использования мишеней сложного со-

става, с помощью одновременного осаждения различных материалов из нескольких источников.

В качестве наиболее наглядных примеров использования вакуумных покрытий при изготовлении деталей и узлов гироскопов можно привести нанесение защитного износостойкого покрытия TiN на ротор ЭСГ, формообразование массивного медного армирующего элемента для создания момента инерции в конструкции ротора БЭСГ, выполнение тонкопленочных электродов подвесов электростатических и криогенных гироскопов, повышение износостойкости газовых подшипников, входящих в состав прибора ДПГ.

4.1.2. Средства оснащения процесса нанесения вакуумных покрытий на сферические поверхности

В современных и перспективных гироскопических приборах большое значение имеет технологическое обеспечение процессов нанесения различного рода функциональных вакуумных покрытий, реализуемых методами напыления. С технической точки зрения достаточно сложной задачей является формирование тонкопленочного покрытия с разнотолщинностью в сотые доли микрометра на поверхности сферического узла, например, ротора электростатического гироскопа. В связи с этим научно-практический интерес представляет конструктивное оформление различных устройств, применяемых для формирования тонкопленочных покрытий вакуумными методами на сферических узлах.

Рассмотрим устройство для напыления покрытия нитрида титана методом магнетронного напыления на ротор электростатического гироскопа. На рис. 4.4 представлено устройство для магнетронного напыления покрытий [26] на сферические узлы.

Как видно из рис.4.4, напыление ротора осуществляется без его жесткой фиксации, так как диаметр кольца 2, ограничивающего перемещение ротора, составляет 1,1–1,2 от диаметра сферы D_p , в результате чего ось симметрии ротора смещена на величину Δ . Ротор 1 соприкасается с шаровой опорой 3, хаотично прокатываясь по ней в ходе напыления. Процесс перемещения ротора 1 начинается, когда шаровая опора приводится во вращение редуктором, образованным валом 5 и шестернями 6 и 7. Шестерня 7 жестко закреплена относительно камеры вакуумной установки посредством стопора 8. В устройстве предусмотрен шток 9, жестко связанный с обоймой 4 и передающий ей вращательное движение ω_1 , противоположное вращательному движению шаровой опоры 3 с ω_2 .

Основным достоинством конструкции является отсутствие жесткой фиксации ротора и, как следствие, контактных точек на поверхности ротора после напыления. Недостатком устройств является сильная зависимость качества покрытия от качества поверхности шаровой опоры 3.

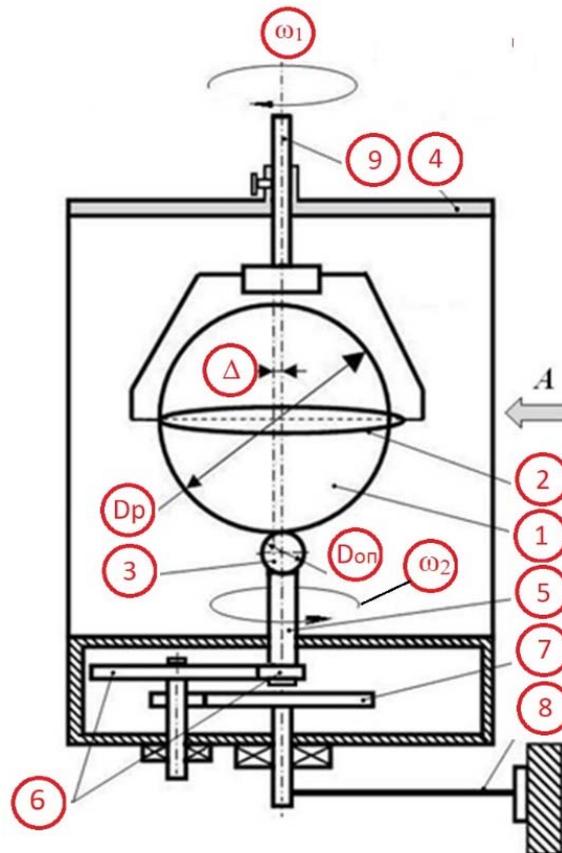


Рисунок 4.4. Устройство для напыления покрытия методом магнетронного распыления.
 1 – ротор; 2 – кольцо; 3 – шаровая опора; 4 – обойма; 5 – вал; 6,7 – шестерни;
 8 – стопор; 9 – шток

Рассмотрим устройство для напыления покрытия нитрида титана на ротор электростатического гироскопа методом катодно-ионной бомбардировки (рис.4.5) [50].

Согласно рис. 4.5, для осуществления процесса напыления ротор 1 закрепляется в четырехигольчатом зажиме, образованном верхней иглой 2 и трехконцевой игловой вилкой 3. Толщина прижимных игольчатых упоров не превышает 100 мкм. Игловые упоры 2 и 3 присоединяются к внутренней кольцевой раме 4 с использованием крепежа, создающего разъемные соединения. Разборная конструкция обеспечивает ремонтпригодность конструкции, что позволяет осуществлять смену игловых упоров в случае нарушения их целостности и естественного износа. Внутреннее кольцо 4 прикреплено к наружной скобе 6 также с помощью крепежных элементов. В ходе напыления покрытия основание представленного приспособления присоединяется к шаговому двигателю, который создает вращательное движение устройства вокруг оси, проходящей вдоль подпружиненной иглы 2. Для обеспечения равномерности распределения покрытия на сферической поверхности к вращательному движению добавляются одноментные повороты внутренней кольцевой рамы благодаря наличию шты-

ревого механизма 6. Разнотолщинность покрытия, наносимого с использованием представленного приспособления, не превышает десятых долей мкм.

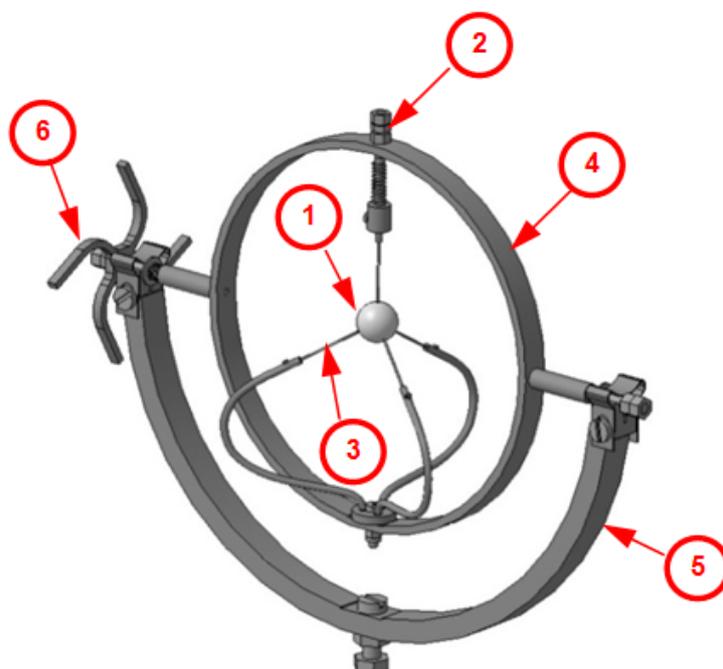


Рисунок 4.5. Устройство для напыления *TiN*-покрытия методом катодно-ионной бомбардировки. 1 – ротор; 2 – верхняя прижимная игла; 3 – нижние прижимные иглы, образующие трехкольцевую вилку; 4 – внутренняя кольцевая рама; 5 – наружная скоба; 6 – штыревой механизм для поворота.

Рассмотренные устройства позволяют составить общее представление о сложности практической реализации кинематических схем при напылении покрытий вакуумными методами на детали и узлы со сложной геометрией.

4.1.3. Технология прецизионного травления

Одним из методов модификации поверхности потоками высокоэнергетических частиц является технология травления [43]. С помощью вакуумно-плазменного травления можно обрабатывать полупроводниковые материалы, металлы, диэлектрики, оксиды, нитриды, карбиды, алмаз, камни, высокомолекулярные соединения и т.д., причем как в монолитном, так и в тонкопленочном виде. В качестве инструмента травления используются газоразрядная плазма, ионный луч и атомный (молекулярный) пучок. Глубина травления может составлять от 0,05 до нескольких миллиметров, а минимальная ширина линии травления – 0,1–0,5 мкм.

В зависимости от вида обрабатываемого материала, требований по точности размеров микроструктур и производительности оборудования применяются различные способы травления: ионное, химическое и ионно-химическое. Анализ процесса химического травления необходим,

поскольку, хотя его и механизм не связан с ионно-плазменными технологиями, отдельные элементы химического травления являются составной частью ионно-химического травления.

При **ионном травлении** скорость травления (физического распыления материала) определяется следующим соотношением:

$$V_{\text{ит}} = \frac{j_i S M}{q_e N_A \rho}, \text{ м/с}, \quad (4.4)$$

где j_i – плотность ионного тока, А/м²; S – коэффициент распыления, атом/ион; M – молекулярная масса, кг/кмоль; q_e – заряд электрона, Кл; N_A – число Авогадро, молекул/кмоль; ρ – плотность материала, кг/м³.

При **химическом травлении** скорость травления (спонтанной химической реакции) равна

$$V_{\text{хт}} = \frac{q_{\text{хач}} \varepsilon_{\text{хр}} y_{\text{хр}} M}{N_A \rho}, \text{ м/с}, \quad (4.5)$$

где $q_{\text{хач}}$ – плотность потока химически активных частиц (ХАЧ) на поверхность материала, ХАЧ/(м²·с); $\varepsilon_{\text{хр}}$ – вероятность спонтанной химической реакции; $y_{\text{хр}}$ – коэффициент выхода материала в результате химической реакции, атом/ХАЧ (для реакции $Si+4F \rightarrow SiF_4$ $y_{\text{хр}} = 0,25$ атом/ХАЧ). Величину $q_{\text{хач}}$ можно рассчитать по следующей формуле:

$$q_{\text{хач}} = \frac{p_{\text{хач}} \sqrt{N_A}}{\sqrt{2\pi M k T}}, \quad (4.6)$$

где $p_{\text{хач}}$ – парциальное давление ХАЧ, Па; k – постоянная Больцмана, Дж/К; T – температура стенок вакуумной камеры, К. Величину $\varepsilon_{\text{хр}}$ можно определить по следующему выражению:

$$\varepsilon_{\text{хр}} = C_{\text{хр}} \exp\left(\frac{-E_{\text{акт}}}{kT}\right), \quad (4.7)$$

где $C_{\text{хр}}$ – предэкспоненциальный множитель, не зависящий от температуры; $E_{\text{акт}}$ – энергия активации спонтанной химической реакции, Дж.

При **ионно-химическом травлении** скорость травления определяется как сумма скоростей при ионном и химическом травлении:

$$V_{\text{ихт}} = V_{\text{ит}} + V_{\text{хт}}. \quad (4.8)$$

Селективность травления, т.е. возможность обрабатывать различные материалы, зависит от эффекта, лежащего в основе удаления материала с обрабатываемой поверхности. Физическим распылением можно обрабатывать практически любые материалы, так как скорость травления различных материалов зависит только от коэффициента распыления. Химическое взаимодействие, наоборот, весьма избирательно к различным материалам.

Выбор способа травления заключается в определении приоритетных характеристик: минимальной селективностью травления и наименьшей по-

грешностью размеров обработки обладает ионное травление; наибольшую скорость травления и наименьший нарушенный слой обрабатываемой поверхности можно получить при химическом травлении; наилучшим сочетанием точности обработки и производительности оборудования обладает ионно-химическое травление.

Примером использования технологии ионного травления при создании гироскопических узлов может служить процесс формирования аэродинамического профиля на опорах газового подшипника, входящего в состав двухстепенного поплавкового гироскопа.

4.2. ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

4.2.1. Классификация лучевых технологий

К лучевым методам формообразования поверхностей относят электронно-лучевую и лазерную обработку.

Электронно-лучевая обработка основана на превращении кинетической энергии направленного пучка электронов в тепловую энергию в пространстве глубокого вакуума. Высокая плотность энергии сфокусированного электронного луча позволяет обрабатывать заготовки за счет нагрева, расплавления и испарения материала с узлокального участка [51]. Источником излучений служит электронная пушка.

Электронно-лучевую обработку используют для операций сварки, плавки, испарения и термической обработки, в первую очередь для легко окисляющихся материалов. Электронно-лучевая сварка позволяет получать сварные соединения с отношением глубины шва к его ширине, несколько большим единицы, чего невозможно добиться другими способами сварки плавлением. Процесс электронно-лучевой сварки, находящей широкое применение в гироскопостроении, подробно рассмотрен в параграфе 5.1.

Лазерная обработка основана на тепловом воздействии светового луча высокой энергии на поверхность обрабатываемой заготовки [52, 53]. Источником излучения служит лазер – оптический квантовый генератор.

Нагревание тела излучением описывается дифференциальным уравнением теплопроводности, которое при сильном поглощении излучения, когда глубина проникновения света в материал $\delta=1/\alpha$ (α – показатель поглощения света) много меньше толщины прогретого слоя $\sqrt{a \cdot \tau}$ (a – температуропроводность материала, τ – длительность импульса) имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (4.9)$$

где t – время, x, y, z – декартова система координат, связанная с облучаемым телом.

Граничное условие на поверхности задает действие поверхностного источника (при $z=0$):

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = q(x, y, t), \quad (4.10)$$

где $q=q_0(1-R)$, q_0 – плотность мощности падающего излучения, R – коэффициент отражения поверхности, k – теплопроводность материала, ось z перпендикулярна поверхности и направлена вглубь материала.

Если размеры нагреваемого тела достаточно велики ($l_x, l_y, l_z \gg \sqrt{a \cdot \tau}$), то его можно считать полубесконечной средой, и из решения уравнения теплопроводности можно определить связь температуры облучаемого материала с плотностью мощности лазерного излучения.

Для случая постоянной во времени и по площади облученной зоны в виде круга радиуса r_0 получим:

– при $r_0 \gg \sqrt{a \cdot \tau}$ (импульсное нагревание)

$$T = \frac{2q_0(1-R) \cdot \sqrt{\alpha\tau}}{k\sqrt{\pi}} + T_H, \quad (4.11)$$

– при $r_0 \ll \sqrt{a \cdot \tau}$ (стационарный режим нагревания)

$$T = \frac{q_0(1-R) \cdot r_0}{k} + T_H, \quad (4.12)$$

где T_H – начальная температура обрабатываемой заготовки (300 К).

Рассмотрим подробнее технологические процессы лазерной обработки материалов. На рис. 4.6 представлена схема, отражающая основные методы лазерной обработки.



Рисунок 4.6. Технологические возможности современной лазерной обработки

Улучшение эксплуатационных свойств металлических материалов при различных видах лазерной поверхностной обработки связано с изменением структурного состояния, фазового и химического составов поверхностных слоев. Используя лазерный пучок как концентрированный источник тепла, можно выполнять различные виды локальной термической обработки (закалка, отжиг, отпуск). В технологии приборостроения широкое распро-

странение получил **лазерный отжиг**. В отличие от обычного печного отжига, с помощью лазерного луча можно осуществлять контролируемый по температуре и времени нагрев поверхностных слоев различных материалов на заданную глубину. При этом температура соседних участков металла практически не изменяется. Применение лазерного отжига вследствие локальности и кратковременности нагрева позволяет подавить диффузионные процессы и существенно улучшить характеристики полупроводниковых материалов и структур.

Поверхностная лазерная обработка позволяет осуществлять легирование, аморфизацию и наплавку.

