НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ

ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ

«Ракетные двигатели»

кафедры «Ракетные двигатели»

МГТУ им. Н.Э.Баумана

Ответственный: зав. кафедрой, д.т.н., профессор Ягодников Дмитрий Алексеевич

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторного практикума по

Школе-лаборатории

кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э.Баумана

ИСПЫТАНИЕ МОДЕЛЬНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ

Москва 2012

ЯГОДНИКОВ Д.А., Антонов Ю.В., АНИКЕЕВ В.М. Испытание модельного ракетного двигателя на твердом топливе: Методические указания к выполнению лабораторного практикума по Школе-лаборатории кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э.Баумана «Испытание модельного ракетного двигателя на твердом топливе». – М.:Кафедра “Ракетные двигатели” МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012.- 16 с.

В лабораторной работе исследуются внутрикамерные и динамические характеристики ракетного двигателя на твердом топливе (РДТТ) малой тяги, а также выполняется градуировка датчиков с использованием автоматизированной системы сбора и обработки информации на ЭВМ.

Методические указания имеют целью помочь школьникам усвоить физические основы рабочего процесса в камере сгорания РДТТ, овладеть навыками и освоить методику проведения физического эксперимента с автоматизированной регистрацией давления на ЭВМ.

Для обучающихся в общеобразовательных учреждениях в рамках исполнения обязательств МГТУ им. Н.Э. Баумана по техническому заданию Соглашения с Департаментом образования города Москвы о социальном обслуживании населения города Москвы в части предоставления образовательных услуг в интересах города Москвы.

Табл. . Ил. . Библиогр. Назв.

УДК 621.455

ОГЛАВЛЕНИЕ

	с
Ведение	3
1. Измерение давлений потенциометрическим методом	5
2. Описание конструкции модельного РДТТ	7
3. Градуировка первичных преобразователей	12
4. Проведение эксперимента	13
5. Содержание отчета	15
6. Контрольные вопросы	15
Литература	16

Введение

Для ознакомления с основами техники реактивного движения кафедры «Ракетные двигатели» предлагает лабораторный практикум, позволяющий понять, как устроены и основные принципы работы одной из совершеннейших машин, созданных человечеством - ракетных двигателей: жидкостных, твердотопливных, ядерных, гибридных, комбинированных, гиперзвуковых, гидрореактивных.

Для получения качественной картины рабочих процессов, протекающих в ракетном двигателе и в агрегатах двигательной установки, и количественной зависимости между параметрами этих процессов используется комплекс измерительных средств и устройств, называемый системой измерений (СИ).

К системам измерений предъявляются следующие основные требования.

1. Высокая точность измерений: относительная погрешность измерения параметров в ряде случаев не должна превышать 0,1 — 0,15%.

2. Высокая надежность измерительной аппаратуры. Требование высокой надежности диктуется тем, что потеря информации может привести к невыполнению задач, поставленных перед испытанием, что недопустимо в силу ограниченного их числа и высокой стоимости.

3. Создание автоматизированных комплексов регистрации и обработки регистрации и обработки результатов экспериментов на основе ЭВМ.

4. Многоканальность системы измерения. При огневых испытаниях крупных РДТТ количество измерительных каналов может достигать 400.

5. Автоматизация процесса управления измерительной аппаратурой.

6. Дистанционность измерений. Это требование обусловливается необходимостью создания безопасных условий для обслуживающего персонала.

В предлагаемом лабораторном практикуме работа РДДТ оценивается по стабильности давления в камере сгорания.

Цель и задачи лабораторного практикума

Лабораторный практикум имеет своей целью помочь школьникам в рамках программы общеобразовательного предмета физики усвоить физические основы измерения давления, рабочего процесса РДТТ, ознакомиться с конструкцией и отдельными элементами модельной камеры, освоить методику градуировки первичных преобразователей, проведения эксперимента и компьютерной обработки получаемых при этом результатов, а также определять основные характеристики внутренней баллистики РДТТ.

Основные задачи лабораторного практикума заключаются в следующем.

1. Усвоить физические основы измерения давления.
2. Провести градуировку датчика давления.
3. Изучить основные термины, определения и схему РДТТ.
4. Экспериментально исследовать внутрикамерные и динамические характеристики модельного РДТТ (давление в камере сгорания, время выхода на режим, время работы на основном режиме, время останова).

1. Измерение давлений потенциометрическим методом

Давление является основным параметром, отражающим характер процессов, протекающих в камере сгорания РДТТ, в агрегатах двигательной установки и в стендовых устройствах.

Измерение давлений в настоящее время производится, в основном, электрическими методами. Общим для всех применяемых методов является то, что воздействие давления вызывает деформацию чувствительного элемента, которая преобразуется в электрический сигнал либо путем изменения параметров электрической цепи: омического сопротивления, индуктивности, емкости, частоты переменного тока, либо путем генерирования энергии. В настоящее время широкое распространение получили методы, основанные на изменении омического сопротивления (тензорезисторный и

потенциометрический), частоты переменного тока (частотные), на использовании прямого пьезоэлектрического эффекта (пьезоэлектрические).

Этот метод предусматривает использование измерительных преобразователей, в которых вырабатывается электрический сигнал, пропорциональный измеряемому давлению, при изменении выходного сопротивления в цепи потенциометра. Потенциометрические измерительные преобразователи разнообразны по конструктивному оформлению. На рисунке 1 приведен внешний вид потенциометрического датчика давления типа МД. В качестве чувствительного элемента используются мембраны, витые трубки, сильфоны, анероидные коробки и т. д.

На рис. 2 показана кинематическая схема преобразователя давления с мембранным чувствительным элементом. В нем давление через штуцер *1* воспринимается мембраной *2.* Деформация мембраны через шток *3,* качалку *8* передается на поводок *6,* на котором закреплен скользящий контакт (щетка) 5. При изменении давления щетка скользит по потенциометру *4.* Каждому значению давления соответствует определенное положение скользящего контакта на потенциометре. Обратный ход подвижных элементов преобразователя осуществляется возвратной пружиной *7.*

Основное достоинство потенциометрических преобразователей заключается в простоте схемы, не требующей усилительной аппаратуры. К недостаткам этих преобразователей следует отнести чувствительность к вибрациям и ударам, ограниченный частотный диапазон, недостаточную стабильность градуировочных характеристик. Потенциометрические преобразователи в зависимости от их конструкции могут использоваться для измерения как избыточных, так и абсолютных давлений, в частности вакуум-метрического давления в зоне имитатора высотных условий. Отметим также, что потенциометрические датчики давления типа МД применяются в условиях космического пространства.

2. Описание конструкции модельного РДТТ

Ракетным двигателем на твердом топливе (РДТТ) называется двигатель

прямой реакции, в котором химическая энергия твердого топлива преобразуется сначала в тепловую, а затем в кинетическую энергию продуктов сгорания, отбрасываемых с высокой скоростью в окружающее пространство. Основными достоинствами РДТТ являются простота конструкции и эксплуатации, постоянная готовность к действию, высокая надежность, благодаря чему РДТТ нашли широкое применение в реактивных системах залпового огня, в разгонных и маршевых блоках крылатых ракет, в ракетах классов «воздух-воздух», «воздух-земля», «земля-земля», «земля-воздух» и др., в противотанковых управляемых и неуправляемых ракетах, в системах аварийного спасения, разделения ступеней, в качестве пороховых аккумуляторов давления, в пусковых газогенераторах и т.д. Так как в последнее время остро стоит вопрос об утилизации твердого топлива, то можно выделить ряд конверсионных задач, например, использование твердого топлива для обогрева помещений или получения электроэнергии, использование РДТТ в системах автоматизированного пожаротушения и т.д.

Объектом исследования в данной работе является модельный ракетный двигатель (МРД) на твердом топливе малой тяги типа МРД-10, МРД-20 (суммарный импульс тяги составляет примерно 10 и 20 Н·с соответственно) с зарядами торцевого горения, которые изготовляются из прессованного дымного ружейного пороха, выпускаются серийно для ракетомодельного спорта. Выбор именно такого типа заряда и типа топлива обусловлен простотой конструкции, малыми размерами и массой заряда, постоянством площади поверхности горения, высокой степенью надежности МРД, что продиктовано требованиями безопасности работы. Кроме того, на данной установке возможно проведение экспериментов на промышленных твердотопливных составах класса 4.1, не подлежащих специальному хранению.

Электрическая схема лабораторной установки обеспечивает проведение подготовительных предпусковых операций, запуск, работу и останов РДТТ. Подготовка РДТТ к пуску заключается в сборке камеры

сгорания, установке заряда и воспламенителя, креплении снаряженного РДТТ на стапель, подсоединении первичных преобразователей и регистрирующей аппаратуры, проверке готовности к пуску, а также запуск на ЭВМ программ записи и первичной обработки результатов эксперимента.

Основными структурными элементами лабораторной установки являются модельный рабочий участок и система автоматизированной регистрации и обработки результатов экспериментов на основе программного комплекса «ПИРС», позволяющая следующее.

1. Измерять давление и температуру в камере сгорания в процессе проведения эксперимента.
2. Определять основные временные характеристики процессов запуска, работы на расчетном режиме и останова МРД.
3. Визуализировать внутрикамерные процессы через прозрачный элемент конструкции и записывать изображение на видеомагнитофон или скоростную кинокамеру.
4. Регистрировать акустические колебания, генерируемые МРД в процессе испытания.
5. Регистрировать и обрабатывать полученную информацию с помощью ЭВМ.

Первичными регистраторами рабочих параметров стенда являются: датчик давления и термопара в камере сгорания, силоизмерительное устройство, акустический микрофон, установленный в видеокамеру или специально приобретаемый.

Структурная схема автоматической системы измерения и регистрации лабораторной установки изображена на рис. 2. Сигнал с первичных преобразователей 4, 5, 6, 12 регистрируется и обрабатывается с помощью средств микропроцессорной и вычислительной техники. Практическая реализация аппаратно-программного комплекса осуществляется при помощи компьютера типа Pentium (1), платы (2) устройства сопряжения с объектом на базе 16-ти канального модуля MIC-300 и платы линейного видеомонтажа (14)

типа Miro DC10+ или цифровой видеокамеры- любительской или профессиональной, например, скоростной видеокамеры «Видеоспринт».

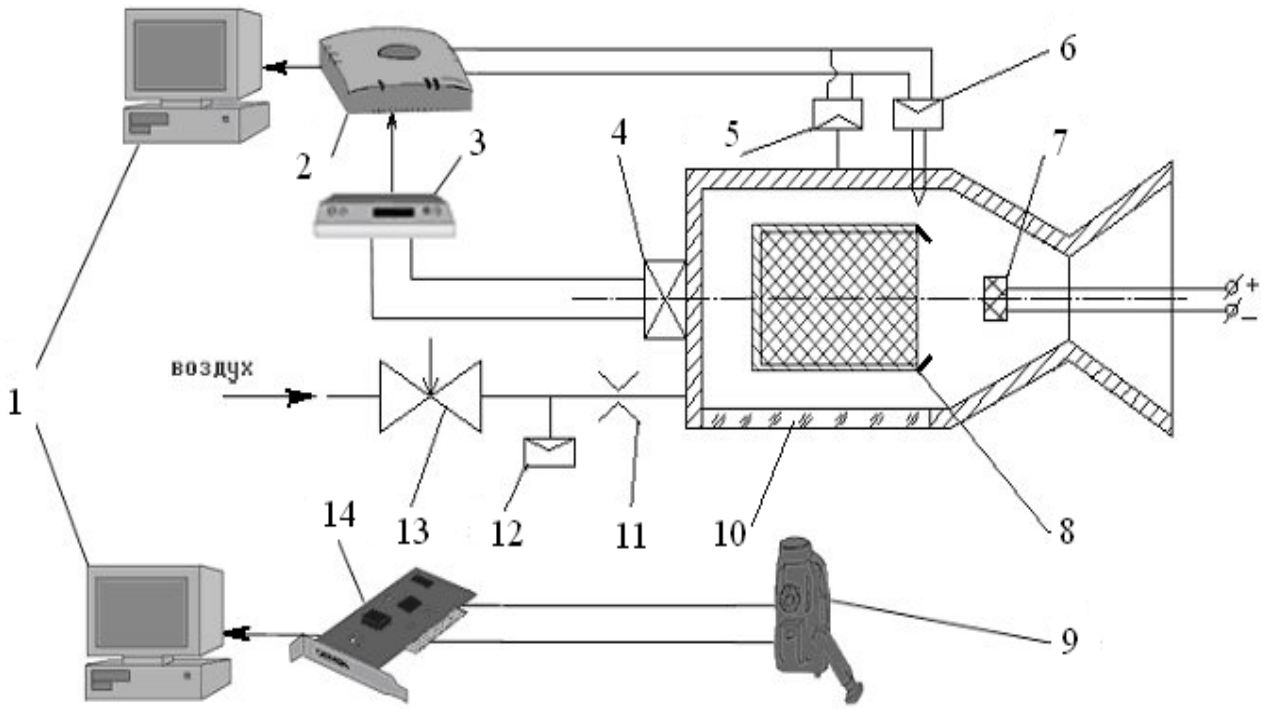

Рисунок 2- Структурная схема системы регистрации

1 –ЭВМ; 2- плата сопряжения с объектом модуля МІС-300; 3 - усилитель сигнала; 4 - датчик усилия; 5, 12- датчики давления; 6 – термопара; 7 – воспламенитель; 8- МРД; 9- видеокамера; 10- прозрачный элемент; 11- мерная шайба; 13- вентиль-дозатор подачи воздуха для обдува прозрачного окна; 14 – плата видеомонтажа

Устройство модельной камеры схематично показано на рис. 3. Внутри корпуса (*1)* размещается образец исследуемого заряда (*2)*. К фланцу (4) корпуса камеры болтами крепится сопловое днище (*5)* со сменным вставным соплом (*6)*, диаметр критического сечения которого составляет 3 мм. Во

время опыта замер давления производится через штуцер (*7)* датчиком типа МД-60, а температуры – через штуцер (*8)* термопарой типа ВР5 / ВР20 . Для визуального наблюдения и записи на видеокамеру процесса горения образца топлива в боковой стенке корпуса предусмотрено прозрачное окно (*9)* из оргстекла (полиметилметакрилата). Для защиты окна от эрозионного и теплового воздействия продуктов сгорания топлива служит защитная вставка (*10)* из оргстекла, продукты разложения которого сдуваются воздухом, поступающим через щель (*11)*. Подача воздуха в камеру осуществляется через штуцер (*12)*. Образец топлива поджигается нихромовой проволокой (*13)* с использованием навески из дымного ружейного пороха (1,5 г), закрепляемых на торцевой поверхности заряда.

Корпус модельной камеры имеет форму цилиндра с внутренним диаметром 22 мм и толщиной стенки 10 мм, выполнен из нержавеющей стали 10Х18Н10Т и рассчитан на давление 10 МПа. Для избежания разрушения модельной камеры в случае повышения давления предусмотрен предохранительный клапан (*14),* состоящий из корпуса, подвижного ножа и прорывной мембраны. Смотровое окно (10) имеет ширину 8 мм, длину 80 мм.

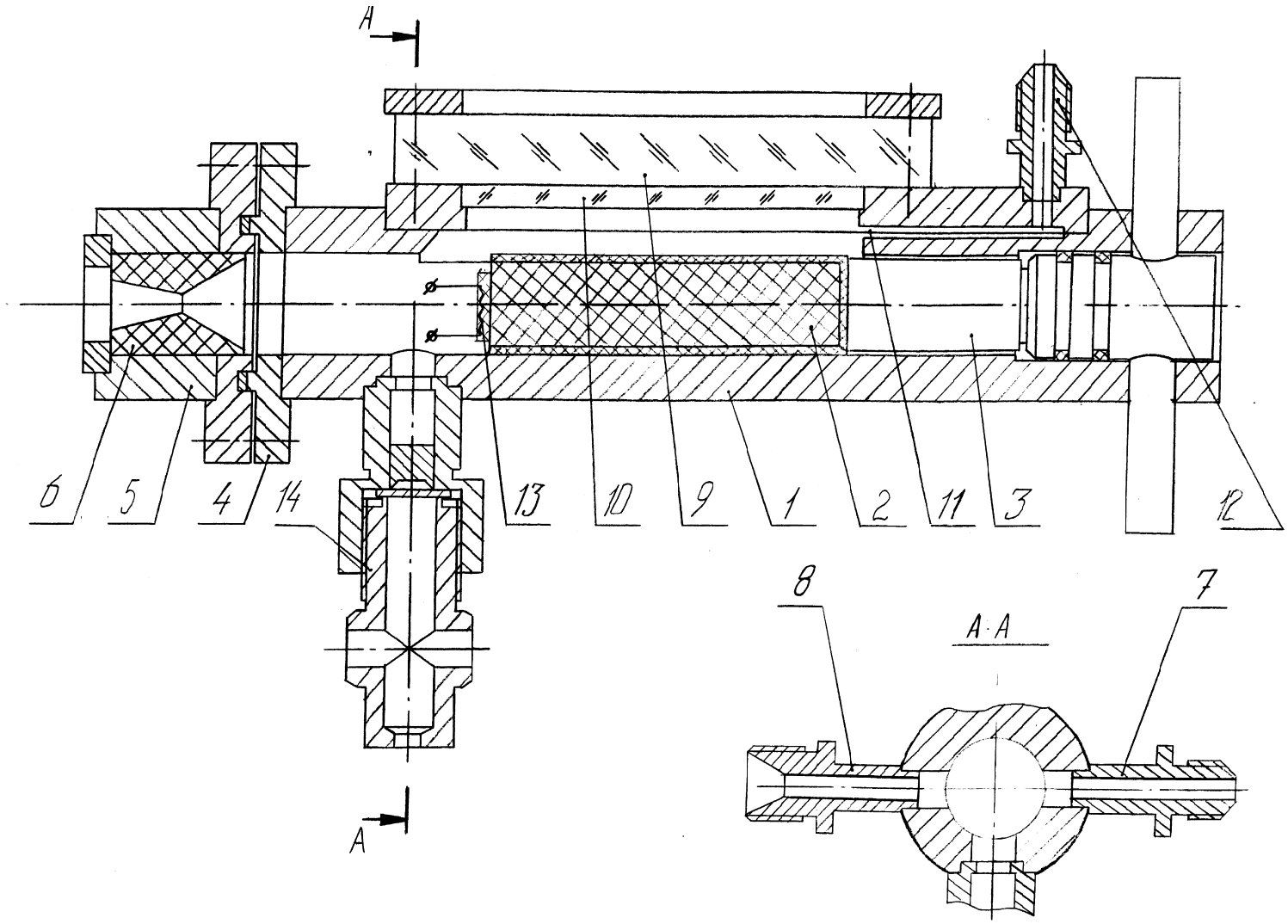

Рис. 3. Устройство модельной камеры.

1. Корпус. 2. Заряд твердого топлива. 3. Байонетный затвор. 4. Фланец. 5. Сопловое днище. 6. Сопловой вкладыш. 7. Штуцер датчика давления. 8.Штуцер датчика температуры. 9. Прозрачное окно. 10. Защитный вкладыш.

11. Щель подачи воздуха в камеру.

В данной лабораторной работе проводится градуировка датчика давления типа МД-60, который используется для определения давления в камере сгорания. Индекс 60 соответствует наибольшему давлению, которое может регистрировать данный датчик.

Порядок градуировки заключается в следующем.

1. Отстыковать датчик давления от магистрали замера давления в КС и подсоединить его к магистрали масляного пресса. На прессе установлен образцовый манометр с пределом измерения 100 Ати.

Используемые в технике манометры показывают избыточное давление, которое характеризует превышения давления в каком-либо герметичном устройстве по отношению к давлению атмосферы на уровне моря, которое можно принять равным 1 атмосфере (обозначается 1 Ата). С учетом этого, значение избыточного давления $p_{изб}$, зарегистрированного манометром легко пересчитать в абсолютное $p_{абс}$:

$p_{абс} = p_{изб} + 1$.

Заметим, что в международной системе единиц СИ давление измеряется в Папскалях (Па). Связь атмосферы и Паскаля производится следующим образом:

1 Ати = 98066,5 Па.

2. Включить источник питания постоянного напряжения 5 В, к которому подключен датчик.

3. Выполнить загрузку программы «Mic-300», выбрать в главном меню режим «Градуировка».

4. Записать начальное показание (значение напряжения) на канале датчика давления.

5. С помощью масляного пресса нагрузить датчик до давления (не более 60 Ати), значение которого контролируется по образцовому манометру.

6. Для каждого значения давления записать значение напряжения и заполнить таблицу. Результаты калибровки приведены в таблице 1 и на рисунке 2.

Таблица 1- Результаты градуировки датчика давления

Деления манометра	Давление избыточное, Ати	Давление абсолютное, МПа	Показания датчика, В
0	0	0,0981	0,61
5	12,5	1,32435	0,82
10	25	2,5506	1,19
15	37,5	3,77685	1,66
20	50	5,0031	2,19
0	0	0,0981	0,61

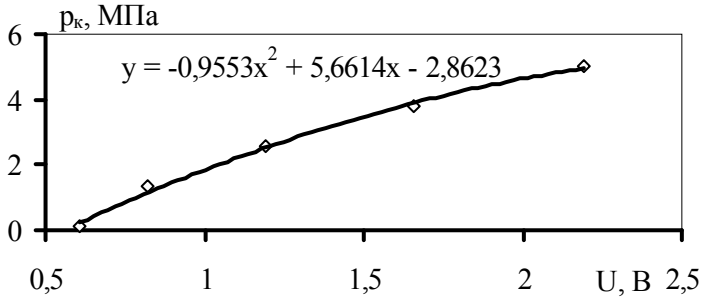

Рисунок 2. Результаты градуировки датчика давления

4. Проведение эксперимента

Исследование внутрибаллистических характеристик модельной камеры РДТТ проводится с использованием заряда микроракетного двигателя типа МРД 20-10 или МРД 10-10. Подготовка эксперимента состоит в сборе камеры сгорания, снаряжении заряда МРД воспламенителем, установке снаряженного МРД в корпус камеры сгорания. После этого настраивается видеокамера на объект регистрации.

Циклограмму пуска можно представить в виде следующей

последовательности команд: подается команда на отсчет, включаются шлейфовый осциллограф (режим протяжки), видеокамера, подается сигнал начала регистрации на ЭВМ, включается тумблер «Пуск», замыкающий электрическую цепь системы воспламенения. После окончания испытания необходимо выключить видеокамеру, шлейфовый осциллограф и проявить под лампой дневного света осциллограмму. Запись результатов пуска на ЭВМ прекращается автоматически.

После этого следует приступить к обработке результатов эксперимента, например, с мспользованием электронных таблиц Excell. Необходимо также записать файл с результатами на флеш-накопитель. На рисунке 3 представлены результаты компьютерной обработки получаемой в эксперименте информации в виде зависимости давления в камере сгорания от времени.

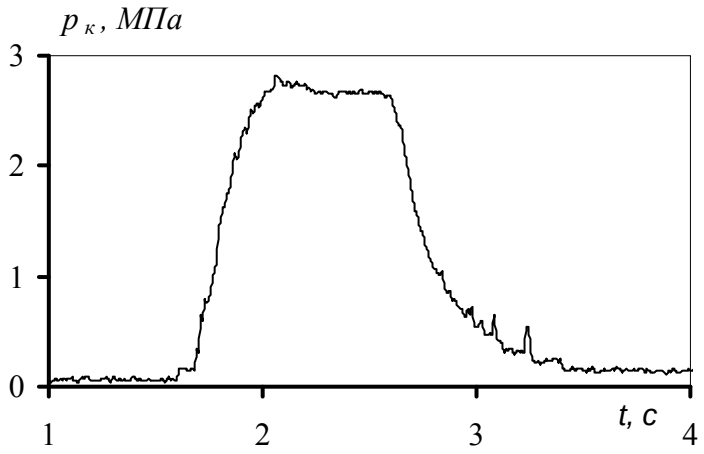

Рисунок 3- Осциллограмма пуска

Одними из основных динамических характеристик РДТТ являются время достижения 90% значения $p_к$- $\tau_{0,9}$ и время $\tau_{0,1}$, прошедшее с момента полного выгорания заряда до значения момента, когда $p_к = 0,1\ p_к^{ном}$. В заключении по осциллограмме пуска следует определить максимальное давление, а также времена выхода на режим $\tau_{0,9}$ и останова $\tau_{0,1}$.

5. Содержание отчета

Отчет по лабораторному практикуму представляется на отдельных

листах и пишется разборчивым почерком чернилами или шариковой ручкой. В отчете указывается фамилия школьника, номер его класса, школы (лицея, ЦО и т.п.), название и цель работы. Приводятся схема установки, таблицы экспериментальных результатов, результаты графического представления и аппроксимации экспериментальных данных. Схемы и графики можно выполнять карандашом. В отчет заносится таблица с калибровочными коэффициентами. Записываются выводы. В выводах дается краткий анализ калибровки датчиков, проведенных измерений и обработки результатов экспериментальных данных. Приводятся значения наибольшего давления в камере сгорания, времен пуска, выхода на режим и останова.

6. Контрольные вопросы

1. Дайте определение РДТТ.

2. Каким образом можно измерить значение давления?

3. Какой физический принцип положен в основу измерения давления, используемого в работе?

4. Какие характеристики внутренней баллистики РДТТ можно определять на лабораторной установке?

5. Чем можно объяснить колебания давления в камере сгорания РДТТ?

6. Как проводится градуировка датчика давления в камере сгорания?

7. Для каких целей используется прямой и обратный ход калибровки датчика давления?

8. Каким образом происходит воспламенение топлива в МРД?

9. Как устроен предохранительный клапан и для каких целей он предназначен?

Литература

1. Феодосьев В.И. Основы техники ракетного полета.- М. Наука, 1981.- 496 с.; www.twirpx.com/file/401450.

2. Волков В.Т., Ягодников Д.А. Исследование и стендовая отработка ракетных двигателей на твердом топливе.- М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2007.- 296 с.

3. Железняков А. Энциклопедия Космонавтика.- www.cosmoworld.ru/spaceencyclopedia.

НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ

ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ

«Гироскоп на земле, в небесах и на море»

кафедры «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации»

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Ответственный: доцент Кулешов Александр Викторович

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторного практикума по
школе-лаборатории
кафедры «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации»
МГТУ им. Н.Э. Баумана

ГИРОСКОП И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ

Москва 2012

КУЛЕШОВ А.В. Гироскоп и его применение: Методические указания к выполнению лабораторного практикума по Школе-лаборатории кафедры «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации» МГТУ им. Н.Э.Баумана. – М.: Кафедра “Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации” МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012.- 16 с.

В лабораторной работе исследуются основные свойства двух- и трехстепенных гироскопов, рассматриваются кинематические схемы и принципы действия гироскопов различных типов, а также применение гироскопов в системах ориентации и системах индикаторной и силовой гироскопической стабилизации.

Методические указания имеют целью помочь школьникам усвоить физические основы работы гироскопов различных типов, принципы применения гироскопов в системах ориентации и стабилизации, овладеть навыками проведения физических экспериментов.

Для обучающихся в общеобразовательных учреждениях в рамках исполнения обязательств МГТУ им. Н.Э. Баумана по техническому заданию Соглашения с Департаментом образования города Москвы о социальном обслуживании населения города Москвы в части предоставления образовательных услуг в интересах города Москвы.

УДК 531.383

ОГЛАВЛЕНИЕ

	с
Ведение	3
1. Трехстепенной гироскоп	3
2. Двухстепенной гироскоп	8
3. Динамически настраиваемый гироскоп	9
4. Применение гироскопа	12
5. Экспериментальная часть	16
5. Содержание отчета	22
6. Контрольные вопросы	22
Литература	22

Введение

Для ознакомления с основами теории гироскопических приборов кафедра «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации» предлагает лабораторный практикум, позволяющий понять, что такое гироскоп, зачем он нужен, как он устроен, каковы его основные свойства, а также в каких сферах в настоящее время гироскопы находят применение.

Цель лабораторного практикума - помочь школьникам в рамках программы общеобразовательного курса физики усвоить физические основы работы гироскопов различных типов, принципы применения гироскопов в системах ориентации и стабилизации, овладеть навыками проведения физических экспериментов.

Основные задачи лабораторного практикума:

- ознакомиться с основными свойствами трехстепенного и двухстепенного гироскопов и областями их применения, экспериментально определить кинетический момент гироскопа, скорость прецессии и гироскопический момент;
- ознакомиться с принципом построения и свойствами динамически настраиваемого вибрационного гироскопа (ДНГ), экспериментально определить частоту динамической настройки;
- ознакомиться с принципами действия и конструкциями индикаторного гироскопического стабилизатора, курсовертикали автопилота АП-15 на базе силового трехосного гиростабилизатора.

1. Трехстепенной гироскоп

Основные определения

Слово «гироскоп» состоит из двух греческих слов gyro – вращать и scopeo – наблюдать и впервые было введено французским ученым Леоном Фуко в 1852 году. Таким образом, гироскоп, судя по его названию, - это некое устройство, способное наблюдать вращение (в 1852 году Фуко планировал использовать его, чтобы наблюдать и измерять скорость вращения Земли).

Чаще всего гироскопом называют быстровращающееся симметричное твердое тело, имеющее одну неподвижную точку. (Более общее определение, включающее и другие типы гироскопов, приведено в примечании в конце этого раздела.)

Для обеспечения трех степеней свободы вращения ротора вокруг неподвижной точки часто применяют карданов подвес (рис. 1), имеющий внутреннюю 2 и наружную 3 рамки. Карданов подвес обеспечивает три степени свободы гироскопа: ротор 1 с большой угловой скоростью Ω вращается вокруг своей оси z относительно внутренней рамки 2; рамка 2 — вокруг своей оси x относительно рамки 3; наружная рамка 3 — вокруг своей оси y_1 относительно неподвижного корпуса прибора. Угол поворота оси z ротора вокруг оси x обозначают через β, а вокруг y_1 — через α. Оси карданова подвеса (см. рис. 1) пересекаются в точке O, являющейся неподвижной; точка O — центр подвеса. Если центр масс трехстепенного гироскопа совпадает с центром подвеса O, то такой гироскоп называется астатическим. Ось z ротора — ось собственного вращения, или главная ось гироскопа. Угловая скорость Ω ротора вокруг оси z называется скоростью (частотой) собственного вращения гироскопа. В правой системе координат вектор направляют по оси z в ту сторону, откуда поворот ротора виден происходящим против хода часовой стрелки.

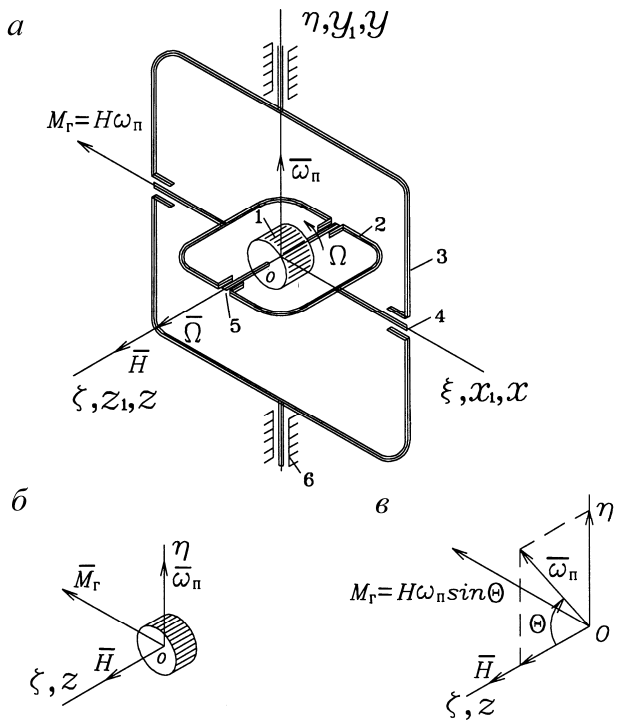

Рис. 1

Важнейшей характеристикой гироскопа является момент количества движения, или собственный кинетический момент гироскопа, равный произведению осевого момента инерции ротора С на угловую скорость Ω:

$$H = C\,\Omega.$$

Вектор кинетического момента $\overline{H}$ направлен по главной оси гироскопа в ту же сторону, что и вектор $\overline{\Omega}$. Чем больше Н, тем лучше проявляются свойства гироскопа, поэтому привод ротора гироскопа обеспечивает высокую угловую скорость:

$$\Omega = (1{,}5\ldots12)\cdot10^4 \text{ об/мин}.$$

Кинетический момент Н зависит от назначения гиросистемы: для гироскопов ориентации и стабилизации ЛА — 3... 10 Н·м·с; для стабилизации КЛА — до 104 Н·м·с и более.

Опоры 5 (см. рис. 1, а) ротора гироскопа называют главными. Применяют шарикоподшипниковые, газо- и гидродинамические опоры. Опоры 4 и 6 карданова подвеса называют чувствительными; применяют шарикоподшипниковые, газостатические, магнитные, упругие опоры и др. Точность гироскопов во многом определяется качеством опор, поэтому к изготовлению и монтажу последних предъявляются высокие требования по точности вращения, минимальному уровню возмущающих моментов. В гироприборостроении получил распространение термин «свободный гироскоп». Это трехстепенной гироскоп, к которому не прикладываются управляющие (корректирующие) моменты в процессе эксплуатации.

Совокупность ротора гироскопа и устройства, предназначенного для приведения ротора во вращение, называют гиромотором. Наиболее распространенными являются асинхронные и синхронные гистерезисные трехфазные гиромоторы. Электрические гиромоторы часто выполняют по «обращенной» схеме, когда статор располагается внутри ротора; это позволяет в заданных габаритах получать максимально возможный осевой момент инерции С ротора и, следовательно, больший кинетический момент Н. Внутренняя рамка подвеса конструктивно выполняется в виде закрытого кожуха гиромотора; в этом случае ротор гироскопа не изображается на рисунках (рис. 2).

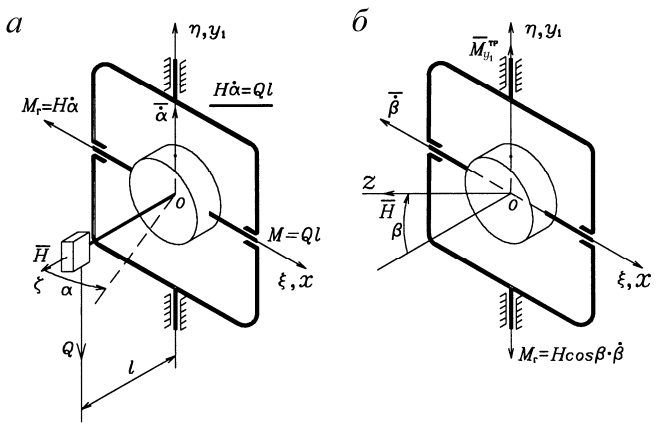

Рис. 2

Примечание. Гироскоп — это устройство, содержащее материальный объект, который совершает быстрые циклические движения, и чувствительное вследствие этого к вращению в инерциальном пространстве. Материальным объектом — носителем быстрых циклических движений в гироскопе — может быть твердое тело, жидкость или газ, электромагнитное поле и т.п. Быстрые циклические движения могут быть вращательными, колебательными и т.д.