Процесс поверхностного легирования сильно зависит от условий обработки – состава газовой среды, а также физико-химических свойств обрабатываемого материала. Наибольшее распространение получила поверхностное лазерное оксидирование, когда импульсный лазерный нагрев поверхности обрабатываемого изделия в атмосфере кислорода или на воздухе приводит к селективному окислению поверхности по заданному рисунку. Эта технология используется для формирования оптического изображения на роторах электростатических гироскопов, с помощью которого специальная оптоэлектронная система контролирует угловое положение ротора.

Аморфизация поверхности сплава осуществляется в условиях скоростного облучения (очень коротким импульсом или сканирующим лучом). Сверхвысокие скорости теплоотвода, достигаемые при этом, обеспечивают своеобразное «замораживание» расплава, образование металлических стекол (метгласса) или аморфного состояния поверхностного слоя. В результате достигаются высокая твердость, коррозионная стойкость, улучшенные магнитные характеристики и другие специфические свойства материала. Процесс лазерной аморфизации можно осуществить при обработке сплавов специальных составов (в том числе и на основе железа), а также других материалов, предварительно покрытых специальными составами, которые самостоятельно склонны к аморфизации.

Лазерная наплавка – метод нанесения материала при помощи лазерного луча, использующегося для плавления и перемешивания присадочного материала с поверхностью. В качестве присадки могут использоваться как порошки, так и проволоки. Лазерная наплавка используется для поверхностного легирования или обработки покрытий. В последнем случае наблюдается залечивание дефектов (пор и трещин) и улучшается прочность сцепления покрытия с основой вследствие образования жидкой фазы.

Размерная лазерная обработка включает операции резки, сверления, фрезерования.

Одна из самых распространенных операций, осуществляемых с использованием лазера – это **лазерная резка**. Разработка мощных и надежных лазеров на алюминий-иттриевом гранате и CO_2 , работающих в непрерывном

и импульсном режимах, позволила осуществлять технологическую операцию лазерного разделения материалов, которой присущи следующие особенности: обширный диапазон разделяемых материалов; возможность получения узких разрезов и безотходного разделения; малая зона термического влияния; возможность автоматизации процесса; возможность резки по заданному профилю.

Разделение материалов может быть осуществлено либо при полном удалении материала по линии разреза, либо при частичном удалении материала, например, при образовании системы отверстий малого диаметра в разрезаемой пластине по линии разделения с последующим разломом. Последний метод разделения называется **скрайбированием**.

Частный случай лазерной резки – **подгонка** – использование лазерного луча для подгонки отдельных элементов микросхем (конденсаторов, сопротивлений) по контрольным параметрам.

Достаточно распространенной операцией является **лазерная гравировка** изображений и надписей, когда осуществляется поверхностное испарение материала по контуру надписи или рисунка.

Удаление части материала (тонкой пленки) с помощью испарения лазерным лучом по заданному рисунку или обработка поверхности светом (ультрафиолетовый диапазон) с изменением физических свойств и последующим химическим травлением (фотолитография) получили название **травления**. Частный случай травления – **лазерная очистка** – испарение поверхностного слоя, содержащего нежелательные загрязнения.

Лазерные технологии также широко используются в сборочном производстве при лазерной сварке и пайке.

Сварка. Использование установок относительно невысокой мощности дает возможность осуществлять высококачественную скоростную точечную сварку, дающую существенные экономические преимущества. С помощью лазеров можно осуществлять шовную сварку разнообразных материалов – ковара, стали, алюминия и титана – с принципиально различными теплофизическими свойствами. В зависимости от материала варьируется энергия в импульсе.

Пайка. Лазерная пайка обеспечивает такое преимущество, как легкий контроль времени нагрева материала и дозировки энергии лазерного излучения. Лазерным методом можно выполнять локальную пайку, передавая излучение через оптическое волокно. Для одновременной пайки на нескольких участках лазерный луч может быть расщеплен с помощью зеркала и может менять свое направление с помощью оптического переключателя. Автоматизация процесса пайки осуществляется за счет введения таймера для контроля времени пайки, газового лазера и робота, перемещающего оптическое волокно в прямоугольных координатах.

В цикле изготовления гироскопических приборов наибольшее распространение получили операции лазерной сварки, резки, подгонки, чистки,

гравировки, лазерного упрочнения и поверхностного оксидирования для создания оптически контрастных изображений на прецизионных гироскопических узлах.

4.2.2. Лазерное маркирование рисунка на роторе электростатического гироскопа

Приведем пример практического использования лазерной обработки для создания оптического рисунка на поверхности гироскопического узла – ротора электростатического гироскопа. Рисунок обеспечивает функционирование оптоэлектронной системы съема информации гироскопа: разность фаз сигнала, отраженного от поверхности ротора и зарегистрированного двумя ортогональными датчиками, пропорциональна углу поворота подвижного основания, на котором размещен гироскоп. Процесс формирования растрового рисунка связан с формированием восьми контрастных полос (рис.4.7) на сферическом узле диаметром 10 мм. Форма каждой растровой полосы описывается частью локсодромии – линии, пересекающей меридианы под одинаковыми углами 45° и имеющей вид пространственной спирали. Асимптотическое приближение рисунка к полюсам ротора ограничено меридиональной протяженностью каждой полосы, составляющей 57° .

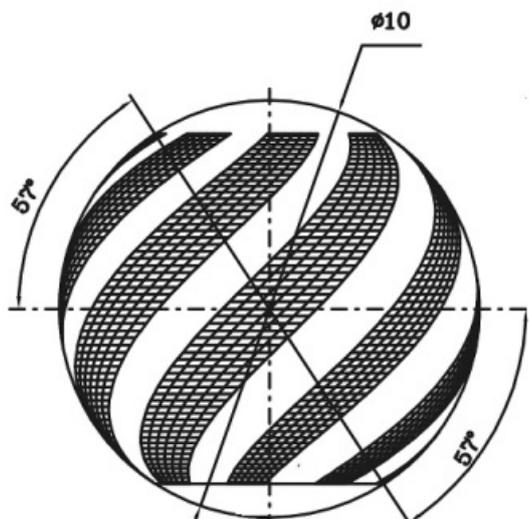


Рисунок 4.7. Рисунок на поверхности ротора ЭСГ

К технологии формирования растрового рисунка предъявляются такие требования, как четкость границ растровых полос, точность их ориентации и углового шага; особенно важное требование – однородность контраста всех полос, определяемая отсутствием его градиента.

Следует учитывать, что при маркировке сферического узла из-за кривизны поверхности происходит расфокусировка лазерного излучения при его перемещении по поверхности ротора. В результате расфокусировки возникает градиент контрастности вдоль растровой полосы при перемещении от экватора к полюсам. Для устранения этого дефекта потребовалась

разработка специального средства оснащения, конструктивное оформление которого сохраняет фокусировку лазерного луча относительно различных участков его сферической поверхности при нанесении раstra.

В качестве исходного положения при разработке устройства было принято обеспечение трех степеней свободы в системе ротор–лазерный луч: поступательное движение лазерного луча, который совершает линейные перемещения в поперечных по отношению к растровой полосе направлениях, вращение ротора, задаваемое приводом вращения, и повороты калибра, на котором закреплен ротор, при переходе на маркировку следующей полосы.

Разработанное устройство, функционирующее в комплексе с лазерной установкой «Минимаркер 2-М20», представлено на рис.4.8.

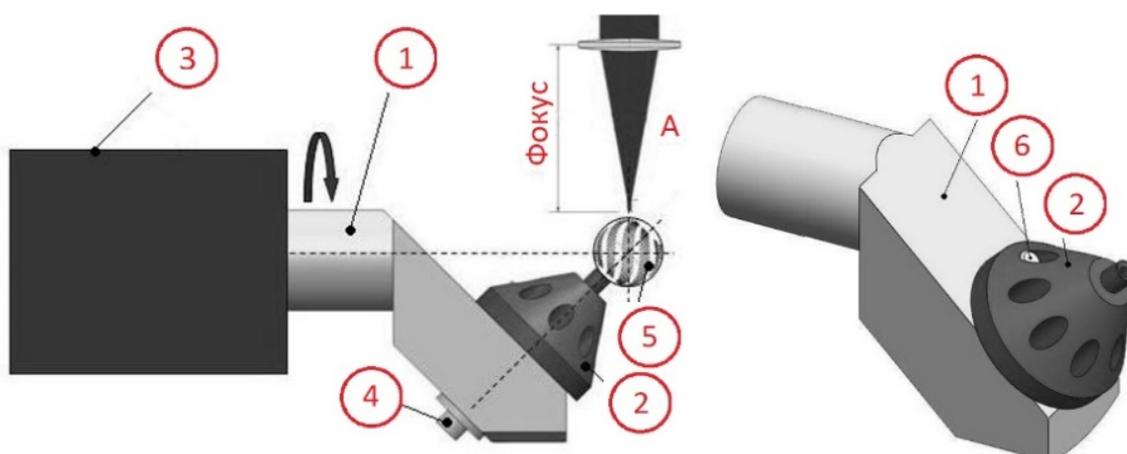


Рисунок 4.8. Устройство для маркирования растровых полос. 1 – держатель, 2 – калибр, 3 – вращатель, 4 – винт, 5 – ротор, А – лазерное излучение

Устройство, представленное на рис. 4.6, состоит из пяти основных деталей. К держателю 1 винтом 4 крепится калибр 2. В держатель 1 запрессовывается штифт 6, который служит направляющим элементом для каждого из восьми отверстий калибра 2 в соответствии с количеством полос рисунка. Очевидно, что точность выполнения отверстий обуславливает точность углового смещения полос. Держатель крепится в зажимной механизм привода вращения 3. К калибру 2 предварительно крепится ротор 5. Выполнение держателя 1 в виде консоли с наклоном поверхности, на которой базируется калибр 2, относительно оси вращения поворотного устройства на угол 45° обеспечивает требуемую угловую ориентацию полос, т.е. создает требуемый угол 45° в зоне пересечения локсодромии с меридиональными линиями.

Вращение держателя 2, задаваемое приводом вращения 3, обеспечивает ориентацию луча лазера А перпендикулярно к оси вращения привода и к поверхности ротора 5, что сохраняет постоянным фокусное расстояние в процессе обработки. После маркирования первой полосы осуществляют

поворот калибра с ротором на 45°, фиксируют следующую позицию креплением штифта в отверстии калибра, производят маркирование второй полосы, и т.д. Привод вращения 3, интегрированный с ПК, обеспечивает поворот устройства при маркировании каждой полосы. Луч формирует штрих, а привод вращения проворачивает устройство с ротором, позволяя реализовать формирование растровой полосы штрих за штрихом.

4.2.3. Управление параметрами функциональных элементов, формируемых с использованием лазерных технологий

Использование ионно-плазменных и лучевых технологий открывает широкие возможности формирования на узлах гироскопических приборов функциональных элементов с получением заданных свойств и характеристик. В качестве наиболее наглядного примера можно привести процесс лазерной маркировки растровых рисунков на сферических роторах ЭСГ (рис.4.8), где варьирование условий и параметров лазерной обработки позволяет обеспечить управление основной оптической характеристикой растра – его контрастом – при сохранении точности ротора на уровне сотых долей микрометра [54].

Регулирование контрастности растра возможно за счет изменения стехиометрии напыляемого на ротор тонкопленочного покрытия нитрида титана, на поверхности которого методом лазерной маркировки формируется рисунок.

Как известно, изменение контрастности при лазерной маркировке осуществляется за счет варьирования структурно-фазового состава поверхности с образованием модифицированного слоя определенной толщины. Моделирование процесса управления контрастностью можно представить в виде последовательных этапов обработки данных, связанных с процедурой выбора оптимальной аппроксимирующей функции [55]. На первом этапе используется непараметрическая аппроксимация, когда известными считаются лишь самые общие сведения об изучаемой зависимости, которая при этом выявляется в общем виде, а на втором – параметрическая аппроксимация, когда модель (формула) изучаемой зависимости считается известной и осуществляется количественное обозначение параметров модели.

Для выявления зависимости контраста растрового рисунка от мощности лазерного излучения с использованием непараметрической аппроксимации целесообразно построить математическую модель процесса исходя из известных выражений, например, $K = \frac{K_6 - K_p}{K_6 + K_p}$, где K – контрастность рас-

трового рисунка, K_6 – коэффициент отражения базовой поверхности нитрида титана, K_p – коэффициент отражения поверхности растра, полученного локальной модификацией базовой поверхности. При этом предполагает-

ся, что изменяется только мощность лазера при прочих постоянных параметрах, таких как скорость сканирования, частота следования импульсов, и т.д. Кроме того, делается допущение, что при лазерной маркировке условия изменения структурно-фазового состава поверхности с образованием модифицированного слоя постоянны и не вносят дополнительных изменений в контраст изображения.

Очевидно, что контрастность растрового рисунка определяется изменением величины K_p в процессе воздействия лазерного луча на базовую поверхность, что, как указывалось, осуществляется за счет изменения химического состава этой поверхности с образованием модифицированного слоя определенной толщины. Например, при лазерной маркировке тонкопленочного покрытия нитрида титана происходит образование оксида титана, что и обеспечивает требуемые значения K_p и, как следствие, и K .

Так как лазерная маркировка основана на локальном нагревании маркируемой поверхности, то ее можно отнести к термически активируемым процессам и описать ее уравнениями Аррениуса, т.е. можно предположить, что K_p уменьшается экспоненциально с увеличением мощности P лазера:

$$K_p \sim e^{-P/P_0}, \quad (4.13)$$

где P_0 – мощность, при которой K_p уменьшается в e раз. Последовательными преобразованиями можно получить следующую зависимость:

$$K \approx K_{\max} - Ae^{-P/P_0}. \quad (4.14)$$

Формула (4.14) выводилась в предположении малости K_p . Из выражения (4.13) можно видеть, что K_p мало, если показатель экспоненты – большой по абсолютной величине, т.е. (4.13) справедлива для $P \gg P_0$.

Разъясним физический смысл параметров, входящих в (4.14):

- K_{\max} – максимально достижимое значение контрастности (определяется характером взаимодействия маркируемого материала с лазерным излучением);
- P_0 – мощность, при которой K_p уменьшается в e раз (определяется характером взаимодействия маркируемого материала с лазерным излучением);
- A – материальная константа, конкретизирующая характер зависимости (4.13), причем константа A , в свою очередь, зависит от свойств материала и обратно пропорциональна K_0 .

Далее осуществляется второй этап – параметрическая аппроксимация, когда осуществляется количественное определение параметров модели.

Аппроксимируя экспериментальные данные зависимостью (4.14) для реального варианта выполнения растрового рисунка на покрытии нитрида титана при скорости лазерной обработки 10 мм/с, частоте 20 кГц и плотности линий 500 лин/мм, можно определить значения K_{\max} , P_0 и константы A , которые соответственно равны: $K_{\max} = 0,93$, $P_0 = 0,148$ Вт и $A = 1,1 \cdot 10^4$, т.е. имеем:

$$K \approx 0,93 - 1,1 \cdot 10^4 e^{-P/0,148} \quad (4.15)$$

Очевидно, что выражение (4.14) с учетом принятых допущений справедливо для процессов лазерной маркировки, реализуемых посредством термоактивируемых процессов, в общем виде, а выражение (4.15) – для конкретного варианта маркирования тонкопленочного покрытия нитрида титана. Для других материалов и условий лазерной маркировки значения K_{\max} , P_0 и константы A будут, очевидно, иные.