Гироскопический момент

Свойства гироскопа объясняются наличием гироскопического момента, который представляет собой специфическое инерционное сопротивление, обусловленное кориолисовыми силами инерции. Гироскопический момент возникает в случае вращения гироскопа с абсолютной угловой скоростью $\overline{\omega}_п$ (см. рис. 1 а, б) в инерциальном пространстве ($\xi\eta\zeta$ на рис. 1 — инерциальная система координат).

Угловую скорость $\overline{\omega}_п$ вектора $\overline{H}$ называют скоростью прецессии гироскопа. Если вектор кинетического момента гироскопа перпендикулярен (см. рис. 1, а, б) вектору скорости прецессии $\overline{H} \perp \overline{\omega}_п$, то гироскопический момент $\overline{M}_г$ равен произведению кинетического момента гироскопа на скорость прецессии:

$$M_г = H\,\omega_п.$$

Если угол θ между векторами $\overline{H}$ и $\overline{\omega}_п$ (см. рис. 1, в) отличается от 90°, то гироскопический момент равен произведению кинетического момента гироскопа, скорости прецессии и синуса угла θ:

$$M_г = H\,\omega_п \sin\theta.$$

Вектор гироскопического момента $\overline{M}_г$ перпендикулярен плоскости, в которой находятся векторы $\overline{H}$ и $\overline{\omega}_п$. Его направление таково, что он по кратчайшему пути как бы стремится совместить вектор $\overline{H}$ с вектором $\overline{\omega}_п$ (против хода часовой стрелки, если смотреть с конца вектора $\overline{M}_г$).

Наличие гироскопического момента обеспечивает гироскопу эффективную неподатливость внешним возмущениям (по отношению к внешним моментам, стремящимся отклонить ось его ротора от направления, заданного по отношению к инерциальному пространству).

Свойства трехстепенного гироскопа

Гироскоп отличается от обычных «негироскопических» твердых тел тем, что в значительно большей мере наделен способностью сохранять неизменным направление оси собственного вращения в инерциальном пространстве. Гироскоп, к которому не приложены внешние моменты, сохраняет положение оси собственного вращения в инерциальном пространстве неизменным (I свойство). Поэтому его используют в качестве прибора, реализующего базовую (например, инерциальную) систему координат. С помощью гироскопа можно измерять угловые отклонения объекта относительно базовой системы координат. Если по осям карданова подвеса установить преобразователи информации (датчики угла — потенциометрические, индукционные, оптические и др.), то гироприбором (с точностью до погрешностей) будут измеряться углы отклонения объекта относительно базовой системы координат, т.е. могут быть решены задачи ориентации, стабилизации и навигации. Это используется в гироскопических приборах и системах ориентации ЛА — гировертикалях, гирополукомпасах и др. Гироскопы являются как бы хранителями (или стабилизаторами) заданного направления.

Пусть гироскоп установлен на горизонтальном основании, неподвижном относительно Земли. Поскольку гироскоп сохраняет свое положение в инерциальном пространстве неизменным, то основание будет перемещаться относительно гироскопа и, следовательно, относительно инерциальной системы координат $\xi\eta\zeta$ с угловой скоростью, равной вертикальной составляющей скорости вращения Земли $U\sin\varphi$ (U — скорость суточного вращения Земли вокруг оси Мира; φ — широта места). На широте Москвы $U\sin\varphi$ = 12,44 °/ч. Наблюдателю на Земле будет казаться, что гироскоп поворачивается вокруг оси наружной рамки относительно основания со скоростью $U\sin\varphi$ и отклоняется от заданного направления. Это отклонение называют кажущимся («кажущийся» или «видимый» уход гироскопа).

Если гироскопу сообщить кратковременное возмущение (допустим, с помощью кратковременного удара создали момент вокруг оси наружной рамки и сообщили гироскопу начальную угловую скорость), то ось гироскопа начнет совершать свободные гармонические колебания с высокой частотой и малой амплитудой. Такие колебания гироскопа называют нутационными, а само свободное движение гироскопа (при отсутствии внешних моментов) называют нутацией.

Нутация есть своеобразное проявление инерционного сопротивления гироскопа как обычного твердого тела — ротора (обусловлено инерционными моментами, равными произведению экваториального момента инерции A ($A \approx 1{,}2C$) ротора на его угловое ускорение и вокруг экваториальной оси). Частота нутации

$$n_0 = \frac{H}{A} = \frac{C\Omega}{A} \approx 1{,}2\Omega.$$

При нутационных колебаниях ось ротора гироскопа описывает в пространстве круглый конус с вершиной в точке O и малым углом раствора $\theta_н$ с постоянной угловой скоростью вокруг оси, неподвижной в инерциальном пространстве:

$$\theta_н = \frac{2A\dot{\alpha}_0}{H} \approx \frac{1{,}66\dot{\alpha}_0}{\Omega}, \dot{\alpha}_0 << \Omega,$$

где $\frac{A\dot{\alpha}_0}{H}$ — амплитуда нутации. Иногда говорят, что гироскоп сохраняет свое положение неизменным в инерциальном пространстве с точностью до нутации. На практике вследствие действия диссипативных сил трения в опорах, вязкого сопротивления движению рамок гироскопа и т.д. нутация быстро затухает.

Из формул видно, что чем меньше $\overline{H}$, тем меньше частота и больше амплитуда нутации. Поэтому при разгоне гироскопа или его выбеге (после отключения питания гиромотора) визуально наблюдается нутационное движение.

Если на гироскоп действуют постоянные внешние моменты (момент M = Ql, см. рис. 2, а), то он отклоняется от первоначального направления в инерциальном пространстве с постоянной угловой скоростью.

Движение гироскопа с угловой скоростью под действием внешнего момента называется прецессией (II свойство). Правило прецессии следующее: под действием момента внешних сил главная ось гироскопа поворачивается относительно инерциального пространства так, что вектор кинетического момента $\overline{H}$ стремится совместиться с вектором момента внешних сил $\overline{M}$ по кратчайшему пути (см. рис. 2). Гироскоп поворачивается в направлении, перпендикулярном вектору действующего момента $\overline{M}$, с угловой скоростью прецессии. Скорость прецессии для случая $\overline{H} \perp \overline{\omega}_п$ (см. рис. 2, а) равна

$$\omega_п = \dot{\alpha} = \frac{M}{H}.$$

В соответствии с правилом определения гироскопического момента, момент $M_г = H\omega_п = H\dot{\alpha}$ всегда направлен противоположно внешнему моменту и равен ему по модулю:

$$M = H\omega_п; M_г = M.$$

При прецессионном движении устанавливается динамическое равновесие между моментом внешних сил и гироскопическим моментом. Последний и есть то специфическое инерционное сопротивление, которое оказывает гироскоп приложенным моментам.

Если $\overline{H}$ не перпендикулярен $\overline{\omega}_п$ (см. рис. 2, б), то

$$\omega_п = \dot{\beta} = \frac{M}{H\cos\beta} = \frac{M_{y_1}^{тр}}{H\cos\beta}.$$

Скорость прецессии гироскопа под действием момента внешних сил тем меньше, чем больше кинетический момент гироскопа и, следовательно, больше эффективная неподатливость гироскопа по отношению к моментам внешних сил и выше способность сохранять неизменным направление своей оси в инерциальном пространстве. Следует важный вывод: для обеспечения необходимой точности гироскопа при заданном H внешние моменты, действующие вокруг осей карданова подвеса, следует сводить к минимуму. В противном случае возникает ошибка $\Delta\psi$ в определении ориентации (или стабилизации) объекта из-за прецессии гироскопа:

$$\Delta\psi = \frac{M_{вр}}{H} t,$$

где $M_{вр}$ — вредные возмущающие моменты, действующие вокруг оси карданова подвеса; t — время измерения.

Скорость прецессии гироскопа, вызванная действием вредных моментов, называется собственной скоростью прецессии гироскопа ССП.

Свойство прецессии гироскопа используют и для его коррекции (управления) путем наложения управляющих моментов вокруг осей карданова подвеса с помощью специальных устройств — датчиков моментов. Скорость управления гироскопа (при $\overline{H} \perp \overline{M}_{упр}$), в соответствии с правилом прецессии, составляет

$$\omega_{упр} = \frac{M_{упр}}{H}.$$

Из формулы следует, что после прекращения действия момента внешних сил ось ротора гироскопа мгновенно (без учета нутации) останавливается, т.е. прецессионное движение оси ротора является движением без инерции (III свойство).

2. Двухстепенной гироскоп

Основные определения

В системах стабилизации, ориентации и навигации ЛА широко используются гироскопические приборы, действие которых основано на применении гироскопов с двумя степенями свободы. Это датчики угловых скоростей (ДУС) и ускорений (ДУУ), интегрирующие гироскопы (ИГ), гирокомпасы, элементы систем стабилизации КЛА и др.

Гироскопы с двумя степенями свободы представляют собой быстровращающийся вокруг оси *z* ротор 1 (рис. 3), помещенный в рамку 2, которая может поворачиваться в опорах 4 относительно корпуса прибора. Рамка 2 часто выполняется в виде закрытого кожуха гиромотора; в этом случае ротор гироскопа не изображают на рисунках. Совокупность гиромотора с внутренней рамкой называют гироузлом.

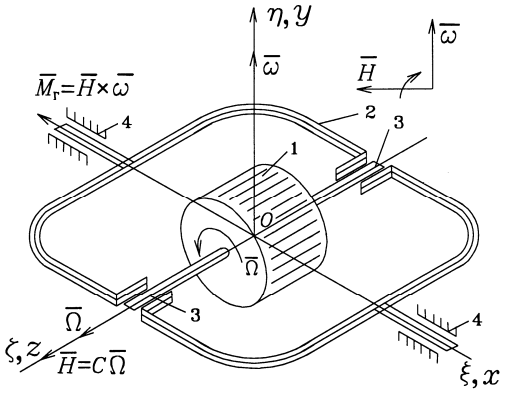

Рис. 3

Чем больше собственный кинетический момент H гироскопа, тем лучше проявляются свойства гироскопа. Значение H выбирают в зависимости от назначения гироскопа и технических требований к нему. Известны малогабаритные двухстепенные гироскопы с кинетическим моментом 3 ... 10^{-4} Н·м·с; для стабилизации КЛА применяют двухстепенные гироскопы с H >> 10^{4} Н·м·с.

Свойства двухстепенного гироскопа

Двухстепенной гироскоп не обладает известными свойствами трехстепенного гироскопа. Так, под действием внешнего момента, приложенного вокруг оси рамки, двухстепенной гироскоп поворачивается как обычное твердое тело; двухстепенной гироскоп не обладает способностью сохранять положение оси ротора неизменным. Однако природа свойств двух- и трехстепенного гироскопов одна — это наличие гироскопического момента в случае переносного вращения гироскопа вместе с основанием относительно инерциального пространства. При переносном вращении двухстепенного гироскопа вместе с основанием со скоростью $\overline{\omega}$ (см. рис. 3) кориолисовы силы инерции создают гироскопический момент M. Если $\overline{H} \perp \overline{\omega}$, то гироскопический

момент равен произведению кинетического момента H гироскопа на скорость ω переносного вращения основания, на котором установлен двухстепенной гироскоп:

$$M_г = H\omega.$$

Направление гироскопического момента $M_г$ таково, что он как бы стремится совместить вектор $\overline{H}$ с вектором скорости $\overline{\omega}$ вращения основания кратчайшим путем; с конца вектора гироскопического момента $\overline{M}_г$ наблюдается вращение $\overline{H}$ против хода часовой стрелки. Под действием этого момента гироузел будет поворачиваться вокруг оси внутренней рамки (опоры 4 считаем идеальными).

Итак, при вращении основания, на котором установлен двухстепенной гироскоп, вектор кинетического момента $\overline{H}$ гироскопа стремится совместиться под действием гироскопического момента с вектором скорости вращения основания кратчайшим путем (основное свойство двухстепенного гироскопа).

Определим гироскопический момент двухстепенного гироскопа (рис. 4), если имеется угол β поворота гироузла. В этом случае гироскопический момент равен произведению кинетического момента H, угловой скорости основания ω и синуса угла между ними:

$$M_г = H\omega\sin(90-\beta) = H\omega\cos\beta.$$

Разложим вектор $\overline{\omega}$ на его составляющие (см. рис. 4): $\omega_z = \omega\sin\beta$ и $\omega_y = \omega\cos\beta$. Составляющая $\omega_z << \Omega$ не оказывает влияния на движение гироскопа; ω_y является проекцией угловой скорости основания в инерциальном пространстве на ось y, называемую измерительной, и вызывает появление гироскопического момента:

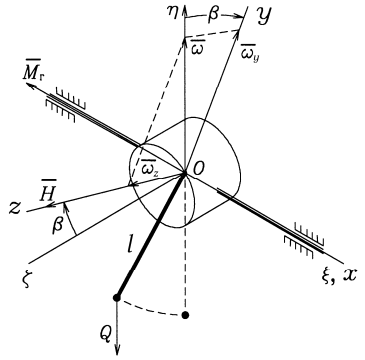

Рис. 4

$$M_г = H\omega\cos\beta = H\omega_y.$$

Гироскопический момент пропорционален проекции переносной (в инерциальном пространстве) угловой скорости основания (где установлен двухстепенной гироскоп) на измерительную ось y (свойство двухстепенного гироскопа).

Принцип действия датчика угловой скорости (ДУС), интегрирующего гироскопа и других приборов основан на измерении гироскопического момента $M_г = H\omega_y$ путем компенсации этого момента моментом пружинного или демпфирующего устройства.

3. Динамически настраиваемый гироскоп

Основные особенности конструкции. Кинематическая схема

Динамически настраиваемый вибрационный гироскоп (рис. 5) представляет собой трехстепенной гироскоп с вращающимся внутренним кардановым подвесом.

Упругий подвес гироскопа обеспечивает ему не только две степени свободы углового движения относительно вала двигателя, но и кинематическую связь с двигателем, приводящим во вращение ротор гироскопа. Третья степень свободы гироскопа обеспечивается шарикоподшипниковой опорой вала двигателя. При этом в отличие от обычного трехстепенного гироскопа с наружным кардановым подвесом двигатель ДНГ расположен на корпусе прибора. Это позволяет снизить погрешности,

связанные с появлением моментов небаланса из-за тепловых расширений элементов гиродвигателя.

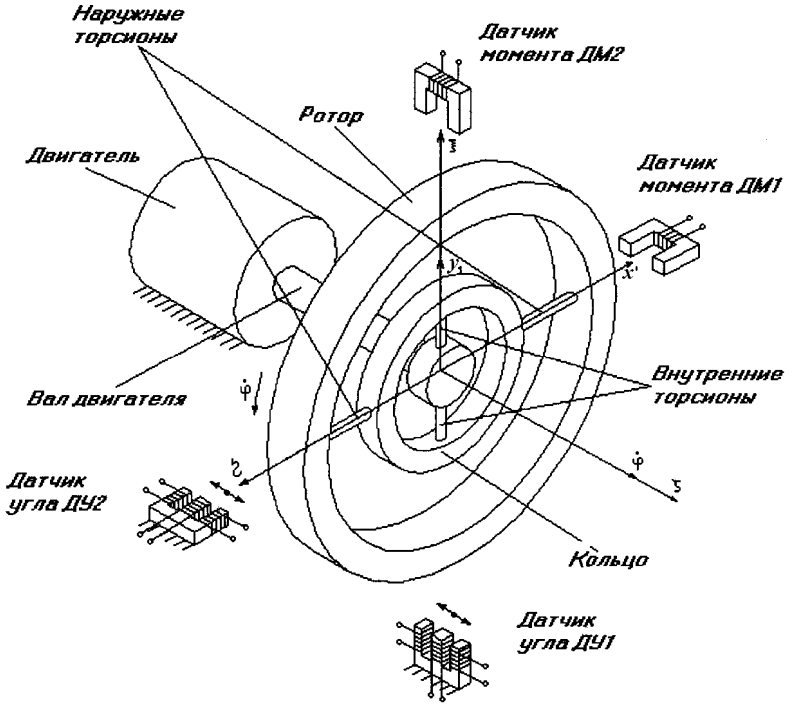

Рис. 5

При отсутствии собственного вращения гироскопа подвес обеспечивает упругую связь ротора с корпусом, что приводит к возникновению значительных моментов, действующих на ротор гироскопа, при относительном отклонении ротора и корпуса. Однако при вращении ротора, а вместе с ним и упругого подвеса, эти моменты могут быть скомпенсированы инерционными моментами элементов подвеса, что приближает ДНГ к свободному гироскопу. Указанная компенсация обеспечивается при определенной скорости собственного вращения гироскопа, что объясняет это название.

Применение в ДНГ упругого карданова подвеса исключает сухое трение в опорах подвеса, что дает этому гироскопу определенные преимущества.

Обычно в ДНГ углы отклонения ротора относительно корпуса очень малы. Это достигается работой прибора в режиме слежения корпуса гироскопа за его ротором (если ДНГ используется в качестве чувствительного элемента индикаторного гиростабилизатора) или в режиме слежения ротора за корпусом (как в трехстепенных датчиках угловой скорости, построенных на ДНГ). Это позволяет измерять углы поворота ротора в системе координат, неподвижной относительно корпуса, с помощью датчиков, измеряющих зазоры между корпусом и вращающимся ротором (см. рис. 5).

Управление положением гироскопа в инерциальном пространстве осуществляется приложением управляющих моментов с помощью датчиков момента, также расположенных на корпусе прибора.

ДНГ может быть представлен в виде механической системы из трех тел (см. рис. 5): ротора, кольца внутреннего упругого подвеса и вала двигателя, приводящего во вращение ротор гироскопа. Подвес ротора содержит вал двигателя и кольцо, соединенные между собой и с ротором двумя парами упругих торсионов. Таким образом, ротор гироскопа обладает тремя степенями свободы. Он может вращаться вокруг оси x' наружных торсионов, вокруг оси y_1 внутренних торсионов вместе с кольцом и вокруг оси ζ вала двигателя. Двигатель гироскопа установлен на корпусе. Вал двигателя приводится во

вращение с постоянной угловой скоростью $\dot{\varphi}$. Через внутренние торсионы движение передается на кольцо и далее через наружные торсионы — на ротор гироскопа.

Ротор такого гироскопа оказывается связанным с корпусом. При этом отсутствует информация о положении корпуса гироскопа, что не позволяет использовать такой прибор в качестве датчика положения платформы стабилизатора, на которую он установлен. Причиной такого положения является наличие в вибрационном гироскопе упругих (т.е. пропорциональных углам отклонений гироскопа относительно корпуса) моментов. Наибольшими среди них являются инерционные моменты, возникающие при вращении кольца со скоростью и упругие моменты подвеса.

Для снижения упругих моментов в ДНГ применяют следующие меры. Прежде всего параметры гироскопа выбирают таким образом, чтобы выполнялось условие динамической настройки, при которой обеспечивается равенство в среднем за период инерционных моментов, возникающих при вращении кольца, и упругого момента подвеса гироскопа.

$$k - J_1\dot{\varphi}^2 = 0,$$

где $J_1 = \frac{1}{2}(A_1 + B_1 - C_1)$, $k = \frac{1}{2}(k_\alpha + k_\beta)$;

A_1, B_1 и C_1 — моменты инерции кольца вокруг осей наружных торсионов, внутренних торсионов и оси, перпендикулярной плоскости кольца;

k_α, k_β — угловые жесткости наружных и внутренних торсионов.

Выполнение данного условия возможно на конкретной частоте вращения ротора, равной

$$\dot{\varphi} = \sqrt{\frac{k_\alpha + k_\beta}{A_1 + B_1 - C_1}}.$$

Точное выполнение условия динамической настройки освобождает ДНГ от влияния упругих моментов торсионов.

Кроме того, в ДНГ принимают меры по уменьшению демпфирующих моментов. Для этого обычно производят вакуумирование вибрационного гироскопа. Это обеспечивает малость коэффициента демпфирования, что также снижает моменты пропорциональные углам отклонения гироскопа от корпуса.

Однако на практике условие динамической настройки не может быть выполнено абсолютно точно. Также невозможно обеспечить равенство нулю коэффициентов демпфирования. Это приводит к тому, что при больших углах α_1, β_1 отклонения ротора гироскопа от корпуса нескомпенсированные упругие моменты становятся значительными, что приводит к неприемлемо большой собственной скорости прецессии ДНГ. Для повышения точности ДНГ применяют режим слежения корпуса прибора за гироскопом. Для этого ДНГ устанавливают на платформу гиростабилизатора, работающего по сигналам рассогласования ротора гироскопа и корпуса. При появлении углов отклонение гироскопа от корпуса автоматические системы стабилизации поворачивают платформу гиростабилизатора с расположенным на ней гироскопом до обнуления указанного рассогласования. Это приводит к тому, что в процессе работы ДНГ углы отклонения гироскопа от корпуса оказываются очень малыми (порядка десятков и единиц угловых секунд). В связи с тем, что упругие моменты пропорциональны этим углам, они оказываются незначительными. Такой же результат получается при работе прибора в режиме слежения ротора ДНГ за корпусом, что имеет место в трехстепенных датчиках угловой скорости.

Таким образом, применение ДНГ в качестве чувствительного элемента гиростабилизатора или в режиме датчика угловой скорости одновременно позволяет значительно повысить точностные характеристики самого гироскопа.

В результате работа ДНГ осуществляется в режиме близком к режиму свободного гироскопа.

При нарушении условия динамической настройки ось собственного вращения гироскопа будет описывать круговой конус вокруг оси вращения вала двигателя.

4. Применение гироскопов

Одноосный индикаторный гиростабилизатор

Гиростабилизатор предназначен для удержания объекта стабилизации в некотором заданном угловом положении в инерциальном пространстве. Гиростабилизаторы нашли широкое применение в авиационной, ракетной и судостроительной технике. С их помощью стабилизируется положение различных приборов и устройств - акселерометров, оптических прицелов, пеленгаторов, кинофотоаппаратов, визиров и др., - решаются задачи ориентации, стабилизации и навигации судов, летательных аппаратов, в том числе космических. В качестве чувствительного элемента гиростабилизатора используется трехстепенной гироскоп.

Принципиальная схема индикаторного гироскопического стабилизатора с трехстепенным гироскопом представлена на рис. 6. Устройство имеет платформу П, на которой установлен объект стабилизации ОС. Ось вращения платформы является осью стабилизации. Положение платформы по оси стабилизации измеряется чувствительным элементом, роль которого выполняет трехстепенной гироскоп ТГ, расположенный на платформе так, что одна из его осей чувствительности (в данном случае ось наружной рамки) параллельна оси стабилизации.

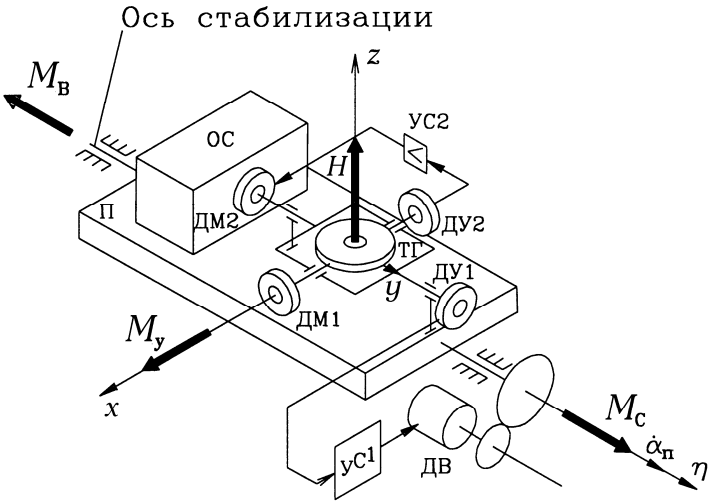

Рис. 6

Датчик угла ДУ1, расположенный на этой оси и подключенный через усилитель УС1 к двигателю ДВ, образует автоматическую систему стабилизации. Датчик угла ДУ2, находящийся на оси внутренней рамки гироскопа, усилитель УС2 и датчик момента ДМ2 образуют вспомогательную систему электрического арретирования. Датчик момента ДМ1, расположенный на оси внутренней рамки гироскопа, предназначен для управления гиростабилизатором.

Работа гиростабилизатора заключается в формировании и приложении к платформе момента стабилизации, равного по модулю и противоположного по направлению возмущающему моменту. Момент стабилизации создается автоматической системой стабилизации и прикладывается к платформе с помощью двигателя. При этом

трехстепенной гироскоп в индикаторном стабилизаторе играет роль индикатора положения платформы, не оказывая на нее силового воздействия, что и объясняет название гиростабилизатора.

При действии на платформу П внешнего возмущающего момента $M_в$ она отклоняется от заданного положения, определяемого положением оси ротора гироскопа. Угол поворота платформы $\alpha_п$ измеряется датчиком угла ДУ1. Сигнал с датчика угла, усиленный и преобразованный в усилителе УС1, поступает на обмотку управления двигателя стабилизации Дв, момент $M_с$ которого уравновешивает внешний возмущающий момент, удерживая платформу в заданном положении с точностью до малых ошибок.

Таким образом, в процессе стабилизации платформа повторяет положение оси ротора гироскопа. Для управления положением платформы необходимо управлять положением гироскопа. Это осуществляется приложением к гироскопу управляющего момента $M_у$ с помощью датчика момента ДМ1, расположенного по оси внутренней рамки.

Так как гироскоп, расположенный на платформе, имеет две оси чувствительности, то одна из них в одноосном гиростабилизаторе оказывается избыточной (в данном случае ось внутренней рамки).

В результате собственной скорости прецессии вокруг оси внутренней рамки гироскоп может лечь на упоры, что приведет к потере одной степени свободы и отказу гиростабилизатора. Для предотвращения этого явления применяют специальную систему электрического арретирования избыточной оси гироскопа. Она работает по принципу межрамочной коррекции. При повороте гироскопа вокруг оси внутренней рамки с датчика угла ДУ2 снимается сигнал, поступающий через усилитель УС2 на датчик момента ДМ2. Последний создает момент вокруг оси наружной рамки, заставляющий гироскоп прецессировать в сторону уменьшения отклонения.

Трехосный силовой гиростабилизатор

Трехосный силовой гиростабилизатор предназначен для построения на борту летательного аппарата (ЛА) базовой (отсчетной) системы координат, относительно которой измеряются углы курса ψ, тангажа ϑ, крена γ ЛА. Информация об этих углах необходима для решения задачи ориентации и стабилизации ЛА на траектории. Помимо этой задачи, трехосный силовой ГС может решать задачи стабилизации в пространстве различного бортового оборудования (координаторов цели, фото- и киноаппаратуры и т.д.).

Кинематическая схема трехосного силового ГС представлена на рис. 7. Платформа 6 помещена в карданов подвес, состоящий из внутренней 2 и наружной 4 рам. С платформой связан трехгранник $x_3\ y_3\ z_3$, с внутренней рамой – $x_2\ y_2\ z_2$, с наружной – $x_1\ y_1\ z_1$, с основанием (корпусом) ГС – $x_0\ y_0\ z_0$.

Платформа относительно корпуса ГС имеет три степени свободы, характеризуемые углами α, β, ε. Положительные направления отсчета этих углов показаны на рис. 7.

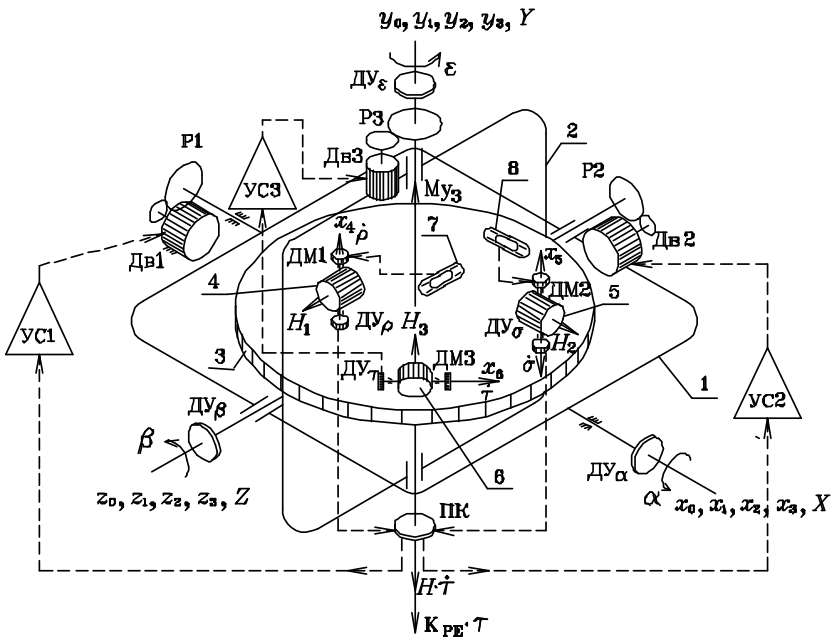

Рис. 7

Оси x_1, z_2, y_3 являются наружной, средней, внутренней осями карданова подвеса. На них установлены датчики углов $ДУ_\alpha$, $ДУ_\beta$, $ДУ_\varepsilon$, измеряющие углы α, β, ε соответственно. Карданов подвес может обеспечить два неограниченных угла поворота (прокачки) платформы (α, ε) вокруг наружной x_1 и внутренней z_2 осей. Угол поворота (прокачки) платформы β вокруг внутренней оси y_3 ограничен значениями β = (45 ... 60)°. При β > (45 ... 60)° происходит ухудшение динамических характеристик ГС, потеря устойчивости; при β = 90° — сложение рам карданова подвеса.

На платформе 3 (см. рис. 7) установлены три двухстепенных гироскопа 4, 5 и 6, имеющих кинетические моменты $H_1 = H_2 = H_3 = H$. Когда возмущающие моменты на платформу не действуют, оси собственного вращения гироскопов 4, 5 составляют между собой угол, равный 90°. Ось собственного вращения гироскопа 6 совпадает с направлением биссектрисы угла, образованного осями собственного вращения гироскопов 4 и 5.

Каждый из гироскопов 4, 5 и 6, помимо собственного вращения роторов, имеет одну степень свободы относительно платформы, характеризуемую углом: ρ — для гироскопа 4, σ — для гироскопа 5, τ — для гироскопа 6. Положительные направления отсчета этих углов показаны на рис. 7. Оси x_4, x_5, x_6, вокруг которых происходит поворот гироскопов на углы ρ, σ, τ соответственно, называют осями прецессии. На осях прецессии гироскопов установлены: датчики углов $ДУ_\rho$, $ДУ_\sigma$, $ДУ_\tau$, измеряющие углы ρ, σ, τ соответственно; датчики момента ДМ1, ДМ2, ДМ3 для управления движением платформы относительно корпуса ГС. Обычно максимальные значения углов ρ, σ, τ не превышают (3 ... 4)°.

Для компенсации возмущающих моментов, действующих вокруг осей карданова подвеса x_1, z_2, y_3, применяются двигатели разгрузки, или двигатели стабилизации Дв1, Дв2, Дв3 с редукторами Р1, Р2, Р3, имеющими передаточные отношения i_1, i_2, i_3 соответственно. Выходная шестерня каждого редуктора установлена на соответствующей оси карданова подвеса. Разгрузочный момент вокруг оси x_1 (z_2, y_3) в i_1 (i_2, i_3) раз больше момента на валу двигателя Дв1 (Дв2, Дв3).

Для управления двигателями разгрузки используются сигналы с $ДУ_\rho$, $ДУ_\sigma$, $ДУ_\tau$. Датчики угла $ДУ_\rho$, $ДУ_\sigma$, $ДУ_\tau$, усилители УС1, УС2, УС3, двигатели разгрузки Дв1, Дв2, Дв3 с редукторами Р1, Р2, Р3 образуют три системы стабилизации, или канала разгрузки (см. рис. 7).

Для перераспределения сигналов с $ДУ_\rho$ и $ДУ_\sigma$ в зависимости от угла поворота платформы ε используется преобразователь координат ПК. При $\varepsilon \neq 0$ каналы разгрузки, обеспечивающие создание разгрузочных моментов M_{p1}, M_{p2}, связаны между собой, при ε = 0 — не связаны.

Рассмотрим принцип работы одной из систем стабилизации (одного из каналов разгрузки). При возникновении возмущающего момента M_{y_3} вокруг оси y_3 начинается прецессия гироскопа 6 вокруг оси x_6 (отсюда и название оси x_6 — «ось прецессии») со скоростью

$$\dot{\tau} = \frac{M_{y_3}}{H}.$$

Прецессия вызывает появление гироскопического момента $M_г = H\dot{\tau}$, который через опоры оси x_6 передается на платформу. Следовательно, гироскоп оказывает на платформу силовое воздействие в виде гироскопического момента (с этим явлением связано название «силовой ГС»). Таким образом, в первое мгновение гироскопический момент уравновешивает возмущающий момент. Как только появляется угол τ, сигнал с $ДУ_\tau$ после усилителя УС3 поступает на обмотку управления двигателя Дв3, который через редуктор Р3 передает на ось y_3 разгрузочный момент:

$$M_{Р3} = k_{ДУ_\tau}\tau k_{УС3}k_{ДВ3}i_3 = k_Р\tau,$$

где $k_Р = k_{ДУ_\tau}k_{УС3}k_{ДВ3}i_3$ — крутизна характеристики системы разгрузки; $k_{ДУ_\tau}, k_{УС3}, k_{ДВ3}$ — крутизны выходной характеристики $ДУ_\tau$, УС3, Дв3 соответственно. Разгрузочный момент $M_{Р3} = k_Р\tau$ направлен противоположно возмущающему моменту. Таким образом,

$$M_{y_3} = H\dot{\tau} + k_Р\tau.$$

По мере возрастания угла τ скорость прецессии уменьшается, так как

$$\dot{\tau} = \frac{M_{y_3} - k_Р\tau}{H}.$$

Следовательно, при возрастании угла τ доля гироскопического момента в компенсации возмущающего момента уменьшается, в то время как доля разгрузочного момента возрастает.

При определенном значении угла $\tau^* = \frac{M_{y_3}}{k_Р}$ прецессия прекращается ($\dot{\tau} = 0$) и возмущающий момент компенсируется только разгрузочным моментом: $M_{y_3} = k_Р\tau^*$. При этом гироскоп отклонен от своего первоначального положения на угол τ^*. Таким образом, при работе канала разгрузки ось карданова подвеса y_3 разгружается от возмущающего момента. Принято называть ось, вокруг которой возмущающий момент компенсируется специально создаваемым разгрузочным моментом, осью стабилизации.

Аналогично работают каналы разгрузки по компенсации возмущающих моментов M_{x_1}, M_{z_2} вокруг двух других осей карданова подвеса x_1, z_2.

В трехосном ГС три оси карданова подвеса являются осями стабилизации, три гироскопа — чувствительными элементами системы стабилизации. При изменении знака возмущающего момента меняется направление прецессии и, следовательно, знак угла поворота гироскопа вокруг оси прецессии и знак разгрузочного момента.