Расширение технологических возможностей процесса лазерной маркировки растровых рисунков посредством регулирования величины коэффициента отражения K_6 базовой поверхности нитрида титана может быть обеспечено варьированием его стехиометрического состава. Рассматривая механизмы формирования покрытия TiN при напылении и лазерной маркировке, можно отметить, что в обоих случаях большое значение имеют структурно-фазовые характеристики, которые влияют на свойства растрового рисунка. Для TiN, представляющего собой фазу внедрения с широкой областью гомогенности, при стандартных условиях и режимах вакуумного напыления цвет покрытия образцов изменяется от светло-золотисто-желтого до темно-золотисто-желтого. В зависимости от парциального давления азота при напылении магнетронным методом образуется нитрид титана формулы TiN_x , где возможные значения коэффициента x лежат в диапазоне от 0,58 до 1,00.

Экспериментально установлено, что нитрид титана с недостатком азота позволяет получить одинаковые значения контрастности при меньшей мощности лазера P , что связано с более высокими значениями коэффициента отражения K_6 базовой поверхности.

Используя экспериментальные данные, можно предположить, что для каждого состава TiN_x в зависимости от величины x выражение (4.14) будет трансформироваться с изменением параметра A . На рис. 4.9 представлено семейство кривых, определяющих зависимость $K=f(P)$ для различных вариантов стехиометрического состава нитрида титана.

Штриховые линии на графике – теоретические зависимости, которые могут быть получены для материала другой стехиометрии. При этом сделано предположение, что изменение стехиометрии для соединения TiN_x в пределах $x=(0,7-0,9)$ не влияет на характер взаимодействия материала с лазерным излучением, т.е. параметры K_{\max} и P_0 остаются теми же. При этом меняется параметр A , который обратно пропорционален K_6 . На рис. 4.9 отмечены кривые с величиной параметра A от $0,8 \cdot 10^4$ до $1,0 \cdot 10^4$, что соответствует изменению коэффициента x от 0,8 до 0,9.

В области больших значений P может иметь место погрешность, обусловленная более высоким значением K_{\max} , так как в этой области на конечную контрастность в большей степени влияет увеличение коэффициента K_6 . Аналогичные соображения можно привести и к

областям со сравнительно малыми значениями P . Поэтому на рис. 4.9 штриховым прямоугольником выделена область наименьшей погрешности расчета контраста при лазерном маркировании.

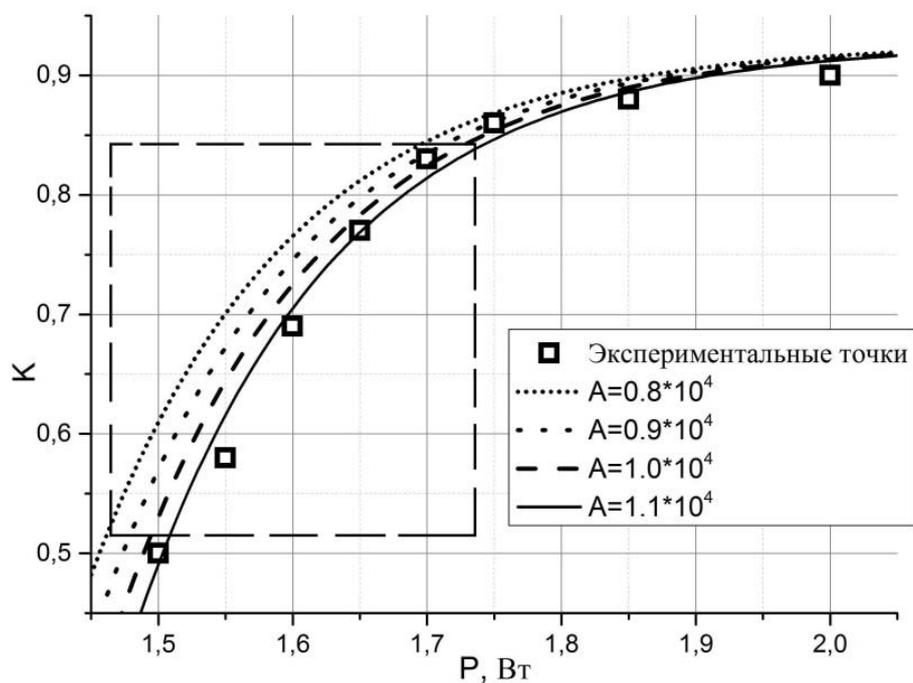


Рисунок 4.9. Зависимости изменения контрастности K от мощности P лазерного излучения для различных значений константы A

ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 4

1. Что такое ионно-плазменные и лучевые технологии?
2. Поясните механизмы роста тонких пленок: механизм Фольмера-Вебера, Франка-ван-дер-Мерве и механизм Странски–Крастоновой.
3. Какие методы напыления покрытий вакуумными методами вам известны?
4. Какие достоинства и недостатки имеет метод термического испарения в вакууме и где этот метод применяется в гироскопическом приборостроении?
5. Поясните схему напыления тонких пленок методом магнетронного распыления.
6. Поясните схему напыления тонких пленок методом катодно-ионной бомбардировки.
7. В чем суть ионного травления? Какие типы травления материалов вам известны?
8. В каких случаях используется ионное травление, химическое травление и ионно-химическое травление?
9. Поясните механизм электронно-лучевой обработки и расскажите о ее применении в гироскопическом приборостроении.
10. Поясните принципы лазерной обработки. Как осуществляется лазерная закалка, легирование, резка и сварка? Для каких материалов применяется?
11. Чем отличается лазерный отжиг от лазерной закалки?
12. Что такое поверхностное лазерное легирование?
13. Что такое лазерная наплавка и для чего она используется?
14. Расскажите о специфике напыления тонкопленочных покрытий на сферические узлы.
15. В чем недостаток устройств с жесткой схемой фиксации ротора при напылении тонкопленочного покрытия?
16. Расскажите о специфике формирования изображений методом лазерной обработки сферических узлов.
17. Как влияет газовая среда при лазерной обработке на характеристики формируемого изображения?
18. В чем заключаются особенности формирования соединений различного стехиометрического состава при лазерной маркировке изображений?
19. Поясните, как зависит контрастность изображений от мощности лазерного излучения при формировании изображений методом лазерного маркирования.

ГЛАВА 5

Неразъемные соединения узлов гиросприборов

5.1. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ УЗЛОВ ГИРОПРИБОРОВ

При сборке гироскопических приборов одной из основных операций является соединение деталей и узлов. Различают соединения разъемные и неразъемные, подвижные и неподвижные.

Разъемными называются соединения, разборка которых происходит без нарушения целостности составных частей изделия. Примерами этих соединений являются резьбовые соединения, различного вида посадки валов в отверстия.

Неразъемными называются соединения, при разборке которых нарушается целостность составных частей изделий. К неразъемным относят сварные, паяные, заклепочные, клеевые и формовочные соединения, из которых в точном приборостроении преимущественное применение находят различные виды сварки, пайка и склеивание.

Пайка – это процесс соединения материалов посредством расплавленного припоя, называемого припоем и имеющего температуру плавления ниже температуры плавления основного материала [56–59]. В радиоэлектронном приборостроении пайка может составить значительную часть общей трудоемкости. В отличие от сварки, пайка сохраняет неизменными структуру, механические свойства и состав материала деталей, вызывает значительно меньшие остаточные напряжения.

Прочность паяного соединения определяется прочностью припоя и сцепления припоя с поверхностями соединяемых деталей. В качестве припоя применяют как чистые металлы, так и сплавы. В зависимости от температуры плавления припоев бывают легкоплавкие (мягкие) и среднетугоплавкие (твердые). К легкоплавким мягким припоям с температурой плавления до 723 К относятся оловянисто-свинцовые сплавы с содержанием олова от 18 до 90%, например ПОС-61 (61% олова), применяемые для получения надежных электрических контактов при пайке и герметичных соединений. Твердые припоев имеют температуру плавления выше 773 К и обеспечива-

ют достаточную прочность шва при температуре свыше 373 К, устойчивы к вибрациям, ударам и агрессивным средам.

Эффективность и экономичность производства паяных конструкций в значительной мере зависят от правильного дозирования припоя: при недостаточном количестве припоя зазоры не заполняются, и соединение получается ненадежным; при избытке припоя имеют место натеки, наплывы, повышается расход припоя.

Требуемое количество припоя Q (в кг) рассчитывают по формуле

$$Q = 1,5\delta hlp, \quad (5.1)$$

где δ – наибольший зазор в соединении при температуре пайки, м; h – высота либо ширина соединения, м; l – протяженность соединения, м; ρ – плотность припоя, кг/м³. Коэффициент 1,5 учитывает объем галтелей припоя, неизбежные технологические потери (угар, разбрызгивание).

При пайке стыковых соединений с прижимом, когда припой применяется в виде фольги, величину δ определяют по формуле:

$$\delta = R_{\max} + 0,5 \cdot (F_1 + F_2), \quad (5.2)$$

где R_{\max} – наибольшая высота микронеровностей паяемых поверхностей, м; $F_1 + F_2$ – суммарное отклонение от плоскости первой и второй детали, м.

Наиболее предпочтительные паяные соединения – это соединения внахлест, так как за счет частичного перекрытия параллельных поверхностей деталей (нахлеста) достигается его равнопрочность с основным металлом.

Склеивание – процесс получения неразъемных соединений, использующий явление адгезии, т.е. связь между разнородными телами в контакте за счет сил межмолекулярного притяжения [60, 61]. Следует отметить, что использование клеевых соединений в ряде случаев не согласуется с условиями обезгаживания чувствительных элементов в сверхвысоком вакууме при повышенной температуре.

Сварка – процесс получения неразъемных соединений посредством установления межатомных связей между свариваемыми частями при их местном нагреве, или при пластическом деформировании, или при совместном действии того и другого [62–64]. В приборостроении трудоемкость сварки в общем объеме составляет несколько процентов.

Наиболее распространенные в приборостроении методы сварки представлены на рис. 5.1.

В соответствии с представленной на рис. 5.1 классификацией в зависимости от температуры нагрева все виды сварки можно подразделить на сварку плавлением (все термические методы и некоторые термомеханические, например контактная) и сварку в твердом состоянии (все механические методы и некоторые термомеханические, например, диффузионная, термокомпрессионная). Около 70% всех сварочных работ выполняется сваркой плавлением. В технологии изготовления гироскопических приборов из-за достаточно высокой точности процесса наибольшее применение находят лазерная и электронно-лучевая виды сварки.



Рисунок 5.1. Методы сварки

Выбор вида сварки определяется свойствами материалы и конструктивным оформлением узла. Например, медь плохо сваривается лазером ввиду большой теплоемкости, а ниобий – вследствие охрупчивания на воздухе. Для этих материалов в большей мере подходит электронно-лучевая сварка в вакууме.

Критерием возможности соединения конкретного сочетания материалов является их металлургическая совместимость. В противном случае, например, для пары титан–медь, сварка которых необходима при изготовлении штенгельного узла прибора БЭСГ и которые образуют между собой хрупкие интерметаллиды, используется такой технологический прием, как размещение между титановой и медной деталями переходной вставки. Для указанной пары материалов применяется вставка из тантала – материала, который достаточно хорошо сваривается и с титаном, и с медью.

Однако можно выделить материалы, по отношению к которым сварка плавлением практически не применима. Сюда в первую очередь можно отнести бериллий, широко используемый в гироскопических приборах. В данном случае весьма эффективным методом является использование диффузионной сварки в вакууме (ДСВ). Формирование диффузионного соединения определяется такими физико-химическими процессами, протекающими при сварке, как взаимодействие нагретого металла с газами окружающей среды, очистка свариваемых поверхностей от оксидов, развитие высокотемпературной ползучести и рекристаллизации. В большинстве случаев – это диффузионные, термически активируемые процессы.

5.2. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА

В основе электронно-лучевой сварки (ЭЛС) лежит использование механической энергии электронов, которую создает электронная пушка [65, 66]. Скорость электронов в магнитном поле пушки прямо зависит от уско-

ряющего напряжения. От мощности энергии пучка и плотности свариваемого материала зависит глубина проникновения луча. При воздействии пучка с материалом кинетическая энергия электронов переходит в тепловую. В это время происходит создание вторичных электронов и выделение рентгеновского и теплового излучений. Чем меньше диаметр пучка, тем больше его удельная мощность. Схема ЭЛС показана на рис. 5.2.

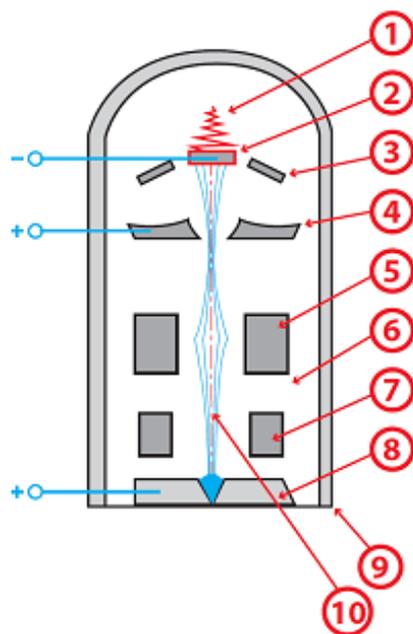


Рисунок 5.2 – Схема электронно-лучевой сварки: 1 – электрическая спираль, 2 – катод, 3 – прикатодный электрод, 4 – ускоряющий электрод (анод), 5 – фокусирующая система, 6 – вакуум, 7 – отклоняющая система, 8 – свариваемое изделие, 9 – вакуумная камера, 10 – электронный луч

Согласно схеме, представленной на рис. 5.2, катод 2 электронно-лучевой пушки, подогреваемый спиралью 1, испускает поток электронов. Около катода расположены дополнительные электроды 3, которые предварительно фокусируют электроны, формируя луч. На катод 2 подается отрицательное напряжение. К ускоряющему электроду 4, размещенному на расстоянии нескольких сантиметров от катода 2, прикладывается положительное напряжение. Высокая разность потенциалов разгоняет электроны до скорости выше 100 000 км/с. В связи с тем, что электроны имеют свойство взаимно отталкиваться, их необходимо сфокусировать электромагнитной фокусирующей системой 5. Для точного управления лучом 10 в электронно-лучевой пушке установлена электромагнитная отклоняющая система 7.

ЭЛС осуществляется в вакууме 6 за счет расплавления кромок свариваемого изделия 8 сфокусированным потоком электронов 10, имеющим высокую удельную мощность q . Технологический диапазон удельной мощности для нагрева, плавления, испарения достигает $q = 5 \cdot 10^8$ Вт/см². Сварка металлов малых толщин (до 3 мм) ведется с удельной мощностью q

$\approx 10^4$ Вт/см², когда испарение с поверхности сварочной ванны незначительно. Канал проплавления, поверхность которого сильно перегрета относительно температуры плавления металла $T_{пл}$ и может достигать температуры кипения $T_{кип}$, движется через толщу металла, образуя по всей глубине канала область расплава металла, который перемещается в хвостовую часть ванны и там кристаллизуется. Высокая концентрация энергии в луче позволяет получать при больших скоростях ЭЛС узкие и глубокие сварные швы с минимальной зоной термического влияния и высокими механическими свойствами металла шва и околошовной зоны.