Таким образом, при работе каналов разгрузки платформа ГС стабилизирована в инерциальном пространстве и трехгранник $x_3y_3z_3$, связанный с платформой, можно использовать в качестве базового трехгранника.

В корректируемых ГС применяются системы горизонтальной и азимутальной коррекций. Система горизонтальной коррекции состоит из чувствительных элементов — маятниковых жидкостных переключателей 7, 8 и датчиков момента ДМ1, ДМ2, расположенных на осях прецессии гироскопов 4, 5 соответственно (см. рис. 7). Система горизонтальной коррекции удерживает оси платформы x_3, z_3 в горизонтальной плоскости.

Система азимутальной коррекции может использовать внешние устройства типа магнитных компасов (МК, астроориентаторов) либо работать в режиме гирокомпасирования без использования внешних устройств. И в том, и другом случаях платформа устанавливается на север, т.е. ось x_3 направлена на север. Без включения азимутальной коррекции ось x_3 произвольно ориентирована относительно направления на север, т.е. платформа свободна в азимуте.

В корректируемых ГС, использующих горизонтальную и азимутальную коррекции, трехгранник $x_3y_3z_3$, связанный с платформой, реализует географический трехгранник $\xi\eta\zeta$.

Курсовертикаль автопилота АП-15 имеет оба вида коррекции и устанавливается на борту самолета так, что ось x_1 карданова подвеса параллельна его продольной оси X, ось z_2 — поперечной оси Z, ось y_3 — нормальной оси Y.

При эволюциях самолета последний как бы обкатывается вокруг неподвижной относительно Земли платформы. При этом $\alpha = -\gamma$, $\beta = -\vartheta$, $\varepsilon = -\psi_м$ (магнитный курс).

Точность измерения углов γ, ϑ, ψ зависит от точности, с которой «сохраняется» заданная ориентация опорного трехгранника $x_3y_3z_3$. Обычно трехосные ГС, измеряющие углы γ, ϑ, ψ ЛА, называют курсовертикалями.

5. Экспериментальная часть

Эксперимент №1: Изучение основных свойств трехстепенного гироскопа, определение кинетического момента.

Краткое описание лабораторной установки

Лабораторная установка представляет собой трехстепенной гироскоп с вертикальной осью наружной рамки и горизонтальной осью внутренней рамки, установленный на платформе стенда. Подвод электрического питания к гироскопу осуществляется с настенных щитков через пульт с контрольно-измерительными приборами и токоподводы стенда.

Порядок проведения эксперимента

Эксперимент выполняется в присутствии и под полным контролем преподавателя. Любые действия с аппаратурой производятся только с разрешения преподавателя.

1. Включить питание стенда.

2. Не включая питания гиромотора, привести платформу стенда во вращение со скоростью 5 °/с. Изменяя направление вращения, убедиться в том, что гироскоп, увлекаемый платформой, будет поворачиваться вокруг вертикальной оси. Остановить платформу.

3. Включить питание гиромотора и, слегка ударив по наружной рамке гироскопа, убедиться в наличии нутационных колебаний.

4. Проверить I свойство гироскопа. Привести платформу во вращение (5 °/с). Убедиться, что ось ротора гироскопа некоторое время сохраняет свое положение неизменным. Однако, вследствие относительного движения наружной рамки и

вращающегося основания, появляется момент сил трения $M_{y_1}^{тр}$ вокруг оси y_1 наружной рамки. Он вызывает прецессию гироскопа со скоростью вокруг оси x в сторону совмещения осей вращения ротора и наружной рамки. Поэтому время демонстрации свойства в данном опыте ограничено (~ 60 с). В противном случае гироскоп может лечь на упоры и потерять степень свободы.

Остановить платформу и установить гироскоп в начальное положение.

5. Проверить II свойство гироскопа. Наблюдать прецессию гироскопа под действием момента M внешних сил вокруг оси внутренней рамки, созданного с помощью грузов, навинченных на балансировочный винт. Определить скорость прецессии гироскопа (гироскоп в начальном положении: $\beta = 0$). Груз Q установить на расстоянии l (l измерить) от оси внутренней рамки x, создавая момент внешних сил $M = Ql$ (см. рис. 2, *а*). Замерить время t, за которое гироскоп, прецессируя вокруг оси наружной рамки, повернется на угол $\alpha = 90°$ по шкале гироскопа. Подсчитать скорость прецессии по формуле $\dot{\alpha} = \frac{\pi}{2t}$.

6. Определить собственный кинетический момент H гироскопа ($H = \frac{M}{\dot{\alpha}}$).

7. Снять груз и установить гироскоп в начальное положение. Создать рукой момент внешних сил, действующих вокруг оси наружной рамки (под наблюдением преподавателя). Убедиться в появлении прецессии и, как следствие этого, инерционного сопротивления гироскопа $M_г$. Обратить внимание на то, что при потере гироскопом степени свободы он вращается вокруг оси наружной рамки как обычное твердое тело. Установить гироскоп в начальное положение.

8. Составить отчет по результатам выполнения эксперимента №1.

Эксперимент №2: Изучение основных свойств двухстепенного гироскопа, определение кинетического момента.

Краткое описание лабораторной установки

Лабораторная установка представляет собой двухстепенной гироскоп с горизонтальной осью рамки. Он установлен в кронштейне на платформе стенда. Подвод электрического питания к гироскопу осуществляется с настенных щитков через пульт и токоподводы стенда.

Порядок проведения эксперимента

Эксперимент выполняется в присутствии и под полным контролем преподавателя. Любые действия с аппаратурой производятся только с разрешения преподавателя.

1. Включить питание поворотной установки.

2. Не включая питания гиромотора, привести платформу во вращение со скоростью $\omega = 3°/с$. Изменяя направление вращения платформы, убедиться, что гироскоп не реагирует на вращение. Остановить платформу.

3. Включить питание гиромотора. После разгона ротора привести платформу во вращение со скоростью 3 °/с. Проверить свойство гироскопа — совмещение вектора $\overline{H}$ с вектором $\overline{\omega}$ под действием гироскопического момента $\overline{M}_г = \overline{H} \times \overline{\omega}$. Остановить платформу.

4. Создать момент вокруг оси рамки, уравновешивающий гироскопический с помощью груза Q.

5. Последовательно привести платформу во вращение (ω = 1 °/с, ω = 3 °/с) по ходу часовой стрелки, а затем против хода часовой стрелки, замеряя при этом угол отклонения рамки гироскопа. Результаты измерений занести в табл. 2.1. Вычислить гироскопический момент $M_г$, имея в виду, что он уравновешивается моментом $Ql\sin\beta$. Вычислить кинетический момент $H = \frac{Ql}{\omega}\operatorname{tg}\beta$. Результаты вычислений занести в табл. 1.

Таблица 1

ω, °/с	ω, рад/с	β, рад	$M_г$, Н·м	H, Н·м·с
1				
–1				
3				
–3				

Эксперимент №3: Определение частоты динамической настройки ДНГ. Экспериментальная проверка выполнения динамической настройки.

Описание лабораторной установки

Установка для проведения эксперимента представляет собой макет ДНГ, установленный на поворотную установку (рис. 8), и пульт управления.

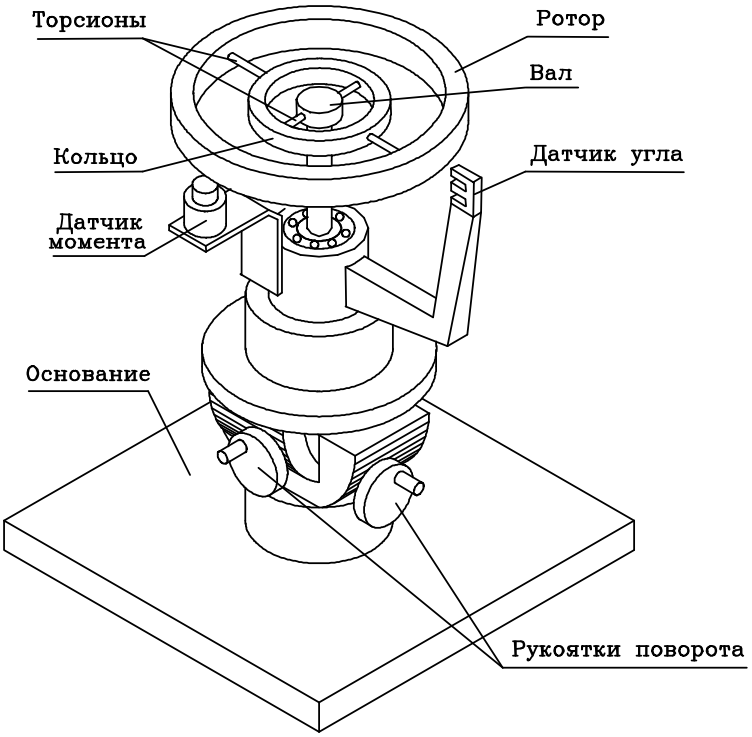

Рис. 8

ДНГ представляет собой ротор, кольцо и вал двигателя, соединенные между собой с помощью наружных и внутренних торсионов. Вал двигателя закреплен в корпусе с

помощью двух шарикоподшипников. Ротор гироскопа приводится во вращение с помощью двигателя постоянного тока, также установленного в корпусе.

Угол поворота ротора вокруг одной из осей чувствительности измеряется индукционным трехстержневым датчиком угла, якорем которого является вращающийся ротор ДНГ, изготовленный из стали.

Частота вращения ротора измеряется с помощью геркона, управляемого постоянным магнитом, который закреплен на роторе.

Вынужденная прецессия ротора может быть создана внешним моментом от силы, создаваемой электромагнитом.

Макет ДНГ установлен на платформу поворотной установки, что позволяет поворачивать корпус ДНГ вокруг его осей чувствительности. Питание всей системы осуществляется от сети = 27 В.

Порядок проведения эксперимента

Эксперимент выполняется в присутствии и под полным контролем преподавателя. Любые действия с аппаратурой производятся только с разрешения преподавателя.

1. Перед началом работы убедиться, что все выключатели пульта управления находятся в положении «Откл.», а ручка потенциометра «Обороты двигателя» повернута до упора против хода часовой стрелки.

2. Выставить платформу поворотной установки в горизонтальное положение, подключить пульт управления к источнику питания.

3. Определить угловые жесткости наружных (k_α) и внутренних (k_β) торсионов. Для этого установить ротор ДНГ в горизонтальное положение. Отклонить ротор до упора вокруг оси наружных торсионов, затем отпустить ротор и замерить с помощью секундомера время десяти его колебаний; вычислить период T_α колебаний ротора вокруг оси наружных торсионов, разделив измеренное время на десять.

Далее отклонить ротор до упора вокруг оси внутренних торсионов и аналогично определить период T_β колебаний ротора вокруг оси внутренних торсионов.

Вычислить угловые жесткости k_α и k_β по формулам

$$k_\alpha = \frac{4\pi^4(A + B_1)}{T_\alpha^2}; k_\beta = \frac{4\pi^4 A}{T_\beta^2}.$$

с учетом следующих параметров лабораторного макета:
$A = 25$ сН·см·с^2; $C = 48{,}5$ сН·см·с^2; $A_1 = B_1 = 1{,}01$ сН·см·с^2; $C_1 = 1{,}88$ сН·см·с^2.

4. Вычислить параметры динамически настроенного гироскопа. Скорость собственного вращения $\dot{\varphi}$, необходимая для выполнения условия динамической настройки.

5. Проверить выполнение условия динамической настройки. Для этого предварительно при включить тумблер «= 27 В». Затем медленно повернуть платформу поворотной установки на 5° вокруг измерительной оси датчика угла, убедиться визуально, что ротор поворачивается вместе с корпусом ДНГ. Вернуть платформу в начальное положение.

Далее поставить «Двигатель» в положение «Вкл.» и, поворачивая ручку «Обороты двигателя», добиться, чтобы частота собственного вращения ДНГ, измеренная с помощью частотомера, была равна частоте динамической настройки гироскопа, вычисленной в п. 4.

Далее повернуть платформу поворотной установки вокруг измерительной оси датчика угла по ходу часовой стрелки на 5° и убедиться, что ротор ДНГ сохранил свое положение в инерциальном пространстве. Вернуть платформу в первоначальное положение.

6. Наблюдать скорость прецессии гироскопа под действием внешнего момента, создаваемого электромагнитом. Для этого поставить выключатель «ДМ» в положение

«Вкл.». При достижении ротором ДНГ угла поворота, равного примерно 5°, выключить «ДМ» и секундомер.

7. Исследовать движение гироскопа при нарушении условия динамической настройки. Выключатель «Двигатель» пульта поставить в положение «Вкл.». Поворотом ручки «Обороты двигателя» добиться, чтобы частота собственного вращения ротора ДНГ, измеренная с помощью частотомера, была больше частоты динамической настройки. Повернуть платформу поворотной установки вокруг измерительной оси датчика угла на 5° по ходу часовой стрелки. Наблюдать коническую прецессию, вызванную нарушением условия динамической настройки.

Далее установить частоту собственного вращения ротора меньше частоты динамической настройки. Повернуть платформу поворотной установки в ту же сторону на 5°.

Наблюдать коническую прецессию гироскопа в противоположном направлении.

Вернуть платформу в горизонтальное положение.

8. Выключить лабораторную установку, поставив в обратном порядке все выключатели пульта в положение «Откл.», снять питание с пульта.

Эксперимент №4: Одноосный индикаторный гиростабилизатор

Описание лабораторной установки

Установка состоит из «гироплатформы», пульта управления и стабилизатора постоянного напряжения. Общий вид «гироплатформы» представлен на рис. 9.

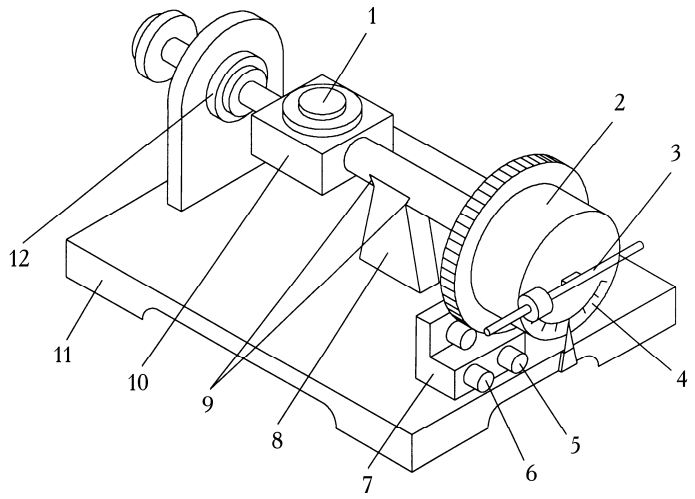

Рис. 9

На основании 11 имеется стойка 8, на которой в шарикоподшипниковых опорах 9 подвешена платформа 10. На платформе установлены условный объект стабилизации 2 и трехстепенной гироскоп 1 типа МГТУ-0,5, играющий роль чувствительного элемента. В гиростабилизаторе предусмотрены три привода:

1) редукторный, состоящий из двигателя постоянного тока 6 типа ДПР-32-Н1-03 и редуктора 7;

2) редукторный с двумя двигателями. В этом случае к вышеуказанному приводу добавляется такой же, состоящий из второго двигателя 5 и второй механической ветви редуктора 7;

3) безредукторный в виде магнитоэлектрического датчика момента 12 типа ДМ-3.

Включение любого из указанных приводов осуществляется с пульта управления. Для приложения к платформе момента внешних сил на ней закреплена линейка 3 с перемещающимся грузиком. Угол поворота платформы измеряется по шкале 4.

Кроме того, в пульте управления размещена вся электронная часть системы стабилизации. Система стабилизации содержит основной канал стабилизации, канал электрического арретирования и канал управления.

Канал управления имеет потенциометр ПТ, питание на который подается через выключатель В4. Выходной сигнал потенциометра подается на датчик момента ДМ1, расположенный на оси, перпендикулярной оси стабилизации.

Порядок проведения эксперимента

Эксперимент выполняется в присутствии и под полным контролем преподавателя. Любые действия с аппаратурой производятся только с разрешения преподавателя.

Перед началом работы убедиться, что все выключатели пульта управления находятся в положении «Откл.».

1. Подать на пульт питание ~3, 1000 Гц, 36 В от сети; ±27 В от стабилизатора напряжения.
2. Запустить гироскоп, установив выключатель В1 в положение «Вкл.». Время запуска 1,5 мин.
3. Подключить с помощью переключателя П3 редукторный привод с одним двигателем.
4. Установить платформу в горизонтальное положение и включить гиростабилизатор, установив последовательно выключатели В2 и В3 в положение «Вкл.». Приложив к платформе внешний момент, убедиться, что стабилизация имеет место.
5. Установить ручку потенциометра управления ПТ в среднее положение, а выключатель В4 — в положение «Вкл.». Медленно поворачивая в области среднего положения ручку ПТ, наблюдать управляемое движение платформы.
6. Выключить гиростабилизатор, поставив все выключатели пульта в обратном порядке в положение «Откл.», снять с пульта питание.

Эксперимент №5: Трехосный силовой гиростабилизатор

Описание лабораторной установки

Курсовертикаль автопилота АП-15 с помощью жгутов через разъемы Г1, Г2, Г3 подключается к поверочному пульту У-780. К этому пульту через штекеры с маркировкой А, В, С подводится питание 36 В, 400 Гц, а через вилку «±27 В» — напряжение постоянного тока. Контроль напряжения переменного тока осуществляется вольтметром V_1, контроль напряжения постоянного тока — вольтметром V_2.