В процессе сварки могут варьироваться следующие параметры электронного луча: ток луча I , ускоряющее напряжение U , ток фокусирующей системы $I_{ф}$, рабочее расстояние (расстояние от центра фокусирующей системы до поверхности свариваемого изделия) l , угол сходимости луча α , скорость перемещения луча v . При заданных значениях I , U , l , $I_{ф}$, α можно определить диаметр электронного луча d и, соответственно, удельную мощность:

$$q=IU/(\pi d^2/4), \text{ Вт/см}^2. \quad (5.3)$$

Электронно-лучевую сварку осуществляют чаще всего вертикальным лучом 10 в вакуумных камерах 9, размеры которых зависят от габаритов свариваемых изделий. Объем камер современных установок составляет от 0,1 м до сотен кубических метров. Камера с находящейся на ней (или в ней) электронной пушкой, формирующей электронный луч, может откачиваться как до высокого ($\sim 10^{-3}$ Па), так и до низкого ($\sim 1-10$ Па) вакуума, но с отдельной откачкой объема электронной пушки до 10^{-3} Па. Даже в низком вакууме (~ 1 Па) содержание кислорода в 17 раз, а азота в 10 раз меньше, чем в особо чистом аргоне, поэтому при ЭЛС защита расплавленного металла очень эффективна.

Для движения луча по поверхности изделия используют перемещение изделия или самого луча с помощью отклоняющей системы 7. Отклоняющая система 7 позволяет осуществлять колебания луча вдоль и поперек шва или по более сложной траектории.

Сварка электронным лучом имеет значительные преимущества:

- Высокая концентрация ввода теплоты в изделие, которая выделяется не только на поверхности изделия, но и на некоторой глубине в объеме основного металла. Фокусировкой электронного луча можно получить пятно нагрева диаметром 0,0002–5 мм, что позволяет за один проход сваривать металлы толщиной от десятых долей миллиметра до 200 мм. В результате можно получить швы, в которых соотношение глубины провара к ширине доходит до 20:1 и более. Появляется возможность сварки тугоплавких металлов (вольфрама, тантала и др.), керамики и т.д. Уменьшение протяженности зоны термического влияния снижает вероятность рекристаллизации основного металла в этой зоне.

- Малое количество вводимой теплоты. Как правило, для получения равной глубины проплавления при ЭЛС требуется вводить теплоты в 4–5 раз меньше, чем при дуговой сварке. В результате резко снижается коробление изделия.
- Отсутствие насыщения расплавленного и нагретого металла газами. Наоборот, в целом ряде случаев наблюдается дегазация металла шва и повышение его пластических свойств. В результате достигается высокое качество сварных соединений на химически активных металлах и сплавах, таких как ниобий, цирконий, титан, молибден и др. Хорошее качество электронно-лучевой сварки достигается также на низкоуглеродистых, коррозионно-стойких сталях, меди и медных, никелевых, алюминиевых сплавах.

В качестве примера использования ЭЛС в точном приборостроении можно привести сварку сильфонов (толщина стенки $0,08^{+0,05}$ мм) с крышками (материалы 36НХТЮ), а также изготовление штенгельных узлов посредством сварки титановой крышки с медной трубкой через переходную вставку из тантала – материала, который хорошо сваривается как с медью, так и титаном.

5.3. ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА

При лазерной сварке [68–69] нагрев и плавление металла осуществляется лазерным лучом оптического квантового генератора (ОКГ). Лазерный луч по сравнению с обычным световым лучом обладает рядом свойств: направленностью, в результате чего энергия концентрируется на сравнительно небольшом участке; монохроматичностью, определяемой строго заданной частотой и длиной волны; когерентностью, которая характеризуется согласованным протеканием во времени нескольких волновых процессов. Перечисленные свойства позволяют сфокусировать лазерный луч на строго заданном небольшом участке и создать на нем плотность энергии (порядка 10^8 Вт/см²), достаточную для плавления металла и, следовательно, сварки.

Для лазерной сварки обычно используются твердотельные или газовые лазеры. Схема твердотельного лазера приведена на рис. 5.3.

Основным конструктивным элементом лазера является активное тело 3, в качестве которого используется стержень из рубина, стекла с примесью неодима или алюмо-иттриевого граната, легированного неодимом либо иттербием. Активное тело размещается в осветительной камере 5. Для возбуждения атомов активного тела используется лампа накачки 4, создающая мощные вспышки света. По торцам активного тела размещены отражающее 6 и частично прозрачное зеркало 2. Луч лазера выходит через частично прозрачное зеркало 2, предварительно многократно отражаясь внутри активного тела и таким образом усиливаясь.

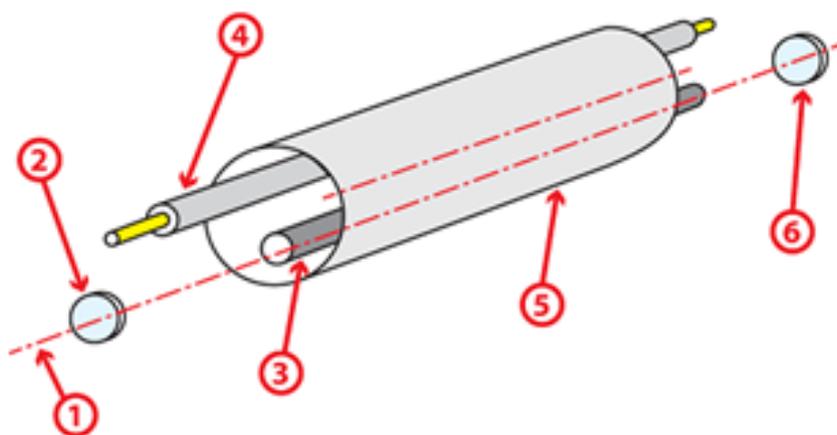


Рисунок 5.3. Схема твердотельного лазера: 1 – луч лазера, 2 – частично прозрачное стекло, 3 – активное тело, 4 – лампа накачки, 5 – осветительная камера, 6 – отражающее зеркало

Мощность твердотельных лазеров относительно невелика и обычно не превышает 1–6 кВт. Твердотельными лазерами в связи с их небольшой мощностью свариваются только мелкие детали небольшой толщины, обычно объекты микроэлектроники. Например, привариваются тончайшие выводы из проволок диаметром 0,01–0,1 мм, изготовленные из тантала, золота, нихрома. Возможна точечная сварка изделий из фольги с диаметром точки 0,5–0,9 мм.

Более мощными являются газовые лазеры, в которых в качестве активного тела используют смесь газов, обычно $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{He}$. Схема газового лазера приведена на рис. 5.4.

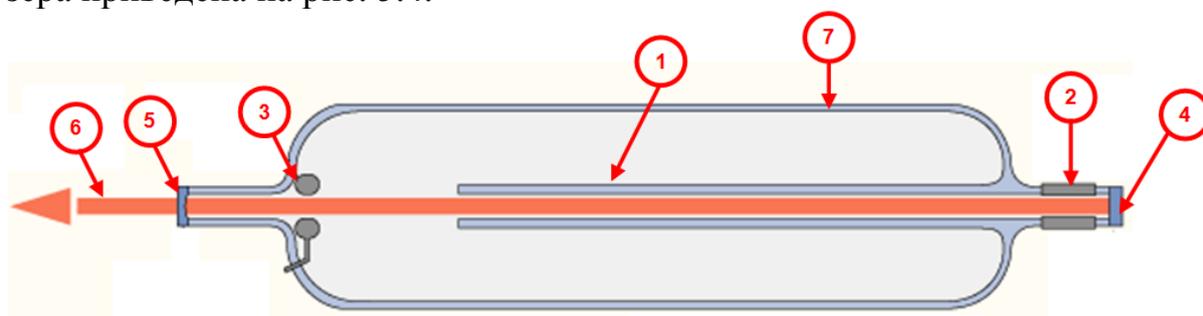


Рисунок 5.4. Схема газового лазера: 1 – газоразрядная трубка, 2 – анод, 3 – катод, 4 – отражающее зеркало, 5 – частично прозрачное зеркало, 6 – лазерный луч, 7 – стеклянная оболочка

Согласно схеме, представленной на рис. 5.4, при использовании газового лазера газовая смесь поступает из баллонов в газоразрядную трубку 1. Для энергетического возбуждения газа используется электрический разряд между электродами 2 и 3, размещенными по торцам газоразрядной трубки. Электроды подключены к источнику питания. Как и в твердотельном лазере, на концах трубки имеются зеркала 4 и 5. Луч лазера 6 выходит через частично прозрачное зеркало 5, предварительно многократно отражаясь внутри газовой трубки и таким образом усиливаясь.

Газовые лазеры позволяют достичь общей мощности 20 кВт и дают возможность сваривать металлы толщиной до 20 мм с достаточно высокой скоростью, около 60 м/ч.

Общая схема оборудования для лазерной обработки включает в себя следующие основные элементы (рис.5.5): источник когерентного излучения – технологический лазер 1 генерирует лазерное излучение 2, которое проходит через оптическую систему 3 и попадает на обрабатываемую деталь 4, фиксируемую устройством 5; для контроля параметров процесса технологической обработки предусмотрены датчики 6 и 8, а также программное устройство 7.

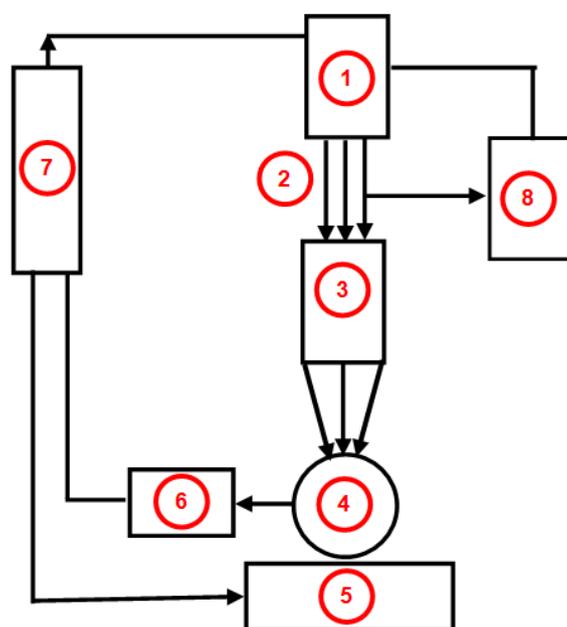


Рисунок 5.5. Схема лазерной сварочной установки. 1 – технологический лазер; 2 – лазерное излучение; 3 – оптическая система; 4 – обрабатываемая деталь; 5 – устройство для закрепления и перемещения детали; 6 – датчики параметров технологического процесса; 7 – программное устройство; 8 – датчики параметров излучения

Принципиальное отличие лазерной сварки от электронно-лучевого метода заключается в том, что для нее не требуются вакуумные камеры. Процесс сваривания при помощи лазерной технологии производится в воздушной среде или в условиях насыщения камеры специальными защитными газами – углекислотой, аргоном и гелием.

Лазерная сварка обладает рядом преимуществ, не присущих другим способам сварки. Лазер может быть расположен на достаточно большом удалении от места сварки, что в ряде случаев дает существенный экономический эффект. Возможна также лазерная сварка нескольких деталей от одного лазера расщепленным с помощью призм лучом.

Применение лазерной сварки эффективно в производстве изделий электронной и радиотехнической промышленности, в точном приборостроении, при получении микроминиатюрных элементов. Лазерная сварка отли-

чается наибольшими значениями плотности энергии и широко применяется для закрепления сборочных узлов гироскопов и электрических машин, герметизации корпусов микросборок, сварки электрооборудования, узлов оптических датчиков гироскопов и других изделий. Этот способ имеет решающее преимущество перед другими способами при сварке ферромагнитных материалов, так как световой луч не взаимодействует с магнитным полем. Сваркой лазером можно осуществить соединение различных металлов толщиной от нескольких микрон до десяти и более миллиметров.

5.4. КОНТАКТНАЯ СВАРКА

Контактная сварка [70] – один из наиболее распространенных видов сварки, ею сваривают около 30% всех сварных изделий. Основными параметрами контактной сварки являются сила и длительность протекания сварочного тока, а также усилие сжатия свариваемых деталей. Количество выделившегося тепла определяется согласно закону Джоуля-Ленца:

$$Q = \int_0^t RI^2 dt, \quad (5.4),$$

где R – электрическое сопротивление; I – сварочный ток; t – длительность сварочного импульса.

Различают несколько способов контактной сварки: точечная, шовная, стыковая и др. Точечная сварка осуществляется на сварочных машинах с двумя электродами 2, зажимающими свариваемые детали 1 с двух сторон, как показано на рис. 5.6. Процесс сварки идет в результате плавления ядра 3 за счет тепла, выделяющегося при прохождении тока через электрическое сопротивление в контактной поверхности деталей. Давление электродов не снижается до полной кристаллизации сварной точки.

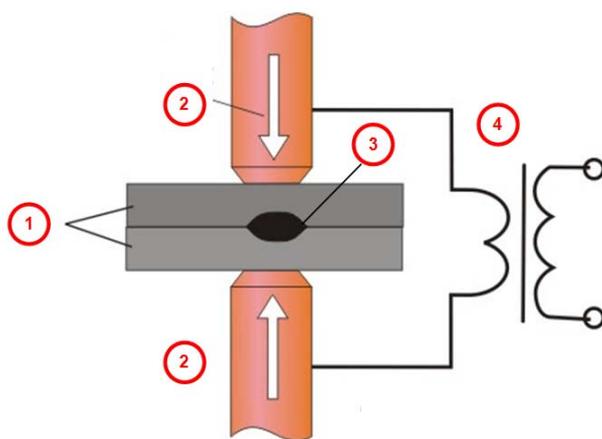


Рисунок 5.6. Схема контактной сварки. 1 – свариваемые детали; 2 – электроды; 3 – литое ядро; 4 – трансформатор или блок конденсаторов

В качестве источника энергии может использоваться трансформатор или блок конденсаторов 4. В последнем случае сварка называется конденса-

торной и применяется, прежде всего, для сварки теплопроводных металлов (сплавы на основе меди и алюминия).

Основная область применения точечной сварки – сварка листовых материалов внахлест (каркасные конструкции, кожухи приборов и т.п.). Диаметр сварной точки – от 1 мм до нескольких миллиметров. Для микроконтактной сварки, применяемой при электромонтаже и сварке проводов с кольцами и щетками токосъемников, диаметр сварной точки – менее 1 мм.

Однако в приборостроении наиболее распространены такие виды сварки в твердом состоянии, как диффузионная, холодная, трением.

5.5. ДИФФУЗИОННАЯ СВАРКА В ВАКУУМЕ

Как указано выше, выбор технологии диффузионной сварки в вакууме для реализации неразъемных соединений узлов giroприборов во многом обусловлен тем, что известные технические решения по соединению одного из основных конструкционных материалов – бериллия – с другими металлами и неметаллами с требуемым качеством практически невозможно осуществить другими методами сварки и посредством пайки [17, 50, 51].

Способ диффузионной сварки в вакууме (ДВС) – так называемый T, P, t – процесс (T – температура, P – давление, t – время), который основан на создании физического контакта (параметры T и P) соединяемых поверхностей с последующим твердофазным взаимодействием (взаимодиффузия, топохимические реакции, спекание зерен) приконтактных областей (параметры T и t), с образованием качественного соединения [26, 71–75].

Способ ДСВ позволяет в широких пределах варьировать основные взаимосвязанные параметры сварки – T, P и t , используя различные вспомогательные приемы для уменьшения T и P , например пластичные промежуточные прослойки, и обеспечивать этим минимально возможный уровень термомеханических воздействий на свариваемый узел. При этом выбор параметров сварки T, P и t производится с участием таких характеристик свариваемых материалов, как предел текучести, скорость установившейся ползучести, конкретная геометрия детали и т.д., что позволяет объективно выбирать диапазон параметров, приемлемых с точки зрения допустимых деформаций свариваемого узла.