Порядок проведения эксперимента

Эксперимент выполняется в присутствии и под полным контролем преподавателя. Любые действия с аппаратурой производятся только с разрешения преподавателя.

1. Установить переключатели пульта «Питание», «Фаза С», П5 «Коррекция», ПВ «Поворот рам» в положение «Откл.».
2. Подвести к пульту напряжения: ~3,400 Гц, 36 В и ±27 В.
3. Установить тумблеры «Питание» и «Фаза С» в положение «Вкл.». При этом происходит разгон роторов гиромоторов. Напряжение между фазами АВ, ВС, СА контролировать по V_1, устанавливая переключатель П3 в положения АВ, ВС, СА

соответственно, выключатель «10 В — 50 В»—в положение «50 В». Напряжение ±27 В контролировать по V_2.

4. Задавая различные по величине углы курса, крена, тангажа, убедиться в том, что платформа при всех отклонениях корпуса прибора сохраняет неизменное положение в пространстве.

5. Включить горизонтальную коррекцию, установив переключатель П5 в положение «Гориз.». Переключатель П2 установить в положение «60 мА». Наблюдать горизонтальную коррекцию курсовертикали.

6. Развернуть платформу в азимуте так, чтобы оси собственного вращения гироскопов с вертикальными осями прецессии были параллельны продольной и поперечной осям самолета. Направление продольной оси самолета указывает стрелка «Направление полета» на кожухе прибора.

Для разворота платформы в азимуте установить П5 в положение «Быстр. по азим. по час.». Наблюдать азимутальную коррекцию курсовертикали. После приведения платформы в требуемое положение установить П5 в положение «Гориз.».

7. Выключить гиростабилизатор, поставив все выключатели пульта в обратном порядке в положение «Откл.», снять с пульта питание.

6. Содержание отчета

Отчет по лабораторному практикуму представляется на отдельных листах и пишется разборчивым почерком шариковой ручкой. Разрешается включать в отчет откопированные из данных методических указаний рисунки. В отчете указывается фамилия школьника, номер его класса, школы (лицея, ЦО и т.п.), название и цель работы. Приводятся схемы гироскопов и систем стабилизации, экспериментальные данные, полученные результаты лабораторной работы. Записываются выводы.

7. Контрольные вопросы

1. Что такое гироскоп, каковы его основные свойства?
2. Когда возникает гироскопический момент и какова его природа?
3. Как формулируется правило прецессии гироскопа?
4. Что такое гироскоп с двумя степенями свободы и каковы его основные свойства?
5. Что такое измерительная ось *y* двухстепенного гироскопа?
6. Чем уравновешивается в ДНГ упругий момент торсионов, возникающий при отклонении ротора гироскопа относительно корпуса?
7. В каких гироскопических приборах применяется ДНГ и как обеспечивается малое рассогласование в положении его ротора и корпуса?
8. В чем заключается принцип действия индикаторного гиростабилизатора? Какова роль гироскопа в процессе стабилизации?
9. В чем заключается принцип силовой гироскопической стабилизации?

Литература

1. Пельпор Д.С. Гироскопические системы. Ч. 1. Теория гироскопов и гиростабилизаторов. М.: Высш. шк., 1986.
2. Гироскопические системы. Ч. 2. Гироскопические приборы и системы / Д.С. Пельпор, Н.А. Михалев, В.А. Бауман и др.; Под ред. Д. С. Пельпора. М.: Высш. шк., 1988.
3. Пельпор Д.С., Матвеев В.А., Арсеньев В.Д. Динамически настраиваемые гироскопы:

Теория и конструкция. М.: Машиностроение, 1988.

НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ

ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ

Научно-образовательного центра

«Нанотехнологические системы и наноэлектроника»

кафедры «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры»

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Ответственный: к.т.н., доцент Власов Андрей Игоревич

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторного практикума по

Школе-лаборатории

НОЦ «Нанотехнологические системы и наноэлектроника»

МГТУ им. Н.Э.Баумана

«ТЕХНОЛОГИИ НАНОИНЖЕНЕРИИ»

Москва 2012

ВЛАСОВ А.И., ТОКАРЕВ С.В., РЕЗЧИКОВА Е.В., ВОЛКОВА Я.Б.

«ТЕХНОЛОГИИ НАНОИНЖЕНЕРИИ» для школьников – М.: НОЦ «Нанотехнологические системы и наноэлеткроника» МГТУ им.Н.Э. Баумана, 2012.- 16 с.

Методические указания имеют целью помочь школьникам усвоить физические основы наноинженерии, овладеть навыками и освоить методику проведения физического в области микроскопии и формирования микро- и наноструктур.

Для обучающихся в общеобразовательных учреждениях в рамках исполнения обязательств МГТУ им. Н.Э. Баумана по техническому заданию Соглашения с Департаментом образования города Москвы о социальном обслуживании населения города Москвы в части предоставления образовательных услуг в интересах города Москвы.

Табл. . Ил. . Библиогр. Назв.

УДК 621.455

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

Кафедра ИУ-4
«Проектирование и технология производства ЭС»

Журнал практических работ

по курсу: «ТЕХНОЛОГИИ НАНОИНЖЕНЕРИИ» для школьников

Для учащихся общеобразовательных школ

20__ /___ учебный год

Студент _____ Группа _____
(фамилия, и. о.)

Преподаватель_____ Допуск к экзамену (зачету)_____ Подпись_____
(фамилия, и. о.) (число)

Москва
2012

Отчет по лабораторной работе № 1 **РАБОТА С ПОЛУЧЕННЫМИ РАНЕЕ ИЗОБРАЖЕНИЯМИ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР РАЗЛИЧНЫМИ СРЕДСТВАМИ МИКРОСКОПИИ**			
дата	Оценка (max 5)	Бонус за Сложность	подпись

Цель работы:

- Получить представления о методах визуализации микро- и наноструктур.
- Оценить методы визуализации микро- и наноструктур
- Оценить типы микро- и наноструктур
- Провести обработку и анализ ранее полученных изображений

Необходимое оборудование и материалы:

- ПК, пакет программ: NanoEducator, aist-4.1.20, ImageAnalysis.3.5.0.1050, SPCR01, Gwyddion-2.25.1, gimp.2.6 под операционной системой Microsoft Windows.
- Визуализированные микро- и наноструктуры (сканы) образцов средствами СЗМ (NanoEducator, Solver PRO-47, SmartSPM&Raman AIST_NT), Раман-спектроскопии (SmartSPM&Raman AIST_NT), оптической микроскопией (ZEISS Axio Imager A2, SteREO Discovery. V8) и электронной микроскопией (Zeiss Ultra 55).

Задачи работы (4часа):

1. Выбрать один из предназначенных для проведения работы набор сканов образцов: 1 - дифракционная решетка, покрытая токопроводящей пленкой, образец 2 - пленка золота на кремниевой подложке (тестовый образец TGZ3 (маркировка фирмы НТ МДТ), образец 3 – слои графита на кремниевой подложке или любой другой по выбору преподавателя).
2. Провести оценку получаемых сканов различными методами микроскопии, по средствам использования пакета сопутствующих программ.
3. Осуществить анализ микро и наноструктур выбранных образцов средствам использования пакета сопутствующих программ.
4. Сделать выводы о недостатках и преимуществах, а так же о различиях методов исследования производственных технологических процессов и структур элементов ЭС. Оформить отчет и представить его к защите.

Отчет по лабораторной работе № 2 **ПОДГОТОВКА И ПРОВЕДЕНИЕ СЗМ - ЭКСПЕРИМЕНТА**			
дата	Оценка (max 5)	Бонус за Сложность	подпись

Цель работы:

- Изучить основы сканирующей зондовой микроскопии;
- Изучитье конструкцию и принцип работы СЗМ NanoEducator;
- Самостоятельно получить СЗМ изображения;
- Обработать экспериментальные результаты, сделать выводы;

Необходимое оборудование и материалы:

- СЗМ NanoEducator_v.I, ПК, пакет программ: NanoEducator, AMCAP, ImageAnalysis.3.5.0.1050, gimp.2.6 под операционной системой Microsoft Windows XP SP2.
- Пакет сопроводительной документации по использованию СЗМ NanoEducator_v.I.
- Набор образцов, по выбору преподавателя.

Задачи работы (4 часа):

1. Изучить на практике общую конструкцию прибора NanoEducator (или иного СЗМ прибора по заданию преподавателя) используя руководство пользователя и ресурсы сети Интернет: (http://nt-mdt.ru , http://nanotech.iu4.bmstu.ru).
2. Изучить базовые принципы работы с программой управления прибором NanoEducator в режиме получения изображения (скана) поверхности.
3. Получить СЗМ изображение. Получение изображения выполняется на одном приборе под присмотром преподавателя.
4. Рекомендуется использовать в качестве образца структуры с заранее предполагаемой или определенной структурой, CD/DVD диск, микроканальная пластина, тестовая решетка серии TGX1 (поставляемую в комплекте с комплексом NanoEducator). TGX1 представляет собой массив квадратных колонн на кремниевой подложке. Период решетки 3±0,05 мкм, высота 0,6 мкм, радиус закругления менее 10 нм, зона эффективного сканирования 20x20 мкм.
5. Проанализировать результатов работы, сформулировать краткие выводы по работе, оформить отчет и представить его к защите.

Отчет по лабораторной работе № 3 **ВИЗУАЛИЗАЦИЯ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР С ПОМОЩЬЮ СЗМ. КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ**			
дата	Оценка (max 5)	Бонус за Сложность	подпись

Цель работы:

- Ознакомиться с понятием калибровки измерительных приборов.
- Осуществить калибровку СЗМ NanoEducator_v.I.
- Провести Фурье-спектрометрический анализ.
- Получить практические навыки в области обработки и количественного анализа микро и наноструктур, СЗМ изображений, сделать выводы.

Необходимое оборудование и материалы:

- СЗМ NanoEducator_v.I, ПК, пакет программ: NanoEducator, AMCAP, ImageAnalysis.3.5.0.1050, gimp.2.6 под операционной системой Microsoft Windows XP SP2.
- Пакет сопроводительной документации по использованию СЗМ NanoEducator_v.I.
- Набор тестовых решеток серии TGZ1-3, TGX1.

Задачи работы (3 часа):

1. Выбрать одину из предназначенных для проведения работы тестовых решеток серии TGZ1-3, TGX1.
2. Осуществить подбор зонда с наиболее характерной амплитудно-частотной характеристикой (одиночный симметричный максимум) согласно процедуре представленной в руководстве пользователя комплекса NanoEducator.
3. Получить эталонное СЗМ изображение. Получение изображения выполняется на одном приборе под контролем преподавателя.
4. Провести ImageAnalysis: Шероховатости поверхности (Surface roughness), и средствами Фурье-спектрометрического анализа (Fourier Spectrum) осуществить калибровку (Calibration).
5. Проанализировать результаты работы, сформулировать краткие выводы по работе, оформить отчет и представить его к защите.

Отчет по лабораторной работе № 4 **ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ ТУННЕЛЬНОЙ МИКРОСКОПИИ.**			
дата	Оценка (max 5)	Бонус за Сложность	подпись

Цель работы:

- Ознакомиться с принципами работы сканирующего туннельного микроскопа (СТМ)
- Изучить принципы работы датчика туннельного тока в приборе NanoEducator и измерить его основных параметров. Получить навыки туннельной спектроскопии поверхности твердых тел.
- Получить топографию поверхности твердых тел средствами СТМ.
- Обработать полученное изображение в режиме СТМ моды, сделать выводы.

Необходимое оборудование и материалы:

- СЗМ NanoEducator_v.I,СТМ **комплекс «Умка-02-Е»,** ПК, пакет программ: NanoEducator, AMCAP, STM, ImageAnalysis.3.5.0.1050, gimp.2.6 под операционной системой Microsoft Windows XP SP2.
- Пакет сопроводительной документации по использованию СЗМ NanoEducator_v.I. СТМ **комплекса «Умка-02-Е».**
- Набор образцов проводящих электрический ток (Слюда с золотым покрытием; стекло, покрытое смешанным оксидом индия и олова (ITO); текло, покрытое хромом), и др. по выбору преподавателя.

Задачи работы (3 часа):

1. Выбрать один из предназначенных для проведения работы образцов.
2. Определить основные параметры датчика туннельного тока (коэффициент преобразования туннельного тока в напряжение, максимальный и минимальный измеряемый ток).
3. Провести туннельную спектроскопию поверхности образца (зависимость туннельного тока от приложенного напряжения);
4. Получение топографии поверхности исследуемого образца в режиме постоянного туннельного тока.
5. Проанализировать результатов работы, сформулировать краткие выводы по работе, оформить отчет и представить его к защите.

Отчет по лабораторной работе № 5 **ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ В НЕКОНТАКТНОМ РЕЖИМЕ**			
дата	Оценка (max 5)	Бонус за Сложность	подпись

Цель работы:

- Ознакомиться с физическими принципами работы сканирующего атомного-силового микроскопа.
- Провести исследования поверхности твердых тел в нанометрическом масштабе методом неконтактной атомно-силовой микроскопии.
- Определить основные параметры датчика силового взаимодействия прибора NanoEducator и параметров СЗМ эксперимента;
- Получить топографию поверхности и фазового контраста исследуемого образца.

Необходимое оборудование и материалы:

- СЗМ NanoEducator_v.I, ПК, пакет программ: NanoEducator, AMCAP, ImageAnalysis.3.5.0.1050, gimp.2.6 под операционной системой Microsoft Windows XP SP2.
- Пакет сопроводительной документации по использованию СЗМ NanoEducator_v.I.
- Образец для исследования: фрагмент компакт-диска со снятым защитным слоем или любой другой по выбору преподавателя.

Задачи работы (3 часа):

1. Выбрать один из предназначенных для проведения работы образцов.
2. Определить основные параметры датчика силового взаимодействия (резонансная частота зонда, добротность зондового датчика).
3. Выполнить спектроскопию (измерение зависимости силы взаимодействия (амплитуды колебаний зонда) от расстояния зонд-образец).
4. Получить топографию поверхности и фазового контраста исследуемого образца.
5. Проанализировать результатов работы, сформулировать краткие выводы по работе, оформить отчет и представить его к защите.

Отчет по лабораторной работе № 6 **ПОМЕХИ И ШУМЫ В СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ**			
дата	Оценка (max 5)	Бонус за Сложность	подпись

Цель работы:

- Ознакомиться с основными элементами сканирующего зондового микроскопа, являющимися источниками шумов и дефектов при сканировании изображения.
- Изучить характеристики работы пьезокерамического двигателя.
- Определить форму зонда характеризующую разрешение СЗМ.

Необходимое оборудование и материалы:

- СЗМ NanoEducator_v.I, ПК, пакет программ: NanoEducator, AMCAP, ImageAnalysis.3.5.0.1050, gimp.2.6 под операционной системой Microsoft Windows XP SP2.
- Пакет сопроводительной документации по использованию СЗМ NanoEducator_v.I.
- Набор тестовых решеток серии TGT1, TGX1.

Задачи работы (3 часа):

1. Изученить основные характеристи пьезокерамики и сканера (резонансная частота, диапазон перемещений, нелинейность, гистерезис, ползучесть, температурный дрейф).
2. Исследовать основных характеристик сканера по тестовому образцу TGX1;
3. Оценить влияние геометрии зонда на разрешение СЗМ при отображении различных поверхностных особенностей. Определение формы зонда по тестовой решетке TGT1.
4. Проанализировать результатов работы, сформулировать краткие выводы по работе, оформить отчет и представить его к защите.

Отчет по лабораторной работе № 7 **ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЗОНДОВ ДЛЯ СЗМ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ**			
дата	Оценка (max 5)	Бонус за Сложность	подпись

Цель работы:

- Ознакомиться с принципами электрохимического травления.
- Изучить виды зондов и их методы формирования.
- Определить форму полученного зонда, охарактеризовать возможное разрешение реализуемое полученным СЗМ зондом.

Необходимое оборудование и материалы:

- Микрометрические весы ACCULAB VICON, Устройство травление игл (УТИ), СЗМ NanoEducator_v.I, СТМ комплекс «Умка-02-Е», ПК, пакет программ: NanoEducator, AMCAP, STM, gimp.2.6 под операционной системой Microsoft Windows XP SP2.
- Пакет сопроводительной документации по использованию СЗМ NanoEducator_v.I., СТМ комплекса «Умка-02-Е»
- Набор тестовых решеток серии TGT1.

Задачи работы (3 часа):

1. Изучить процесс электрохимического травления вольфрама в 5-ти процентном растворе KOH или NaOH.
2. Сравнить методики создания зондов, их формирования и заточки, для различных СЗМ микроскопов.
3. Оценить влияние геометрии зонда на разрешение СЗМ при отображении различных поверхностных особенностей. Определение формы зонда по тестовой решетке TGT1.
4. Проанализировать результатов работы, сформулировать краткие выводы по работе, оформить отчет и представить его к защите.

Отчет по лабораторной работе № 8 **СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ ЛИТОГРАФИЯ**			
дата	Оценка (max 5)	Бонус за Сложность	подпись

Цель работы:

- Ознакомиться с основами сканирующей зондовой литографии.
- Изучить различные виды литографии, выполняемые с помощью СЗМ NanoEducator_v.I;
- Оценить методы модификации поверхности твердых тел, на микро- и нано-уровне.
- Получить практические навыки выполнения динамической силовой литографии.

Необходимое оборудование и материалы:

- СЗМ NanoEducator_v.I, ПК, пакет программ: NanoEducator, AMCAP, ImageAnalysis.3.5.0.1050, gimp.2.6 под операционной системой Microsoft Windows XP SP2.
- Пакет сопроводительной документации по использованию СЗМ NanoEducator_v.I.
- Образец для выполнения литографии: фрагмент компакт-диска без записи информации со снятым защитным слоем.

Задачи работы (3 часа):

1. Изучить физические основы зондовой нанотехнологии. Изучить виды сканирующей зондовой литографии.
2. Нанести тестовое изображение (nanoworld.bmp) на полимерную поверхность в режиме динамической силовой литографии, выбрать оптимальные условия литографии;
3. Выполнить литографию авторского изображения (по желанию студента).
4. Проанализировать результаты работы, сформулировать краткие выводы по работе, оформить отчет и представить его к защите.

Отчет по лабораторной работе № 9 **ОПТИЧЕСКАЯ МИКРОСКОПИЯ**			
дата	Оценка (max 5)	Бонус за Сложность	подпись

Цель работы:

- Ознакомиться с физическими основами оптической микроскопии.
- Изучить схемы реализации микроскопов, по схеме Аббе и прямой оптический микроскоп.
- Проанализировать методы исследования на оптических микроскопах: светлое поле, темное поле, поляризация, люминесценция в падающем свете;
- Получить практические навыки в работе с профессиональными оптическими микроскопами.

Необходимое оборудование и материалы:

- Оптические микроскопы ZEISS Axio Imager A2, SteREO Discovery. V8, программа обработки изображений: gimp.2.6 под операционной системой Microsoft Windows XP SP2.
- Пакет сопроводительной документации по использованию ZEISS Axio Imager A2, SteREO Discovery. V8
- Набор образцов, по выбору преподавателя.

Задачи работы (3 часа):

1. Изучить основные физические принципы реализации методов исследования оптическими микроскопами.
2. Исследовать образцы различными методами в зависимости от его примирительности.
3. Подробно описать один из методов.
4. Проанализировать результатов работы, сформулировать краткие выводы по работе, оформить отчет и представить его к защите.

Отчет по лабораторной работе № 10 **ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКИХ ПЛЕНОК. ЭЛЛИПСОМЕТРИЯ**			
дата	Оценка (max 5)	Бонус за Сложность	подпись

Цель работы:

- Ознакомиться с физическими принципами спектральной эллипсометрии с бинарной модуляцией состояния поляризации (БМСП).
- Изучить схемы реализации спектральных эллипсометров.
- Проанализировать методы диагностики и контроля тонких пленок.
- Получить практические навыки исследования оптических характеристики тонких пленок

Необходимое оборудование и материалы:

- Эллипсометр « ЭЛЬФ», программа управления эллипосметром: Spectral Ellipsometer под операционной системой Microsoft Windows XP SP2.
- Пакет сопроводительной документации по использованию эллипсометра «ЭЛЬФ»
- Набор образцов тонких пленок, по выбору преподавателя.

Задачи работы (4 часа):

1. Изучить основные физические принципы измерений оптических характеристик методами эллипсометрии.
2. Провести настройку оптической системы эллипсометра, откалибровать.
3. Исследовать оптические параметры тонких пленок: толщины оптически прозрачных и полупрозрачных слоев в многослойных структурах, качество формирований и обработки тонких пленок и шероховатость поверхностей.
4. Проанализировать результатов работы, сформулировать краткие выводы по работе, оформить отчет и представить его к защите.

Отчет по лабораторной работе № 11 **СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АТОМНЫХ ЭМИССИОННЫХ ЛИНИЙ В ПЛЕНКЕ TI.**			
дата	Оценка (max 5)	Бонус за Сложность	подпись

Цель работы:

- Ознакомиться с физическими принципами работы волоконно-оптической спектрометрии.
- Оценить уровень разрешения волоконно-оптического спектрометра.
- Изучить схемы реализации оптических спектрометров.
- Проанализировать методы и получить навыки использований спектрального анализа образцов.

Необходимое оборудование и материалы:

- Волоконно-оптический спектрометр OceanOptics HR-4000, программа управления спектрометром: SpectraSuite под операционной системой Microsoft Windows XP SP2.
- Пакет сопроводительной документации по использованию волоконно-оптического спектрометра OceanOptics HR-4000
- Набор образцов, по выбору преподавателя.

Задачи работы (3 часа):

1. Изучить основные физические принципы регистрации спектров CDD-камерой (ПЗС - детектором).
2. Провести калибровку спектрометра OceanOptics HR-4000 по длинам волн
3. Исследовать спектральные характеристики выбранного образца.
4. Оценить атомную эмиссию в пленке Ti.
5. Проанализировать результатов работы, сформулировать краткие выводы по работе, оформить отчет и представить его к защите.

Отчет по лабораторной работе № 12 **КОНФОКАЛЬНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА (РАМАН-СПЕКТРОСКОПИЯ) В СОЧЕТАНИИ С АСМ**			
дата	Оценка (max 5)	Бонус за Сложность	подпись

Цель работы:

- Ознакомиться с физическими принципами работы конфокального микроскопа и эффектом Рамана (комбинационным рассеянием света(КРС)).
- Изучить схемы регистрации КРС.
- Провести комплексное исследование, в котором представить информацию о распределении оптических свойств образца и его химического состава, и совместить их с результатами АСМ.

Необходимое оборудование и материалы:

- Комплекс: SmartSPM&Raman AIST_NT, ПК, пакет программ: aist-4.1.20, SPCR01, Gwyddion-2.25.1, gimp.2.6 под операционной системой Microsoft Windows.
- Пакет сопроводительной документации по использованию комплекса SmartSPM&Raman AIST_NT
- Набор образцов, по выбору преподавателя.

Задачи работы (4 часа):

1. Изучить основные физические принципы регистрации спектров CDD-камерой (ПЗС - детектором).
2. Измерить спектральные характеристики выбранного образца, построить карту распределения спектров по образцу.
3. Измерить ту же область образца в режиме АСМ моды.
4. Совместить результаты измерений различными методами.
5. Проанализировать результатов работы, сформулировать краткие выводы по работе, оформить отчет и представить его к защите.

Отчет по лабораторной работе № 13 **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КЛАССА ЧИСТОТЫ ЧИСТОГО ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПОМЕЩЕНИЯ (ЧПП)/ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ**			
дата	Оценка (max 5)	Бонус за Сложность	подпись

Цель работы:

- Ознакомиться с культурой работы в чистых помещениях, исследовательских лабораториях.
- Изучить методы контроля запыленности чистых помещений.
- Провести комплексную оценку чистоты исследовательской лаборатории, а так же защиты её от внешних помех (шум, вибрация).

Необходимое оборудование и материалы:

- ПК, пакет программ: Matlab&Simulinc, gimp.2.6 под операционной системой Microsoft Windows.
- Таблицы оценки чистоты помещений.

Задачи работы (2 часа):

1. Изучить стандарты чистых помещений, распределение воздушных потоков, а так же наличие внешних помех (шумов и вибраций).
2. Ознакомиться с методами определения запыленности: седиментационным и оптическим.
3. Выполнить моделирование процессов и расчёт запыленности помещения.
4. Проанализировать результатов работы, сформулировать краткие выводы по работе, оформить отчет и представить его к защите.

Отчет по лабораторной работе № 14 **УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОТЧИСТКА ОБРАЗЦОВ, КОНТРОЛЬ ЧИСТОТЫ ОТЧИСТКИ**			
дата	Оценка (max 5)	Бонус за Сложность	подпись

Цель работы:

- Ознакомиться с физико-химическими принципами УЗ-отчистки.
- Провести УЗ отчистку образцов, оценить применимость этого вида отчистки к тем или иным образцам.
- Провести контроль отчищенных образцов

Необходимое оборудование и материалы:

- Ультрозвуковая ванна ПК, Оптические микроскопы ZEISS Axio Imager A2, SteREO Discovery. V8, СЗМ NanoEducator_v.I, эллипсометр «ЭЛЬФ», ПК, пакет сопутствующих программ.
- Образцы с различными типами загрязнений и поверхностных структур.

Задачи работы (2 часа):

1. Провести УЗ отчистку образцов и оценить качество очистки.
2. Сравнить методику УЗ отчистки с прочими методами отчистки образцов.
3. Проанализировать результатов работы, сформулировать краткие выводы по работе, оформить отчет и представить его к защите.

Отчет по лабораторной работе № 15 **ИОННО-ЛУЧЕВАЯ ОБРАБОТКА ОБРАЗЦОВ**			
дата	Оценка (max 5)	Бонус за Сложность	подпись

Цель работы:

- Ознакомиться с физико-химическими принципами работы ионного источника.
- Изучить методы модификации поверхностных свойств образцов в процессе ионно-лучевой обработки.
- Провести комплексную оценку вакуумных методов обработки поверхности (травление, полировка, отчистка и активация).

Необходимое оборудование и материалы:

- Высоко-вакуумная установка MANTIS с автономным источников ионов.
- СЗМ NanoEducator_v.I, эллипсометр «ЭЛЬФ», ПК, пакет программ: NanoEducator, AMCAP, ImageAnalysis.3.5.0.1050, gimp.2.6 под операционной системой Microsoft Windows XP SP2.
- Пакет сопроводительной документации по использованию вакуумной установки MANTIS, СЗМ NanoEducator_v.I.
- Образцы пленок с модифицированными и не модифициорваными поверхностями.

Задачи работы (4 часа):

1. Ознакомиться с этапами работы на высоко-вакуумной установки MANTIS.
2. Изучить принцип работы автономного источника ионов
3. Исследовать средствами СЗМ и эллипсометрии полученные образцы
4. Проанализировать результатов работы, сформулировать краткие выводы по работе, оформить отчет и представить его к защите.

Отчет по лабораторной работе № 16 **НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЯ МЕТОДОМ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА**			
дата	Оценка (max 5)	Бонус за Сложность	подпись

Цель работы:

- Ознакомиться с физико-химическими принципами работы магнетрона.
- Изучить ионно-плазменный метод нанесения тонкопленочных покрытий.
- Провести комплексную оценку вакуумных методов формирования тонких пленок.

Необходимое оборудование и материалы:

- Высоко-вакуумная установка MANTIS с автономным источников ионов.
- СЗМ NanoEducator_v.I, эллипсометр «ЭЛЬФ», ПК, пакет программ: NanoEducator, AMCAP, ImageAnalysis.3.5.0.1050, gimp.2.6 под операционной системой Microsoft Windows XP SP2.
- Пакет сопроводительной документации по использованию вакуумной установки MANTIS, СЗМ NanoEducator_v.I.
- Образцы пленок нанесенных магнетронами на постоянно и переменном токе.

Задачи работы (4 часа):

1. Ознакомиться с этапами работы на высоко-вакуумной установки MANTIS.
2. Изучить принцип катодного (ионного) нанесения пленок ионно-плазменным методом по диодному типу на постоянном и ВЧ токах.
3. Исследовать нанесенные пленки средствами СЗМ и эллипсометрии, и привести анализ методов нанесения пленок.
4. Проанализировать результатов работы, сформулировать краткие выводы по работе, оформить отчет и представить его к защите.

Отчет по лабораторной работе № 17 **НАНЕСЕНИЕ ФОТОРЕЗИСТА НА ПЛАСТИНУ МЕТОДОМ ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЯ, ЭКСПОНИРОВАНИЕ РИСУНКА НА ПЛАСТИНУ**			
дата	Оценка (max 5)	Бонус за Сложность	подпись

Цель работы:

- Ознакомиться с физико-химическими принципами процессов происходящих в структуре фоторезиста во время экспонирования рисунка на пластину.
- Провести процесс экспонирования рисунка на пластину и нанесения фоторезиста методом центрифугирования.
- Провести оптически контроль пластины с экспонированным на неё рисунком.

Необходимое оборудование и материалы:

- Центрифуга с вакуумным столиком, установка фотоэкспонирования, Оптические микроскопы ZEISS Axio Imager A2, SteREO Discovery. V8, ПК, пакет сопутствующих программ.
- Пакет сопроводительной документации по использованию оборудования.
- Чистые пластины

Задачи работы (2 часа):

1. Ознакомиться с этапами фотохимических процессов формирования структур на поверхности пластины.
2. Сравнить методы зондовой литографии с методами проекционной литографии.
3. Проанализировать результатов работы, сформулировать краткие выводы по работе, оформить отчет и представить его к защите.

Отчет по лабораторной работе № 18 **ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ МНОГОПРОХОДОВЫМ МЕТОДОВ МАГНИТНО СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ (МСМ)**			
дата	Оценка (max 5)	Бонус за Сложность	подпись

Цель работы:

- Ознакомиться с физическими принципами МСМ.
- Изучить метод регистрации магнитных характеристик образца.
- Провести комплексное исследование, в котором представить информацию о распределении магнитного поля на поверхности образца, и совместить их с результатами АСМ.

Необходимое оборудование и материалы:

- Комплекс: SmartSPM&Raman AIST_NT, ПК, пакет программ: aist-4.1.20, SPCR01, Gwyddion-2.25.1, gimp.2.6 под операционной системой Microsoft Windows.
- Пакет сопроводительной документации по использованию комплекса SmartSPM&Raman AIST_NT
- Набор образцов, по выбору преподавателя, например, кусок винчестера.

Задачи работы (4 часа):

1. Изучить основные физические принципы МСМ
2. Измерить магнитные характеристики выбранного образца, построить топологическую карту средствами АСМ и МСМ.
3. Совместить результаты измерений различными методами.
4. Проанализировать результатов работы, сформулировать краткие выводы по работе, оформить отчет и представить его к защите.

Отчет по лабораторной работе № 19 **ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНОЙ РАЗНОСТИ ПОТЕНЦИАЛОВ МЕЖДУ ЗОНДОМ И ОБРАЗЦОМ МНОГОПРОХОДОВЫМ МЕТОМ ЗОНДА КЕЛЬВИНА**			
дата	Оценка (max 5)	Бонус за Сложность	подпись

Цель работы:

- Ознакомиться с физическими принципами работы в АСМ в режиме метода зонда Кельвина.
- Изучить схемы измерения образца метода зонда Кельвина.
- Провести комплексное исследование, в котором представить информацию о распределении контактной разности потенциалов между зондом и образцом, и совместить их с результатами АСМ.

Необходимое оборудование и материалы:

- Комплекс: SmartSPM&Raman AIST_NT, ПК, пакет программ: aist-4.1.20, SPCR01, Gwyddion-2.25.1, gimp.2.6 под операционной системой Microsoft Windows.
- Пакет сопроводительной документации по использованию комплекса SmartSPM&Raman AIST_NT
- Набор образцов, по выбору преподавателя.

Задачи работы (4 часа):

1. Изучить основные физические принципы метода зонда Кельвина.
2. Измерить разности потенциалов между зондом и образцом, построить топологическую карту средствами АСМ и метода зонда Кельвина.
3. Совместить результаты измерений различными методами.
4. Проанализировать результатов работы, сформулировать краткие выводы по работе, оформить отчет и представить его к защите.

НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ

ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ

«Новейшие технологии, новейшие материалы: как сделать небывалое?»

кафедры «Технологии сварки и диагностики»

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Ответственный: к.т.н., профессор Волков Станислав Степанович

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторного практикума по
Школе-лаборатории
кафедры «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э.Баумана

Изучение конструкции оборудования для ультразвуковой сварки пластмасс

Москва 2012

Волков С.С., Коберник Н.В., Коновалов А.В. Исследование влияния основных параметров УЗС на прочность сварных соединений: Методические указания к выполнению практикума по Школе – лаборатории кафедры «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана «Исследование влияния основных параметров УЗС на прочность сварных соединений». – М.: «технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 8с.

В лабораторной работе исследуются технологические процессы, протекающие в процессе ультразвуковой сварке полимерных пленок, изучается способ ультразвуковой сварки пластмасс, отрабатываются режимы УЗС пленок. Провести сварку пленок по схеме с фиксированным зазором и с фиксированной осадкой и дать сравнительный анализ этих схем сварки.

Методические указания имеют целью помочь школьникам усвоить основные принципы и способы УЗС полимерных пленок, научиться сваривать ультразвуком пленки и оценивать их прочность в зависимости от параметров сварки. Овладеть навыками и освоить методику проведения экспериментов по свариваемости пластмасс.

Для обучающихся в общеобразовательных учреждениях в рамках исполнения обязательств МГТУ им. Н.Э. Баумана по техническому заданию Соглашения с Департаментом образования города Москвы о социальном обслуживании населения города Москвы в части предоставления образовательных услуг в интересах города Москвы.

Табл. Ил. Библиогр. Назв.

УДК 621.791

1.Цель работы.

Ознакомление с оборудованием для ультразвуковой сварки полимерных и композиционных материалов. Определение влияния основных технологических параметров режима на качество сварки полимерных пленок.

2.Оборудование и материалы.

2.1 Ультразвуковая сварочная машина УПМ-21М;
2.2 Ультразвуковой генератор УЗГ5-1,6;
2.3 Образцы полимерных материалов;
2.4 Разрывная машина;
2.5 Микрометр;
2.6 Ножницы;
2.7 Щуп для контроля зазора.

3.Содержание и форма отчета.

Название и цель работы:
3.2 Привести кинематическую схему установки УПМ-21М;
3.3 Привести технические характеристики УПМ-21М;
3.4 Описать ход выполнения работы;
3.5 Привести данные, полученные в ходе выполнения работы;
3.6 Вывод по проделанной работе.

4.Содержание работы.