Одним из технологических приемов сварки в твердом состоянии является способ **сварки с применением пластичных проволочных прослоек** (In, Al и др.), существенно снижающий температуру сварки. В этом случае сварка осуществляется за счет пластической деформации прослойки, которая, растекаясь по поверхностям, создает значительные касательные напряжения и деформации прослойки, способствующие очистке поверхностей и схватыванию прослойки с деталями, т.е. установлению межатомных связей. Деформация свариваемых деталей при этом практически отсутствует. Способ сварки через индиевую прослойку реализован при соедине-

нии керамических полусфер на центрирующем кольце гироскопа ЧЭ ЭСГ, сердечника гравиметра и других узлов.

В практике диффузионной сварки известно применение двух технологических схем процесса, различающихся характером приложения нагрузки или напряжения, действующих в течение цикла. В одной из них используют постоянную нагрузку по величине ниже предела текучести. При этом процессы, развивающиеся в свариваемых материалах, аналогичны ползучести. Такую технологию называют диффузионной сваркой по схеме **свободного деформирования** [71–75].

Помимо сварки по схеме свободного деформирования, в гироскопостроении используются технические решения, в которых рассматривается путь уменьшения деформаций за счет регулирования скорости деформирования $\dot{\epsilon}$, (технология сварки с принудительным деформированием) [36, 71–75]. В этом случае $\dot{\epsilon}$ становится управляемым параметром, который можно изменять независимо от температуры T , величины деформации ϵ и фактора, учитывающего сопротивление материала пластической деформации. Процессом, обеспечивающим повышение прецизионности сварки, является изотермическая выдержка деталей в режиме релаксации напряжений при $\dot{\epsilon} = 0$. Процесс сварки разделяется на периоды активного деформирования и периоды релаксации посредством уменьшения $\dot{\epsilon}$ и напряжений σ с помощью внешнего привода. Отсюда вытекает значимость таких термомеханических параметров сварки, как величина деформации деталей ϵ и скорость деформирования $\dot{\epsilon}$. В сочетании с требованиями минимальных деформаций при сварке узлов гироскопов параметр $\dot{\epsilon}$ приобретает особую важность для исключения структурных дефектов и даже микротрещин, что может иметь место для бериллия при величинах $\dot{\epsilon} > 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ в диапазоне температур рекристаллизации бериллия.

Таким образом, наиболее приемлемым для узлов гироскопов можно считать использование принудительного прецизионного деформирования деталей при сварке в сочетании с разработкой средств математического обеспечения и созданием расчетных методик процесса сварки.

В технологическом процессе изготовления основного узла ЭСГ – бериллиевого ротора – одной из наиболее важных операций является диффузионная сварка тонкостенных полусфер по плоскостям разъема, на примере которой наиболее наглядно можно показать особенности ДСВ прецизионных узлов. В данном случае сварочное давление может регулироваться внешним приводом или создаваться за счет термического натяга, определяемого разностью термических коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) материалов свариваемых деталей и элементов сварочного модуля [71–73].

Решая конкретные задачи ДСВ с внешним приводом сварочного давления, можно выделить следующие основные элементы конструкции сварочных устройств, обеспечивающих сварку тонкостенных полусфер ротора

ЧЭ ЭСГ, с созданием давления, передаваемого на всю наружную сферическую поверхность деталей:

- плотно прилегающие пуансоны в виде оправок со сферическими выемками, рабочая поверхность которых непосредственно контактирует со свариваемыми деталями;
- направляющие элементы, обеспечивающие требуемую соосность и точность позиционирования деталей;
- кинематические узлы, определяющие стыковку, промежуточные этапы взаимной ориентации и взаиморасположения деталей и элементов устройства.

На рис. 5.7 представлена конструкция сварочного модуля для ДСВ полусфер ротора ЧЭ ЭСГ с элементами фиксации полусфер в разнесенном положении и регулирования момента их стыковки. Материалом оправок является корундовая керамика, обладающая высокой размерной стабильностью и имеющая значение ТКЛР, значительно меньшее, чем у свариваемых деталей (бериллий). Это соотношение ТКЛР, а также превышение исходного расчетного диаметра D_n выемок оправок над наружным диаметром D_p полусфер и варьирование величиной смещения центров сферических выемок относительно плоскостей разъема оправок, позволяют осуществлять процесс ДСВ с приложением сварочного давления $P_{св}$ при расчетной температуре $T_{св}$, соответствующей равенству диаметров D_n и D_p , т.е. $D_{n(T_{св})} = D_{p(T_{св})}$.

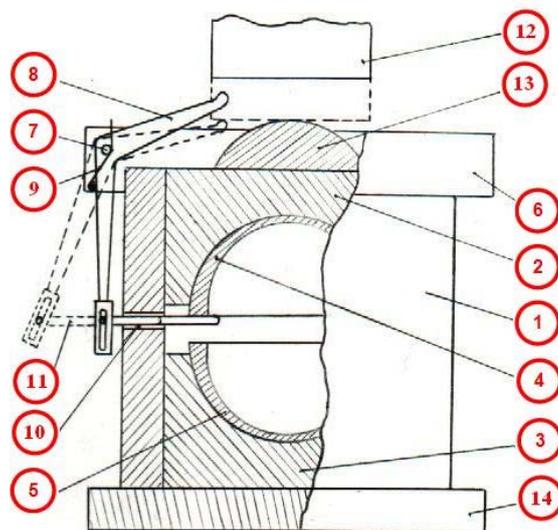


Рисунок 5.7. Схема сварки ротора ЭСГ с плотно прилегающими пуансонами.

- 1 – стакан; 2 – верхняя оправка; 3 – нижняя оправка; 4 – верхняя бериллиевая полусфера, 5 – нижняя бериллиевая полусфера, 6 – кольцо, 7 – шарниры, 8 – рычаги, 9 – пружины, 10 – радиальные отверстия, 11 – штифты, 12 – шток нагружения, 13 – пята

Представленная на рис. 5.7 конструкция состоит из направляющего стакана 1, в котором с возможностью осевого перемещения установлены две оправки – верхняя 2 и нижняя 3, выполненные со сферическими, встречно

обращенными выемками. В эти выемки помещаются верхняя 4 и нижняя 5 в бериллиевые полусферы. На стакане 1 фиксируется кольцо 6, имеющее радиальные прорезы, в которых на шарнирах 7 установлены рычаги 8 (в данном случае три), посредством пружин 9 поджатые к стакану 1 своими нижними концами. В средней части стакана 1 выполнены радиальные отверстия 10, куда входят шарнирно связанные с нижними концами рычагов 8 штифты 11. Поджатие рычагов 8 к стакану 1 посредством пружин 9 обеспечивает установку концов штифтов 11 в зоне разъема полусфер 4 и 5, что определяет их гарантированное разнесенное положение и достаточно эффективное обезгаживание внутренней поверхности ротора.

Верхние концы рычагов 11 связаны со штоком нагружения 12, давление от которого на сварочные оправки передается через пята 13. Весь стакан 1 с оправками 2 и 3 установлен на опору 14. При перемещении шток нагружения 12 в начальный момент входит в контакт с верхними концами рычагов 8, которые поворачиваются вокруг шарниров 7, преодолевая поджатие пружин 9, и обуславливают радиальное перемещение штифтов 11, что приводит к удалению штифтов 11 из зоны разъема полусфер 4 и 5. Происходит стыковка полусфер и передача на них давления сварки от штока нагружения 12.

Более эффективная высокотемпературная технология сварки ротора ЧЭ ЭСГ, основанная на использовании давления термического натяга, определила изменение конфигурации полусфер, что заключалось в выполнении в их конструкции наружного кольцевого фланца, на котором было локализовано сварочное давление, т.е. осуществлялся процесс ДСВ с ненагружаемой сферической поверхностью [72, 73] (рис. 5.8).

Согласно схеме, представленной на рис. 5.8, с наружной стороны каждой полусферы 1 и 2 выполнялись технологические фланцы 3 и 4 шириной L , достаточной для выполнения на фланцах центровочных отверстий, в которые помещались штифты, обеспечивающие соосность полусфер. Очевидно, что одна из плоскостей фланца должна совпадать с плоскостью разъема полусферы. Высота H каждого из фланцев определялась из выражения

$$H = \frac{1}{2} \sqrt{D_n^2 - D_{вн}^2}, \quad (5.4)$$

где D_n и $D_{вн}$ – наружный и внутренний диаметры полусфер. Таким образом, проекция точки А, соответствующей переходу наружной сферической поверхности полусферы в плоскость фланца, на плоскость разъема полусферы размещалась на окружности диаметра $D_{вн}$.

На встречно обращенных плоскостях фланцев выполнялись буртики шириной $l_0^б$, которые обеспечивали дополнительную локализацию сварочного давления, формируемого за счет различных величин термических коэффициентов линейного расширения бериллиевых полусфер и элементов

сварочного модуля в этих зонах. Это позволяло уменьшить общую деформацию осадки одноосного сжатия и повысит точность ротора.

На рис. 5.8 обозначены величины удельных давлений на наружной поверхности фланцев ($\sigma_{св}$) и на буртиках ($\sigma_{св}^*$). Очевидно, что соотношение $\sigma_{св}$ и $\sigma_{св}^*$ определяется соотношением площадей наружной поверхности фланца и сопрягаемой площади буртиков. Ширина буртиков выбиралась из условия формирования сферы заданного диаметра после удаления материала фланцев на сваренном роторе, после чего осуществляется процесс балансировки ротора.

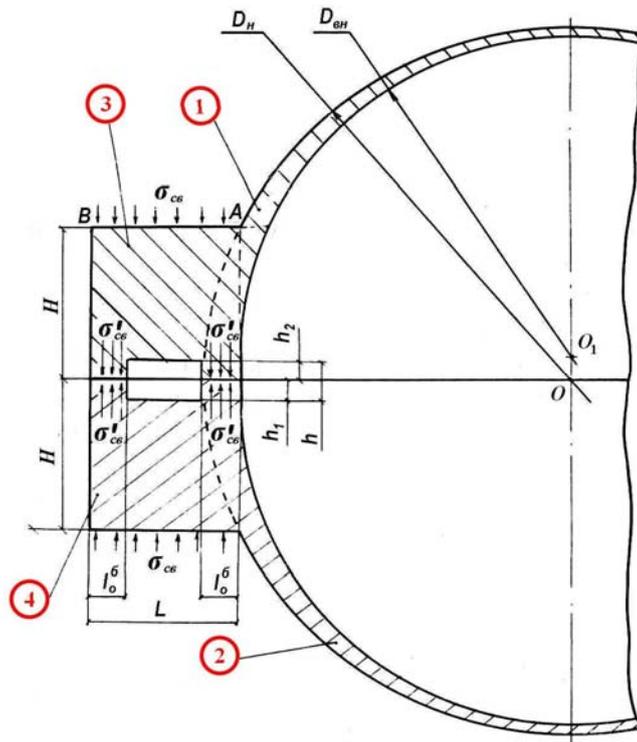


Рисунок 5.8. Схема сварки полусфер с кольцевыми фланцами:
1 и 2 – бериллиевые полусферы, 3 и 4 – технологические фланцы

Общие положения процесса минимизации пластических деформаций посредством регулирования параметров термического натяга требуют и разработки конкретных методов и средств его обеспечения, и его математического моделирования. Это позволит определить взаимосвязности между параметрами процесса сварки и даст возможность регулировать и варьировать эти параметры для обеспечения требуемой прецизионности процесса сварки.

Как известно, любая система моделирования является инструментом выработки технического решения по совокупности процедур и мероприятий, обеспечивающих достижение заданного результата, определяемого целью исследований. Разрабатываемая при создании сложных прецизионных изделий и процессов их изготовления конструкторская и технологическая документации, по существу, является комплектом математических

моделей, а сам процесс проектирования, в том числе и технологический, можно обозначить как построение соответствующих моделей.

Для представленной выше схемы ДСВ фланцевого варианта бериллиевого ротора ЧЭ ЭСГ весьма важной является разработка математической модели этапов деформирования при сварке, поскольку это определяет как точность ротора, так и качество сварного шва [72,73].

В данном случае построение процесса ДСВ связано с конструкцией сварочного модуля, который включает свариваемые детали, а также элементы создания сварочного давления термического натяга $P_{Т/Н}$. В этом комплексе инструмент (пуансоны и стяжки, задающие соответствующие сварочные напряжения, узлы кинематики, определяющие взаимную ориентацию деталей, и т.д.) воздействует на детали, осуществляя формирование требуемых условий сварки.

Очевидно, что исходным условием является конструктивное оформление свариваемых полусфер, представленное на рис. 5.8, которое обеспечивает минимизацию сварочных деформаций.

Для ограничения величины деформаций можно использовать схему практической реализации, основанную на использовании элементов принудительного деформирования и обеспечивающую регулирование величины деформаций ε посредством используемого в составе сварочного модуля ограничительного упора.

Очевидно, что в общем случае при сварке, согласно представленной на рис. 5.8 схеме, будет иметь место деформация, обусловленная разницей в ТКЛР материалов полусфер и элементов сварочного модуля в интервале температур $\Delta T_{св} = (T_{св} - T_c)$, где T_c – температура стыковки, а $T_{св}$ – температура сварки.

В расчетах режимов сварки регулировать величину давления термического натяга можно изменением интервала $\Delta T_{св}$, в котором реализуется процесс деформирования и образования соединения.

В развитие известных технических решений [36, 72–73], в которых ограничение величины деформаций осуществляется посредством упоров, входящих в состав сварочного модуля, можно предложить схему практической реализации, в которой используются упоры, не деформируемые в условиях сварки, что позволит упростить расчет процесса деформирования в системе сварочного модуля. При этом величина давления термонатяга должна находиться в пределах, обеспечивающих скорость деформирования, соответствующую скорости установившейся ползучести бериллия для температур в интервале $\Delta T_{св} = (T_{св} - T_c)$.

На рис. 5.9 представлены схемы диффузионной сварки армирующих элементов (АЭ) с бериллиевой основой роторов БЭСГ.

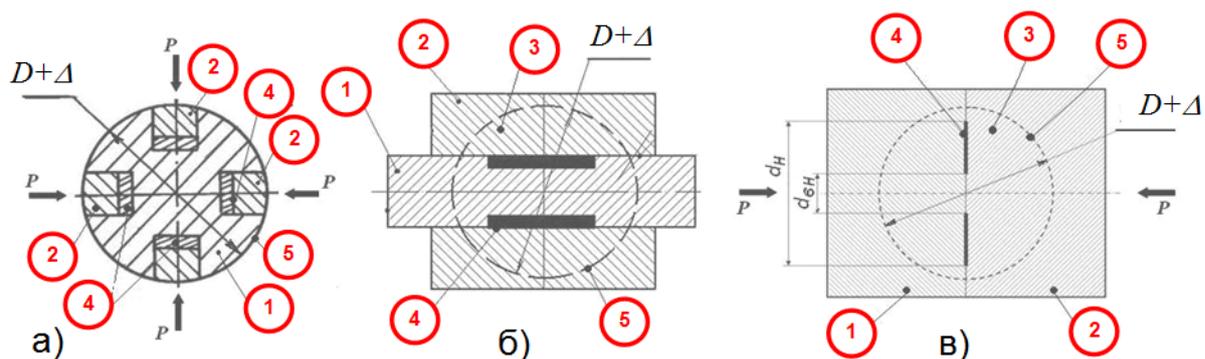


Рис.5.9. Ориентация АЭ в роторе при ДСВ: а) АЭ в виде 4-х дисков; б) АЭ в виде цилиндра; в) кольцевой АЭ. 1, 2 – свариваемые детали ротора, 3 – сферическая заготовка ротора; 4 – армирующий элемент; 5 – поверхность заготовки ротора; D – диаметр ротора; Δ – припуск на балансировку; P – направление приложения сварочной нагрузки

В первом варианте (рис. 5.9, а), используя в качестве базы сферическую поверхность исходной заготовки 1, с достаточно высокой точностью формируют четыре равновеликих выемки, оси которых пересекаются в геометрическом центре сферической заготовки, для размещения в них идентичных армирующих элементов 4 в виде дисков. Фиксацию АЭ в заготовке осуществляют запрессовкой в эти выемки пробок из бериллия с последующей диффузионной сваркой.

В варианте, представленном на рис. 5.9, б, цилиндрический армирующий элемент 4 формируют методом напыления в кольцевой проточке, предусмотренной на охватываемой детали 1. Заготовку ротора 3 получают посредством ДСВ телескопического соединения деталей 1 и 2, а базирование при формообразовании сферы 5 ротора 3 осуществляют относительно детали 2: в радиальном направлении – по наружному цилиндру детали 2, а в осевом – по ее торцам. Поскольку центр АЭ в этом случае явно не выражен, режимы термомеханических воздействий на операции ДСВ подбираются таким образом, чтобы обеспечить симметричное деформирование входящих деталей 1 и 2 в процессе радиально ориентированного сжатия.

В последнем варианте (рис. 5.9, в) в качестве армирующего элемента используется молибден. В этом случае соединение деталей производится за счет диффузионной сварки с деформацией осадки одноосного сжатия, и обеспечивается наиболее эффективный процесс соединения с точки зрения его надежности. Однако имеющие при этом место несимметричные пластические деформации могут приводить к большим погрешностям при определении центра сферической поверхности в процессе формообразования исходной заготовки ротора.

ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 5

1. Что такое разъемные и неразъемные соединения, в каких случаях они используются?
2. Что такое пайка, чем она отличается от сварки?
3. Какие виды припоев вы знаете?
4. С чем связана эффективность и экономичность производства паяных конструкций?
5. Что вы знаете о клеевых соединениях?
6. Какие виды сварки вам известны?
7. Каковы принципиальные отличия сварки плавлением и сварки в твердой фазе?
8. Поясните механизм электронно-лучевой сварки и опишите сферы ее применения.
9. Опишите схему лазерной сварки, расскажите о строении лазера и сферах его применения.
10. Перечислите особенности и преимущества использования лазерной сварки.
11. Что такое контактная сварка?
12. Что такое металлургическая совместимость материалов и в чем она проявляется при сварке?
13. Назовите основные параметры процесса диффузионной сварки.
14. Какие технологические схемы процесса диффузионной сварки, различающиеся характером приложения нагрузки или напряжения, вы можете назвать?
15. Какие преимущества имеет такой технологический прием при сварке в твердом состоянии, как применение пластичных проволочных прослоек?
16. Какие виды твердофазных взаимодействий при диффузионной сварке вы можете назвать?
17. За счет чего создается давление термического натяга при диффузионной сварке?
18. Опишите схему сварки полусфер с кольцевыми фланцами полого ротора электростатического гироскопа.
19. Опишите схему сварки сплошного ротора электростатического гироскопа с четырьмя армирующими вставками.
20. Опишите схему сварки сплошного ротора электростатического гироскопа с армирующим элементом в виде цилиндра.
21. Опишите схему сварки сплошного ротора электростатического гироскопа с кольцевым армирующим элементом.

В настоящее время в качестве приоритетов технологического развития можно определить новые перспективные технологии, основанные на широком применении новых материалов, информационных технологий и глубокой автоматизации производственных процессов. К таким технологиям относятся аддитивные технологии [76, 77], более известные как 3D-технологии, или 3D-принтинг.

Аддитивные технологии (англ. Additive Manufacturing (AM)) на сегодняшний день являются современным и перспективным способом производства изделий сложной конфигурации. Если при традиционных методах при производстве изделий с заготовки удаляется лишний материал либо используются литьевые процессы и пр., то при аддитивных технологиях происходит послойное формирование изделия с использованием различных технологических методов и устройств. При использовании аддитивных технологий все стадии реализации проекта от идеи до материализации (в любом виде – в промежуточном или в виде готовой продукции) находятся в единой технологической цепи, в которой каждая технологическая операция также выполняется в цифровой CAD/CAM/CAE-системе. Таким образом, суть аддитивных технологий может быть проиллюстрирована простым примером: CAD-модель → AM-машина → деталь.

К настоящему моменту эти технологии получили широкое применение во всех областях науки и техники. Так, например, 3D-печать используется для изготовления деталей различного уровня сложности в авиа- и автомобилестроении. Следует отметить, что одно из главных преимуществ аддитивных технологий по сравнению с традиционными заключается в возможности изготовления детали практически любой конфигурации, что подразумевает создание монолитных изделий сложной внутренней геометрии, формирование которых традиционными способами зачастую просто невозможно. Таким образом, разработчику, который располагает лишь традиционными технологиями изготовления, приходится разбивать деталь сложной конфигурации на простые составные части, что можно избежать в

случае использования аддитивных технологий. Также с помощью аддитивных технологий можно, например, вырастить «деталь в детали», или деталь с переменными по толщине свойствами материала, можно формировать сетчатые конструкции, которые невозможно получить ни литьем, ни механообработкой.

Существует целый ряд материалов, применяемых в аддитивных технологиях. Наиболее распространенными являются различные пластики и полимеры, с использованием которых создается как готовая продукция (предметы быта, сувениры и др.), так и модели изделий. Однако, несмотря на быстрое развитие этих технологий, в области приборостроения формирование прототипов и моделей из пластика не является приоритетной задачей. Наибольший интерес для промышленности, в том числе и для приборостроения, представляют аддитивные технологии, позволяющие осуществлять выращивание изделий из металлических порошков и нанокomпозиционных материалов.

6.1. ТИПЫ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Многообразие способов формообразования изделий обусловлено широким спектром материалов, используемых аддитивными технологиями. Поскольку для приборостроения наибольший интерес представляет 3D-печать из металла, ниже будут рассмотрены технологии, обеспечивающие формирование металлических изделий. Для обеспечения указанных условий подходящими технологиями являются порошковые технологии, где формирование металлической детали осуществляется путем спекания порошкового материала лазерным лучом (или электронным пучком). Стоит отметить, что качество металлического изделия напрямую зависит от характеристик порошка. Общее требование к порошкам для AM-машин – сферическая форма частиц. Это связано, во-первых, с тем, что такие частицы более компактно укладываются в определенный объем, а во-вторых – с необходимостью обеспечить «текучесть» порошковой композиции в системах подачи материала с минимальным сопротивлением.

По методу формирования слоя аддитивные технологии можно разделить на два условных типа (рис. 6.1): *bed deposition* – формирование слоев с использованием платформы (рис. 6.1, а) и *direct deposition* – прямое нанесение (рис. 6.1, б).

При использовании технологии *bed deposition* сначала формируют слой, например, насыпают на поверхность рабочей платформы дозу порошкового материала и разравнивают порошок с помощью ролика или «ножа», формируя ровный слой материала определенной толщины. Затем выборочно (селективно) обрабатывают порошок в сформированном слое лазером или иным способом, скрепляя частички порошка (сплавляя или склеивая) в соответствии с текущим сечением исходной САД-модели.

Указанной технологии достаточно точно соответствует термин «селективный синтез» или «селективное лазерное спекание» (SLS – Selective Laser Sintering), если «отверждающим» инструментом является лазер. После завершения построения платформа перемещается в вертикальном направлении на величину шага построения, на ней формируют новый слой, и процесс повторяется до полного построения модели. К преимуществам данной технологии можно отнести сравнительно высокое качество поверхности получаемой детали, которое напрямую зависит от толщины выбранного слоя.

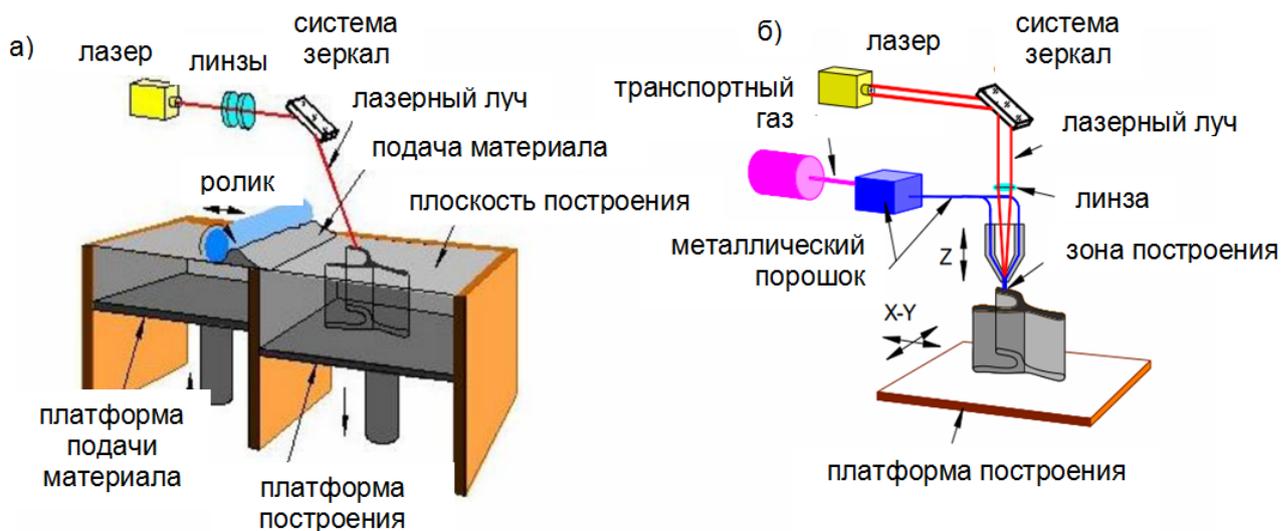


Рисунок 6.1. Типы аддитивных технологий: а) с использованием платформы; б) методом прямого нанесения

При использовании технологии direct deposition газопорошковая смесь подается через каналы коаксиально вдоль оси лазерного луча непосредственно в точку, куда подводится энергия и где происходит в данный момент построение фрагмента детали. Такой способ отличается высокой производительностью и позволяет создавать геометрически сложные детали в короткий промежуток времени. Данную технологию также принято называть прямым лазерным выращиванием. В обоих случаях процесс изготовления детали начинается с построения компьютерной 3D-модели изделия. Затем модель программно рассекается на тонкие слои, чтобы получить информацию о контуре каждого слоя, который воспроизводится уже при изготовлении детали.

Технология электронно-лучевой плавки по схеме аналогична лазерному выращиванию, только вместо лазерного луча используется электронный. Этот метод не нашел широкого применения в силу более сложной технической реализации по сравнению с методами лазерного выращивания или спекания.

6.2. КРИТЕРИИ ВЫБОРА ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Рассматривая наиболее распространенные способы формирования металлических изделий, необходимо оценить возможность применения аддитивных технологий для изготовления деталей и узлов гиросприборов.

В зависимости от используемого способа и режимов формирования детали характеристики получаемых изделий могут варьироваться в широких пределах. Шероховатость изделий зависит от толщины наплавленного (спекаемого) слоя: чем тоньше слой, тем лучше шероховатость. Однако уменьшение толщины слоя увеличивает время выращивания детали. Как правило, лучшей шероховатости можно добиться, используя метод селективного лазерного спекания, поскольку прямое лазерное выращивание больше ориентировано на быстрое, производительное создание крупногабаритных деталей. Но стоит отметить, что даже при низкой толщине слоя уровень шероховатости получаемых изделий может достигать лишь величины Ra 5 и более.

Исходя из вышеизложенного, можно рассматривать возможность использования аддитивных технологий для изготовления корпусных деталей сложной конфигурации, к которым не предъявляются жесткие требования по точности и шероховатости. Использование этих технологий оправдано в случае изготовления деталей, где при традиционных методах обработки «вычитается» до 70% материала заготовки, что делает изготовление такой детали долгим и дорогостоящим.

Также технологии выращивания можно использовать и для конструкций сложной конфигурации (рис. 6.2), изготовление которых традиционными методами предполагает ряд операций, в том числе гибку и сварку. Использование аддитивных технологий позволит сократить время изготовления корпуса и каркаса, модели которых представлены на рис. 6.2.

Однако существенным препятствием для применения аддитивных технологий является материал, из которого изготавливается детали (рис. 6.2), а именно – магнитно-мягкий сплав 80НХС. На сегодняшний день номенклатура порошков, используемых большинством научно-исследовательских институтов, центров и компаний, достаточно узка и, в основном, представляет распространенные материалы, такие как титан, жаропрочные стали, алюминий и некоторые сплавы на основе железа. Даже при условии, что существуют порошки сплавов на основе никеля и железа, они не обеспечивают свойств сплава 80НХС. Соответственно, для изготовления такого корпуса потребуются не только работа по выращиванию этого изделия, но и работа по созданию порошка из материала 80НХС.

Помимо рассмотренных выше деталей, изготовление которых с использованием аддитивных технологий возможно и не требует затрат на дополнительную научно-исследовательскую работу, представляют интерес кронштейны (рис. 6.3), изготовление которых методом лазерного выращи-

вания позволит сразу получить монолитную конструкцию, тогда как при традиционных технологиях потребуются трудоемкие гибочные, токарные, фрезерные, сварочные операции.