Способ ультразвуковой сварки пластмасс (рис. №1) заключается в том, что электрические колебания ультразвуковой частоты (20-30 кГц), вырабатываемые генератором, преобразуются в механические колебания сварочного инструмента- волновода (4) и вводятся в свариваемый материал (5). При этом часть энергии механических колебаний переходит в тепловую, что приводит к нагреву зоны контакта соединяемых деталей до температуры вязкотекучего состояния. Для обеспечения надлежащих условий ввода механических колебаний и создания тесного контакта между поверхностями, доведенными до температуры вязкотекучего состояния, соединяемые детали сдавливаются с определенным усилием между рабочим концом волновода-инструмента (4) и его опорой (5).

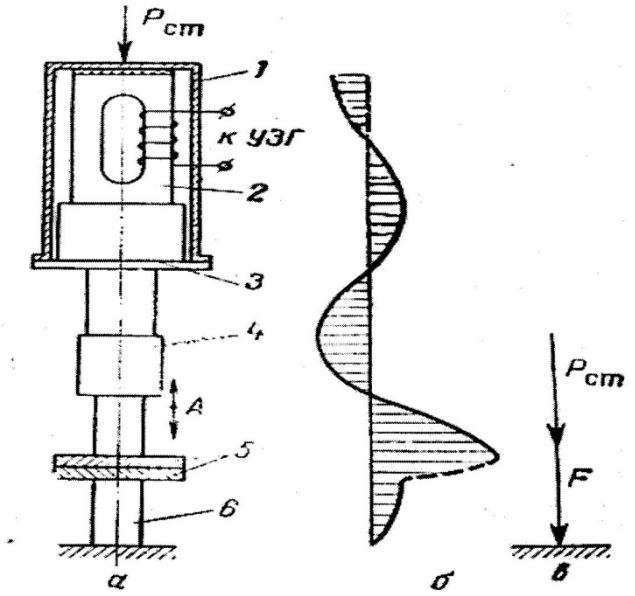

Рис. №1. Схема ультразвуковой сварки с нормальным вводом колебаний.

(а) Схема установки;

3. *Корпус преобразователя;*
4. *Магнитострикционный преобразователь (пакет) с обмоткой;*
5. *Трансформатор упругих колебаний;*
6. *Волновод-инструмент;*
7. *Свариваемые детали;*
8. *Опора.*

(б) Эпюра амплитуды смещения колебательной системы;

(в) Расположение векторов статического давления $P_{ст}$ и динамического усиления F.

Механические колебания и давление в этом случае действуют по одной линии перпендикулярно к свариваемым поверхностям.

Основными отличительными чертами ультразвуковой сварки пластмасс являются:

- возможность сварки по поверхностям, загрязненным различными продуктами;
- локальное выделение тепла в зоне сварки, возможность сварки некоторых пластмасс на большом удаление удалении от места ввода ультразвуковой энергии;
- высокая производительность процесса;
- легкость автоматизации;

- чистота сварных соединений и т.д.

Основными параметрами процесса ультразвуковой сварки являются:

- частота колебаний инструмента f;
- давление в месте контакта $P_{ст}$;
- амплитуда колебаний инструмента A;
- длительность озвучивания $t_{СВ}$.

Шовная ультразвуковая сварка полимерных пленок и синтетических тканей выполняется напротяг, на вращающемся ролике; при этом возможны две схемы: сварка с фиксированным зазором и сварка с постоянным давлением. Сварка с фиксированным (постоянным) зазором между ультразвуковым сварочным инструментом-волноводом и опорой, выбранным в соответствии с заданной толщиной свариваемых материалов, является наиболее простой и распространенной в настоящее время. Однако в случае сварки полимерных материалов, имеющих в исходном состоянии разнотолщинность, возможно проявление брака вследствие того, что в листах, где суммарная толщина пленок оказывается меньше номинальной толщины, исходя из которой был установлен зазор, образуется непровар, а в местах с большей толщиной - прожог (рис №2).

Основной особенностью сварки с постоянным давлением является деформация материала под рабочим концом волновода-инструмента, обусловленная термоползучестью и выдавливанием пластифицированного материала из сварочной зоны. При этом, при соблюдении определенных условий процесса (постоянство давления, заданная скорость перемещения и определенная интенсивность (амплитуда) ультразвуковых колебаний) наблюдается явление автостабилизации толщины шва. Оно вызывается тем, что в процессе вытеснения материала происходит приближение холодного торца волновода к зоне максимального тепловыделения. Это вызывает увеличение теплоотвода из сварочной зоны. При некотором определенном значении равновесие между тепловыделением и теплоотводом. В результате температура в сварочной зоне снижается, и дальнейшее утоньшение шва прекращается. В сварочной технике иногда применяют и комбинацию этих способов сварки.

Из названных выше основных параметров процесса ультразвуковой сварки частота колебаний волновода-инструмента для конкретной сварочной машины является постоянной, а амплитуда колебаний - трудно контролируемой. Поэтому в процессе настройки режима они остаются постоянными, а в качестве переменных параметров используют сварочное давление и скорость сварки (скорость перемещения материала). Величины этих параметров зависят от марки материала и его толщины, и подбираются, как правило, экспериментально.

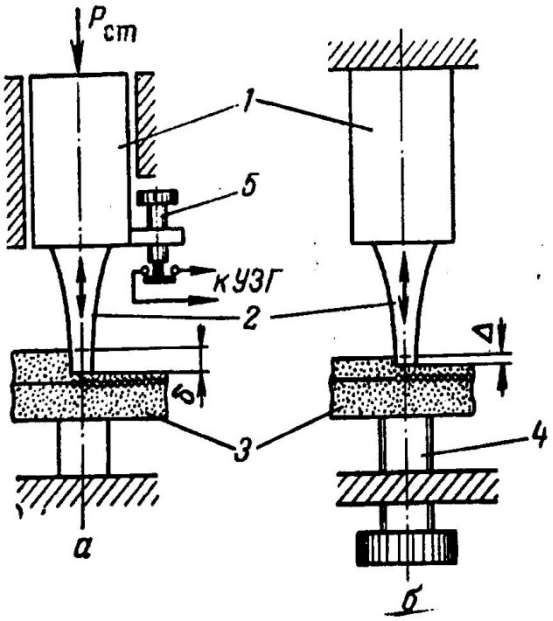

Рис.2. Сварка по схеме с фиксированной осадкой (а) и фиксированным зазором (б)

1. *Магнитострикционный преобразователь;*
2. *Волновод-инструмент;*
3. *Свариваемый материал;*
4. *Регулировочный винт-опора;*
5. *Регулировочный винт для отключения ультразвуковых колебаний.*

Ориентировочные режимы сварки различных пленок приведены в таблице 1. Амплитуда А = 25... 30 мкм. Площадь контакта инструмента-волновода с пленкой (2-3)х1,5мм.

Таблица1

Материал пленки	**Сварочное усилие, Н**	**Скорость сварки, м/с**	**Относительная прочность сварного соединения в % к основному материалу**

Полиэтилен + целлофан	100-150	0,14	40-50
Полиэтилен + лавсан	40-60	0,14	40-50
Полиэтилен	40-60	-	20-30
Саран	40	(0,8-2,0)*10~^{2}	70-80
Полипропилен	30	(1,1-1,3)*10"^{2}	70-80

Порядок выполнения работы.

Ознакомиться с устройством и работой сварочной машины УПМ-21 и источником питания EPU5-1,6 по техническому описанию и инструкциям эксплуатации;

Включить источник питания и сварочную машину;

Путем изменения скорости подачи сварочного усилия и зазора между опущенным до конца УЗ инструментом-волноводом и его опорой, экспериментально подобрать режим сварки для полиэтиленовой пленки;

Сварить на выбранном режиме образцы из чистой полиэтиленовой пленки и загрязненной (пыль, масляная пленка);

Полученные образцы испытать на разрывной машине и сравнить результаты;

Полученные результаты занести в журнал;

Составить отчёт по выполненной работе.

Контрольные вопросы.

В чем сущность сварки с фиксированным зазором и постоянным давлением?;

Особенности схем ультразвуковой сварки полимерных и композитных материалов;

Объяснить устройство и работу акустической сварочной головки;
Объяснить принцип работы ультразвукового генератора;
Назвать основные параметры ультразвуковой сварки;
Объяснить устройство и работу сварочной машины УПМ-21.

Содержание отчета

Отчет по лабораторному практикуму представляется на отдельных листах и пишется разборчивым почерком чернилами или шариковой ручкой. В отчете указывается фамилия школьника, номер его класса, школы (лицея, ЦО и т.п.), название и цель работы. Приводятся схема установки, таблицы экспериментальных результатов, результаты графического представления и % аппроксимации экспериментальных данных. Схемы и графики можно выполнять карандашом. В отчет заносится таблица с калибровочными коэффициентами. Записываются выводы.

Список литературы.

1. Волков С.С. Сварка и склеивание полимерных материалов: учебное пособие для вузов. - М.: Химия, 2001. 376 с.

2. Гуль В.Е., Акутин М.С. Основы переработки пластмасс. - М.: Химия, 1985.399 с.

3. Каменев Е.И., Мясников Г.Д., Платонов М.П. Применение пластических масс: справочник. - JL: Химия, 1985. 448с.

4. Донской А.В., Келлер О.К., Кратыш Г.С. Ультразвуковые электротехнические установки, 2е издание, переработанное и дополненное - JL: Электроиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. 208с.

5. Волков С.С., Орлов Ю.Н., Черняк Б.Я. Сварка пластмасс ультразвуком. - М.: Химия, 1974. 267с.

6. Волков С.С., Черняк Б.Ю. Сварка пластмасс ультразвуком, 2е издание, переработанное и дополненное. - М.: Химия 1986. 254с.

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторного практикума по
Школе-лаборатории
кафедры «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э.Баумана

Изучение конструкции оборудования для ультразвуковой сварки пластмасс

Москва 2012

Волков С.С. Изучение конструкции оборудования для ультразвуковой сварки пластмасс: Методические указания к выполнению лабораторного практикума по Школе-лаборатории кафедры «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана «Изучение конструкции оборудования для ультразвуковой сварки пластмасс». – М.: Кафедра «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. -14с.

В лабораторной работе исследуются параметры режима ультразвуковой сварки пластмасс путем изменения скорости сварки, сварочного давления и зазора между волноводом и свариваемым изделием. Изучается оборудование для УЗС пластмасс, экспериментальная сварка изделий из пластмасс с целью определения оптимальной прочности и качества изделий.

Методические указания имеют целью помочь школьникам усвоить сущность и физику процесса ультразвуковой сварки пластмасс, механизм разогрева пластмасс при УЗС, овладеть навыками и освоить методику проведения экспериментов по подбору режимов сварки: амплитуды колебаний, сварочного статического давления, частоты колебаний и времени сварки.

Для обучающихся в общеобразовательных учреждениях в рамках исполнения обязательств МГТУ им. Н.Э. Баумана по техническому заданию Соглашения с Департаментом образования города Москвы о социальном обслуживании населения города Москвы в части предоставления образовательных услуг в интересах города Москвы.

Табл. Ил. Библиогр. Назв.

УДК 621.791

Лабораторная работа № 1

«Оборудование для ультразвуковой сварки пластмасс»

1. Цель работы

1. Ознакомиться с устройством и изучить принцип работы ультразвуковой сварочной машины УПМ-21.
2. Ознакомиться с устройством и изучить принцип работы ультразвуковой сварочной машины МТУ-1,5-ЗУ4.
3. Ознакомиться с инструкцией по эксплуатации ультразвукового генератора УЗГ5-1,6
4. Ознакомиться с инструкцией по эксплуатации ультразвукового генератора УЗГЗ-0,4.
5. Ознакомиться с техническими характеристиками ультразвуковых генераторов, применяемых при ультразвуковой сварке пластмасс.

2. Порядок выполнения работы.

Назначение и краткое описание основных узлов ультразвуковых сварочных машин.

Основные элементы машин для ультразвуковой сварки.

Ультразвуковые сварочные машины обычно состоят из следующих основных элементов:

- сварочный узел (акустический узел),
- опора,
- механизм давления (механизм перемещения подвижных элементов),
- вспомогательное устройство,
- станина (корпус).

Сварочный узел, включающий в себя преобразователь энергии, который может быть как магнитострикционным, так и пьезокерамическим, трансформатор упругих колебаний, являющийся согласующим акустическим элементом между волноводом и преобразователем и волновод-инструмент, через рабочий торец которого ультразвук вводится в свариваемое изделие. (Рис. 1).

Для охлаждения, нагревающего в процессе работы преобразователя его помещают в бачок с проточной водой. Иногда проточной водой охлаждается и волновод-инструмент. При использовании ферритовых и пьезокерамических преобразователей может применяться принудительное или даже естественное воздушное охлаждение.

Основное назначение опоры - фиксация изделия при сварке. В некоторых случаях опора может рассматриваться как активный элемент волноводно--акустической системы. В этом случае опора способствует обеспечению оптимального энергетического режима сварки. При использовании пассивной опоры ее конструкция и материал выбираются из соображений оптимального теплового режима сварки. Опора может использоваться подогрева или охлаждения. Поскольку опора (пассивная или активная) участвует в распределении энергии среди элементов колебательной системы, ее можно использовать для получения информации о ходе процесса сварки. В этом случае опора выполняется в виде датчика. В некоторых

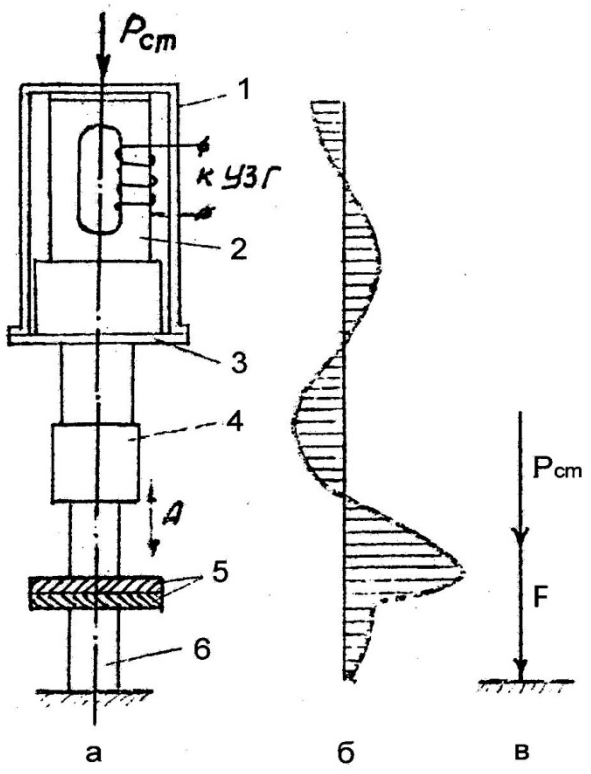

Рис. 1 Принципиальная схема ультразвуковой сварки полимеров

а - схема установки:

1. - корпус преобразователя;
2. - преобразователь с обмоткой;
3. - трансформатор упругих колебаний;
4. - волновод;
5. - свариваемые детали;
6. - опора

б - эпюра амплитуды смещения колебательной системы;
в - расположение векторов статического давления $\mathbf{P_{ст}}$ и динамического усилия F;
А - амплитуда смещения волновода.
В таких случаях опора выполняет еще и дополнительную функцию, являясь элементом механизма давления.

Механизм давления предназначен для того, чтобы обеспечить необходимый акустический контакт между рабочим торцом волновода, изделием и опорой, а также между частями свариваемого изделия.

Сварочный узел или опора должны иметь возможность перемещения. Подвижному элементу сообщается движение от механизма перемещения при помощи мускульной силы оператора или при помощи автоматического

привода. Иногда подвижными выполняют и сварочный узел и опору. Тогда оба эти элемента могут быть элементами механизма давления.

Вспомогательное устройство обеспечивает транспортирование материала, контроль и управление параметрами сварочного процесса, включение и выключение ультразвука.

Станина ультразвуковых сварочных машин предназначена, прежде всего для размещения вышеназванных элементов и узлов. Иногда на станине устанавливают различные подающие приемные устройства. Часто в конструкцию станины встраивают источник энергии - ультразвуковой генератор.

Механическая часть машины (корпус, система охлаждения, привод давления и т.п.) должны иметь: достаточную жесткость корпуса, исключающую непроизвольное смещение и перекосы сварочного наконечника относительно свариваемых деталей; малую инерционность привода давления с плавным опусканием сварочного наконечника. В ряде случаев конструкция рабочего стола должна соответствовать конкретным требованиям, обусловленным типом свариваемого изделия.

К машинам для УЗС в полной мере относятся и общие требования: максимальный к.п.д., минимальные габариты и вес, простота при наладке и эксплуатации, надежность в работе, высокая производительность, патентная частота соответствие требованиям эргономики.

Важнейшим узлом, составляющим основу и специфику оборудования и технологии ультразвуковой сварки пластмасс, является электромеханическая колебательная система (сварочный узел) Рис.1. Эта система служит для преобразования электрической энергии в механическую, передачи этой энергии в зону сварки, согласования сопротивления нагрузки внутренним сопротивлением системы и геометрических размеров зоны ввода энергии с размерами излучателя, концентрирования энергии и получения необходимой величины колебательной скорости излучателя. Система должна работать с максимальным к.п.д. на резонансной частоте независимо от изменения сопротивления нагрузки.

На рис.2 показана принципиальная схема ультразвуковой установки для сварки пластмасс.

Преобразование электрических колебаний в механические при ультразвуковой сварке осуществляется магнитострикционным преобразователем-пакетом и основано на магнитострикционном эффекте. Последнее заключается в том, что при пропускании через обмотку, намотанную на стержень, выполненный из ферромагнитного материала, переменного тока высокой частоты, происходит изменение размера стержня с частотой равной частоте тока. Магнитострикционные преобразователи изготавливаются из ферримагнитных материалов: никеля, пермендюра марок К49Ф5 и К65, альфера марок 1014 и 1012.