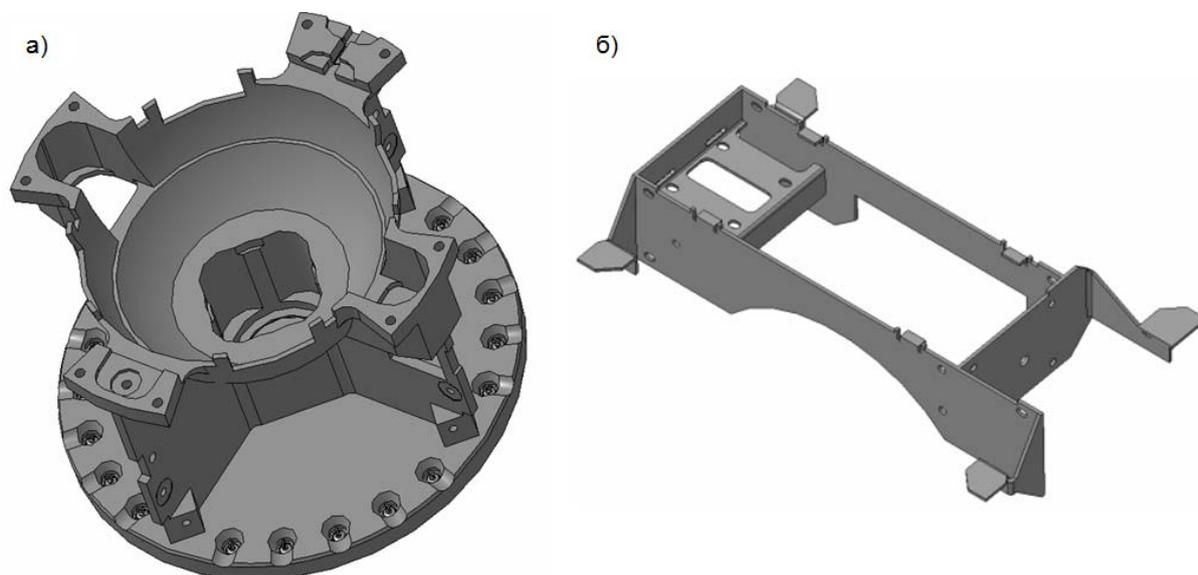


Рисунок 6.2. Трехмерные модели: а) корпуса; б) каркаса

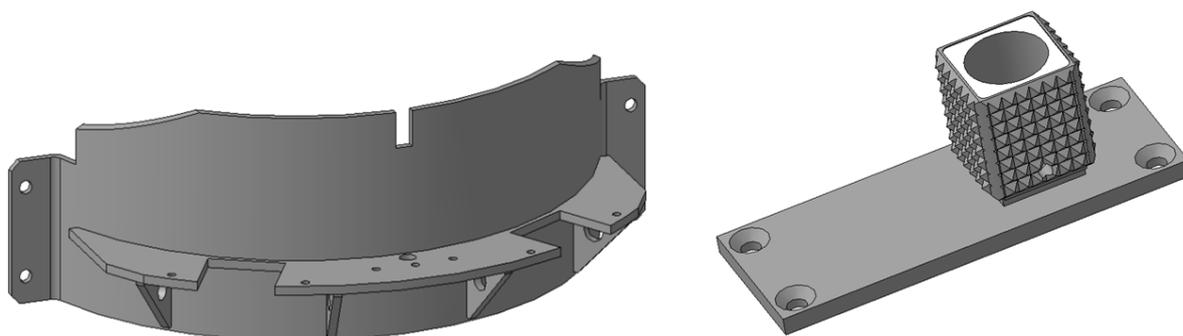


Рисунок 6.3. Модели кронштейнов

Несмотря на все достоинства аддитивных технологий, возможность их применения в точном приборостроении для изготовления готовых изделий пока представляется ограниченной. В ряде случаев требуются высокая точность и шероховатость деталей сложной геометрической формы. Формообразование таких изделий традиционными методами, как правило, осуществляется с использованием ЧПУ-станков, где готовая деталь получается «вычитанием» материала из массивной заготовки. При этом также расходуется большое количество как материала, так и времени. Можно считать, что АМ-технологии – это не противопоставление традиционной ЧПУ-обработке, а предложение новых возможностей для оптимизации затрат и повышения эффективности производства.

Применение аддитивных технологий позволяет вырастить заготовку, максимально приближенную к готовому изделию, а с помощью постобра-

ботки получить требуемую деталь. Общая схема формирования изделий с использованием такого подхода представлена на рис. 6.4.

Целесообразно использовать предложенный подход в случае, когда большую часть изделия можно получить с использованием аддитивных технологий, а применение традиционных методов, например, механической обработки, требуется лишь для доработки некоторых поверхностей. Тогда данный подход обеспечивает максимальную производительность и эффективность изготовления.

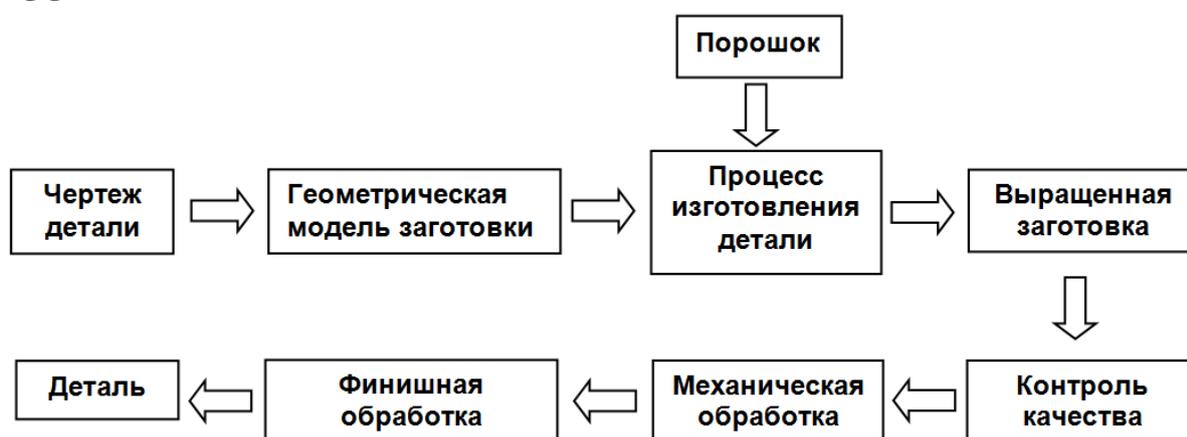


Рисунок 6.4. Схема процесса изготовления детали с применением аддитивных и традиционных технологий

Опираясь на вышеизложенные принципы, можно выделить следующие критерии отбора деталей для изготовления по аддитивным технологиям:

- количество «вычитаемого» материала из заготовки и трудоемкость его обработки (т.е. насколько экономически выгодно использовать аддитивную технологию);
- геометрическая сложность детали;
- уровень предъявляемых требований к деталям (т.е. есть ли смысл использовать аддитивные технологии при изготовлении готового изделия или заготовки).

Отдельно стоит отметить вопрос о проектировании изделий, выполняемых при помощи аддитивных технологий. На стадии разработки изделия необходимо предусмотреть возможность использования аддитивных технологий при изготовлении, что позволяет создавать конструкции нестандартной формы, однако обеспечивающие требуемые характеристики изделия, например прочность. Таким образом, можно обеспечить экономный расход материала, улучшенные массогабаритные характеристики и др.

По мнению специалистов и экспертов, аддитивные технологии – предвестник новой промышленной революции. В целом можно констатировать, что у аддитивных технологий есть своя ниша – делать то, что невозможно сделать традиционными технологиями.

ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 6

1. Что такое аддитивные технологии?
2. В чем заключается механизм формообразования изделий при использовании аддитивных технологий?
3. Какие типы аддитивных технологий вам известны?
4. Какие задачи могут решать аддитивные технологии в гиросприборостроении?
5. Приведите сравнительные характеристики деталей, полученных с использованием метода селективного лазерного спекания и технологии прямого лазерное выращивание.
6. Какие основные преимущества аддитивных технологий по сравнению с традиционными вы можете назвать?
7. Назовите критерии выбора изделий для их изготовления с использованием аддитивных технологий.
8. Какие точности изготовления деталей обеспечивают аддитивные технологии на сегодня?
9. Какие материалы преимущественно используются сегодня в аддитивных технологиях?
10. Какие традиционные технологические операции позволяют исключить применение аддитивных технологий?
11. Приведите схему процесса изготовления детали с применением аддитивных технологий.
12. В какой цифровой системе выполняются операции на всех стадиях реализации технологического цикла при использовании аддитивных технологий?
13. Требуется ли на сегодняшний день финишная обработка деталей после изготовления методом послойного наращивания?
14. В чем заключается эффективность совместного использования аддитивных и традиционных технологий?
15. Что определяет точность изделия при его создании методами послойного наращивания?
16. От чего зависит шероховатость изделий, получаемых методами послойного наращивания?
17. Назовите основные факторы, ограничивающие на сегодняшний день использование аддитивных технологий в точном приборостроении для изготовления готовых изделий.
18. Каковы перспективы развития и возможные области применения аддитивных технологий?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование технологии как составной части процесса создания объектов новой техники в сочетании с анализом реальных конструкций точного приборостроения позволяет наглядно представить, как на основе требований к изделию формируются требования к этапам его создания, устанавливаются взаимосвязь и взаимообусловленность конструкторских и технологических решений с определением структуры и содержания процесса технологического проектирования.

Можно отметить следующие особенности процесса создания современных гироскопических приборов, во многом определяющие конечный результат:

- согласованность и синхронность конструкторских этапов разработки узлов и элементов, с одной стороны, и процессов создания средств технологического обеспечения их изготовления, с другой, что объективно является одной из наиболее важных проблем;
- наличие устойчивых обратных связей между конструктивными особенностями деталей и узлов и прогрессивными технологическими решениями по их изготовлению, что в ряде случаев позволяет получить максимальную эффективность при решении конкретных задач;
- использование новейших достижений в области точной механики, материаловедения, неразъемных соединений, тонкопленочной технологии, ионно-плазменной и лазерной технологии с адаптацией этих достижений к условиям и специфике процесса создания узлов гироскопических приборов.

В пособии приводится ряд примеров использования специальных технологий, которые могут обеспечить принципиально новые возможности формирования функциональных параметров узлов гироскопических приборов. Это связано с повышением точности обработки до сотых долей микрометра, решением многокритериальных задач и устранением противоречий, присущих традиционным технологиям. В первую очередь это относится к ионно-плазменным и лазерным технологиям, которые можно отнести к нанотехнологиям, поскольку при обработке материалов и получаемой точности они оперируют величинами от единиц до десятков нано-

метров. Следует отметить, что наибольшая эффективность использования специальных технологий достигается при комбинированном использовании элементов этих технологий и традиционных методов обработки. Такой подход позволяет решать сложные задачи создания современных и перспективных гироскопических приборов с представлением процесса разработки технологии в виде системы, определяющей совокупность и последовательность элементов технологического проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Peshekhonov V.G.** Gyroscopic navigation systems: Current status and prospects // *Gyroscopy Navig.* 2011. V 2. N3. P. 111–124.
2. **Lawrence A.** *Modern Inertial Technology Navigation, Guidance, and Control.* Springer. 1998. 278 p.
3. **Turner G. J.** *Gyroscopes: An Introduction for Students, Engineers and Pilots.* Brightfusion Ltd. 2007. 200 p.
4. **Scarborough J. B.** *The Gyroscope Theory And Applications.* Interscience Publishers Inc. 1958. 285 p.
5. **Peshekhonov V.G.** Leaders of Russian gyroscopy // *Gyroscopy Navig.* 2014. N 5. P. 58.
6. **Мартыненко Ю.Г.** Тенденции развития современной гироскопии // *Соросовский образовательный журнал.* 1997. №11. С.120–127.
7. **Ишлинский А.Ю., Борзов В.И., Степаненко Н.П.** Лекции по теории гироскопов. М.: Изд-во МГУ, 1983. 248 с.
8. **Карасев В. В, Вовченко Н. В.** Эволюция гироскопа // *Научные труды Дальрыбвтуза.* 2009. № 1. С. 355–365
9. **Lawrence A.** *The Principles of Mechanical Gyroscopes.* In: *Modern Inertial Technology.* Springer, 1998, pp. 85–94.
10. **Матвеев А. С.** Разработка измерительно-вычислительного комплекса для создания эталонных координатных моделей железнодорожного пути.: дис. ... канд. техн. наук. Мос. гос. университет путей сообщения, Москва, 2005.
11. **Елкин Е.А.** Разработка и исследование оптико-электронной системы хранения направления в плоской системе координат.: дис. ... канд. техн. наук. Моск. гос. ун-т геодезии и картографии, Москва, 2009.
12. **Мешковский И.К., Стригалева В.Е., Дейнека Г.Б., Пешехонов В.Г. и др.** Трехосный волоконно-оптический гироскоп. Результаты разработки и предварительных испытаний // *Гироскопия и навигация.* 2009. № 3. С. 3–9.
13. **Dell'olio F. et al.** Recent advances in miniaturized optical gyroscopes // *Journal of the European Optical Society – Rapid publications, Europe,* v. 9, mar. 2014.

14. **Armenise, M.N., Ciminelli, C., Dell'Olio, F., Passaro, V.M.N.** Advances in Gyroscope Technologies. Springer. 2011. 260 P.
15. **Пешехонов В.Г.** Отечественный микромеханический гироскоп RR-типа. Современное состояние и перспективы /В.Г. Пешехонов [и др.] // Информационное противодействие угрозам терроризма. 2012. № 19. С.108–114.
16. **Everitt C.W.F. et all.** Gravity Probe B: Final results of a space experiment to test general relativity// Physical Review Letters. 2011. 10. P. 2216.
17. **Wesson P.S. and Anderson M.** The Gravity Probe B Bailout// IEEE Spectrum, 02.04.2009.
18. **Egorov A.V., Landau B.E., Levin S.L., Romanenko S.G.** Rotor motion in a strapdown electrostatic gyro onboard an orbiting spacecraft, Gyroscopy Navig. Springer. 2012. N3. P. 144–51.
19. **Золотаревский В.С.** Механические свойства металлов. М.: Metallurgy, 1983, 352 с.
20. **Sharma C.P.** Engineering materials: properties and applications of metals and alloys. PHI Learning Pvt. Ltd., 2003, 272 p.
21. **Прочность. Устойчивость. Надежность.** Справочник /под общ. ред. И.А.Биргера и Я.Г. Пановко, М.: Машиностроение, 1968, 832 с.
22. **Розенберг В.Н.** Ползучесть металлов. М.: Metallurgy, 1967, 276 с.
23. **Кайбышев О.А.** Пластичность и сверхпластичность материалов. М.: Metallurgy, 1975, 279 с.
24. **Гаврюсов В.И.** Размерная стабильность материалов и элементов конструкций. Л.: ЦНИИ «Румб», 1990. 113 с.
25. **Хенкин М.А., Локшин И.Х.** Размерная стабильность металлов и сплавов в точном машиностроении и приборостроении. М.: Машиностроение, 1974, 256 с.
26. **Беляев С.Н.** Исследование процессов прецизионного формообразования сферических элементов узлов гироскопов с использованием прогрессивных методов выполнения неразъемных соединений: дис. ... канд. техн. наук., СПб, 2009. 155 с.
27. **Папиров И.И., Тихинский Г.Ф.** Физическое металловедение бериллия, М.: Атомиздат, 1968, 452 с.
28. **Everest D.A.** The Chemistry of Beryllium. Elsevier, 1964, 151 p.
29. **Конструкционные материалы: Справочник** / Б.Н. Арзамасов, В.А. Брострем, Н.А. Буше и др. М.: Машиностроение, 1990, 688 с.
30. **Krauss G.** Steels. Processing, Structure, and Performance. ASM International. 2015. 651 p.
31. **Марочник сталей и сплавов** /Сорокин В.Г., Волосникова А.В., Вяткин С.А. и др. под общ. ред. В.Г.Сорокина. М.: Машиностроение, 1989, 640 с.
32. **Bhadeshia H., Honeycombe R.** Steels: Microstructure and Properties. Elsevier. 2006. 360 p.

33. **Соловьева Н.А., Сольц В.Н., Юдкович М.И., и др.** Прецизионные сплавы с особыми свойствами теплового расширения и упругости. М.: Металлургиздат, 1963
34. **Инженерия поверхности деталей** / Колл. авт.; под ред. А.Г. Сулова. М.: Машиностроение. 2008. 320 с.: ил.
35. **Ковальчук С.Н.** Технология машиностроения [Электронный ресурс] : учеб. пособие – Электрон. дан. – Кемерово : КузГТУ имени Т.Ф. Горбачева, 2015. 128 с.
36. **Багров Н.М.** Экономические основы технологического развития : учеб. пособие / Н.М. Багров, Г.А. Трофимов, Д.Ф. Счастливцев. – Электрон. дан. – Санкт-Петербург: ИЭО СПбУТУиЭ, 2011. – 338 с.
37. **Соболев С.Ф., Кузьмин Ю.П.** Методические указания по разработке технологических процессов изготовления деталей механической обработкой. СПб : СПбГУ ИТМО, 2007. 118с.
38. **Kalpakjian S.** Mechanical Processing of Materials. Van Nostrand Reinhold Inc. 1967. 363 p.
39. **Технология машиностроения.** Практикум [Электронный ресурс] : учеб. пособие под ред. Жолобова А.А. – Электрон. дан. – Минск: Высшая школа, 2015. – 335 с.
40. **Тимирязев В.А.** Проектирование технологических процессов машиностроительных производств. [Электронный ресурс] / В.А. Тимирязев, А.Г. Схиртладзе, Н.П. Солнышкин, С.И. Дмитриев. – Электрон. дан. – СПб : Лань, 2014. – 384 с.
41. **Юльметова О.С., Валетов В.А., Щербак А.Г.** Применение пучковых технологий при изготовлении узлов гироскопических приборов // Известия вузов. Приборостроение. № 4. 2015. С. 308–311.
42. **Anders A.** Handbook of Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition. Wiley-VCH. 2000. 672 p.
43. **Панфилов Ю.В.** Электронные, ионные и плазменные технологии. Часть 1. Конспект лекций // Наноинженерия. 2012. №4. С.14-27.
44. **Pauleau Y.** Chemical Physics of Thin Film Deposition Processes for Micro- and Nano-Technologies. Springer. 2002. 280 p.
45. **Осипов А. В.** Научное и технологическое обеспечение нанесения упорочняющих наноразмерных тонкопленочных покрытий для изделий электронной техники.: дис. ... канд. техн. наук, Москва, 2004. – 170 с.
46. **Seshan K.** Handbook of Thin Film Deposition. Elsevier. 2012. 408 p.
47. **Семенова С. Э.** Автоматизация непрерывного фотометрического контроля скорости осаждения и травления тонких диэлектрических пленок.: дис. ... канд. техн. наук, Рыбинск, 2003. – 166 с.
48. **Сухова Н.А.** Технология ионно-плазменного осаждения и термической обработки многослойных покрытий системы Ti-C-Si применительно к деталям энергетических установок.: дис. ... канд. техн. наук, Уфа, 2005. – 165 с.

49. **Smith Donald L.** Thin-Film Deposition: Principles and Practice. McGraw-Hill .1995. 616 p.
50. **Фомичев А.М., О.С. Юльметова О.С., Новиков В.И. и др.** Разработка средств математического обеспечения процесса формирования тонкопленочных покрытий на роторах шаровых гироскопов // Металлообработка. № 2. 2015. С. 33–38.
51. **Технология конструкционных материалов:** Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / А.М . Дальский, Т.М. Барсукова, Л.Н. Бухаркин и др.; Под ред. А.М . Дальского. 5-е изд., исправленное. - М.: Машиностроение, 2004. 512 с.
52. **Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д.** Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Часть I. Поглощение лазерного излучения в твердых телах. Под общей редакцией Вейко В.П. Учебное пособие. Издание второе, переработанное и дополненное.– СПб: Университет ИТМО, 2015. – 130 с
53. **Schaaf P.** Laser Processing of Materials. Fundamentals, Applications and Developments. Springer. 2010. 225 p.
54. **Патент 2592748.** Российская Федерация, МПК G01C25/00. Способ изготовления ротора электростатического гироскопа / О.С. Юльметова, Б.Е. Ландау, А.Г. Щербак и др; патентообладатель АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». опубл. 27.07.2016.
55. **Юльметова О.С., Вейко В.П., Щербак А.Г. и др.** Управление контрастностью растрового рисунка при лазерной маркировке: Моделирование технологического процесса.// Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2015. №6. С. 157–166.
56. **Лашко С.В., Лашко Н.Ф.** Пайка металлов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1988. 376 с.
57. **Manko H. H.** Solders and Soldering. McGraw Hill Professional. 2001. 576 p.
58. **Петрунин И.Е., Лоцманов С.И., Николаев Г.А.** Пайка металлов. М.: Машиностроение, 1973. 280 с.
59. **Специальные методы сварки и пайка:** конспект лекций / Л. А. Шестель. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. 68 с.
60. **Кейгл Ч.** Клеевые соединения, Издательство: Мир, 1971. 296 с.
61. **Adams R.D., Comyn J., Wake W.C.** Structural Adhesive Joints in Engineering. Springer 1997. 360 p.
62. **Jeffus L.** Welding: Principles and Applications. Delmar Cengage Learning, 2011, 370 p.
63. **Моисеенко В.П.** Материалы и их поведение при сварке. Учебное пособие, Ростов на/Д.: Изд. Феникс, 2009. 300 с.
64. **Сварка и свариваемые материалы:** В 3-хт. Т 2. Технология и оборудование. Справочное издание /Под. ред. В.М. Ямпольского. М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 1998. 574 с.

65. **Электронно-лучевая сварка**/О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, С. Н. Ковбасенко и др./Под ред. Б. Е. Патона. Киев: Наукова думка, 1987. 256 с.
66. **Schultz H.** Electron Beam welding. 1993. Woodhead Publishing. 232 p.
67. **Электронно-лучевая, лазерная и ионно-лучевая обработка материалов:** учеб. пособие / В.Я.Беленький, В.М.Язовских. Пермь : [б. и.], 1995. 75 с.
68. **Малашенко А.А., Мезенов А.В.** Лазерная сварка металлов. М.: Машиностроение, 1984. 46 с.
69. **Katayama S.** Handbook of Laser Welding Technologies. Woodhead Publishing. 2013. 654 p.
70. **Технология и оборудование контактной сварки.** Учебное пособие / Под. ред. В.Д. Орлова. М.: Машиностроение, 1986. 325с.
71. **Беляев С.Н.** Математическое моделирование процессов деформирования и технологические особенности диффузионной сварки прецизионных конструкций с использованием давления термического натяга // Вопросы материаловедения. 2013. №2. С.93–99.
72. **Технология прецизионной диффузионной сварки в точном приборостроении** / А.Г. Щербак, В.Г. Кедров; Гос. науч. центр РФ-ЦНИИ Электроприбор. СПб., 1997. 271 с.
73. **Щербак А.Г., Кедров В.Г.** Управление термомеханическими параметрами процесса прецизионной диффузионной сварки узлов гироскопов. Гироскопия и навигация. 1995. №1. С.83.
74. **Диффузионная сварка материалов.** - Справочник под ред. Казакова Н.Ф. М.: Машиностроение, 1981. 271 с.
75. **Казаков Н.Ф.** Диффузионная сварка материалов. М.: Машиностроение, 1976. 312 с.
76. **Yang L. et al.** Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production. Springer, 2017. 315 p.
77. **Gibson I., Rosen D.W., Stucker B.** Additive Manufacturing Technologies. Springer, 2010. 460 p.

Миссия университета – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.



КАФЕДРА ИНФОРМАЦИОННО-НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Кафедра «Информационно-навигационные системы» является одной из старейших в университете.

В 30-е гг. XX века отечественная промышленность приступила к созданию новых навигационных приборов – гирокомпасов, лагов, эхолотов. В связи с этим в 1934 г. рядом предприятий и организаций было внесено предложение во Всесоюзный совет народного хозяйства (ВСНХ) СССР о подготовке необходимых инженерных кадров. В сентябре 1937 г. была создана кафедра навигационных приборов. С 1937/38 учебного года на кафедре была начата подготовка специалистов.

В разработке профиля кафедры принимали участие видные ученые и специалисты промышленности и флота страны, в том числе академик А.Н. Крылов, профессора Б.И. Кудревич и К.С. Ухов, доцент Д.Н. Иконников, инженеры М.М. Блюк, М.А. Шиф и многие другие.

Первым заведующим кафедрой стал профессор Л.П. Шишелов, занимавший в то время должность декана факультета «А» (точной механики).

В том же 1937 г. на кафедре организована лаборатория, заведующим которой был назначен П.А. Ильин. Он окончил ЛИТМО в 1931 г. в числе первых выпускников и, приобретя опыт работы на производстве, в 1936 г. поступил в аспирантуру. С этого момента вся его деятельность была связана с кафедрой и направлена на совершенствование учебного процесса. Благодаря его активной деятельности и связям с промышленностью лаборатория была оснащена современными на тот период навигационными приборами, а учебный процесс обеспечен необходимыми учебными пособиями. В 1940 г. состоялся первый выпуск инженеров по навигационным приборам.

Во время Великой Отечественной войны в период блокады Ленинграда на время эвакуации ЛИТМО лабораторное оборудование кафедры оставалось в осажденном городе и было сохранено. Поэтому практически сразу

после реэвакуации института в 1944 г. на кафедре были возобновлены занятия.

С 1945 г. по 1962 г. кафедрой возглавлял крупный ученый в области навигации, гидрографии, штурманских приборов, доктор технических наук, профессор К.С. Ухов, который при поддержке профессора Б.И. Кудревича основал научно-педагогическую школу «Навигационные приборы». При нем в 1956 г. в связи с изменением номенклатуры специальностей кафедра была переименована в кафедру гироскопических и навигационных приборов. Чтобы удовлетворить потребности промышленности, в эти годы на кафедре обучалось от 4 до 5 групп студентов, включая группы вечернего образования.

С 1963 г. по 1970 г. кафедрой заведует (по совместительству) главный инженер Ленинградского научно-производственного объединения «Азимут», лауреат Ленинской премии, доктор технических наук, профессор С.Ф. Фармаковский. В этот период коллектив кафедры значительно укрепил и расширил связи с промышленностью. В гироскопическом приборостроении получают развитие газовые опоры как в осях подвеса, так и в качестве главных опор ротора гироскопа. На кафедре гироскопических и навигационных приборов разрабатываются теоретические основы расчета и проектирования газодинамических подшипников. Результаты использованы в НПО «Азимут» и других организациях.

Во второй половине 60-х гг. под руководством профессора П.А. Ильина разворачиваются работы по исследованию и разработке лазерных гироскопов. Для проведения работ по договорам с Московским институтом электроавтоматики при кафедре в 1966 г. создается отраслевая лаборатория квантовой гиromетрии под научным руководством с.н.с. Г.М. Кузнецова.

В 1969 г. в издательстве «Машиностроение» публикуется монография д.т.н., профессора М.А. Сергеева «Наземные гирокомпасы». В 1970 г. он избирается по конкурсу заведующим кафедрой и руководит ею до 1982 г. В промышленности ведутся работы по созданию космических летательных аппаратов, сверхзвуковых самолетов, атомных подводных лодок, межконтинентальных ракет. В этих условиях кафедра расширяет профиль подготовки специалистов и в 1973 г. переименовывается в кафедру бортовых приборов управления.

С 1982 г. по 1991 г. кафедрой возглавляет профессор В.А. Каракашев, создавший совместно со своими учениками О.Н. Анучиным и Г.И. Емельянцевым (впоследствии доктора наук) научно-педагогическую школу «Инерциальные навигационные системы». На кафедре разрабатываются новые учебные планы, совершенствуется преподавание дисциплин, большое внимание уделяется внедрению в учебный процесс вычислительной техники. Преподаватели кафедры проходят переподготовку и повышение квалификации в области вычислительной техники. На кафедре ведутся научно-исследовательские работы совместно и по заказам навига-

онно-гидрографического института, ЦНИИ «Электроприбор», завода «Баррикада» в Волгограде.

С 1991 г. кафедру возглавляет директор ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор» (в настоящее время АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»»), лауреат Ленинской и Государственной премий, в то время член-корреспондент, впоследствии академик РАН В.Г. Пешехонов. Под руководством В.Г. Пешехонова кафедра ориентируется на подготовку специалистов в области создания приборов и систем, измеряющих перемещения, скорости и ускорения морских подвижных объектов и образующих интегрированные навигационно-управляющие комплексы судов и кораблей различного назначения, а также комплексы пространственной ориентации и стабилизации информационно-измерительной аппаратуры на их борту. В соответствии с произошедшими изменениями в научной и педагогической деятельности кафедры в апреле 2003 г. кафедра получила свое современное наименование – она была переименована в кафедру информационно-навигационных систем.

По инициативе академика В.Г. Пешехонова, начиная с 2004/05 учебного года, студенты и преподаватели кафедры активно включаются в межвузовскую программу интенсивной подготовки специалистов, которая реализуется на базе ЦНИИ «Электроприбор». С этой целью между ЦНИИ «Электроприбор» и тремя ведущими университетами города (СПб ГЭТУ «ЛЭТИ», СПбГУ ИТМО и СПб ГУАП) заключается и успешно реализуется соглашение о межвузовской углубленной подготовке инженерных кадров и проведении совместных научных исследований в области навигации на базе ЦНИИ «Электроприбор». В сентябре 2008 г. кафедра преобразуется в базовую при ЦНИИ «Электроприбор».

За работы в области объединения усилий вузов при подготовке специалистов коллективу, в состав которого вошли профессора СПб ГЭТУ «ЛЭТИ» Ю.В. Филатов и Ю.А. Лукомский, а также д.т.н. О.А. Степанов (ЦНИИ «Электроприбор»), в 2010 г. присуждается премия Правительства Санкт-Петербурга «За выдающиеся достижения в области высшего и среднего профессионального образования за 2010 г.» в области интеграции образования, науки и промышленности.

Укрепляется международное сотрудничество, в частности с международной общественной организацией «Академия навигации и управления движением», учрежденной в 1995 г. как общественное объединение ведущих ученых в области навигации и управления движением и в настоящее время насчитывающей более 400 членов, работающих в различных университетах и организациях десяти стран (России, Украины, Германии, США, Франции, Китая, Южной Кореи, Белоруссии, Турции, Индии). Ведущие профессора кафедры читают лекции в Китае и Финляндии, активно выступают с докладами на авторитетных международных и российских конференциях.

В 2011 г. в ЦНИИ «Электроприбор» открывается новый комплекс учебных помещений, включающий лабораторию, компьютерный класс и зону отдыха для студентов. Лаборатория, оснащенная современным оборудованием для проведения лабораторных работ, фактически является центром коллективного пользования для ведущих вузов города, готовящих специалистов в области навигации и управления.

В 2012 г. кафедра информационно-навигационных систем отметила свой 75-летний юбилей.

В настоящее время кафедра активно участвует в реализации Программы повышения конкурентоспособности Университета ИТМО, в частности, в 2014 г. в рамках открытого конкурса создана международная научная лаборатория «Интегрированные системы ориентации и навигации» (руководители: Степанов О.А. – профессор, д.т.н., заместитель заведующего кафедрой; Троммер Г.Ф. – профессор, директор Института оптимизации систем Технологического университета Карлсруэ (Германия). Ее сотрудники проводят исследования по различным направлениям, связанным с научной тематикой кафедры. За последнее время выполнены работы в рамках семи грантов, поддержанных Российским фондом фундаментальных исследований, и работы по крупному проекту, поддержанному Российским научным фондом, на тему «Решение проблемы высокоточных измерений гравитационного поля в труднодоступных районах Земли с подвижных объектов». В 2014–2016 гг. по результатам научных исследований опубликовано значительное количество печатных работ, в том числе более 120 публикаций, рецензируемых в базах Scopus и Web of Science.

В настоящее время на кафедре созданы все необходимые условия для освоения важной профессии, связанной с созданием информационно-навигационных систем, и проведением в этой области научных исследований на современном уровне.

Юльметова Ольга Сергеевна
Щербак Александр Григорьевич
Челпанов Игорь Борисович

Под редакцией
Вячеслава Алексеевича Валетова

**СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ПРЕЦИЗИОННЫХ УЗЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ
ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ**

Учебное пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе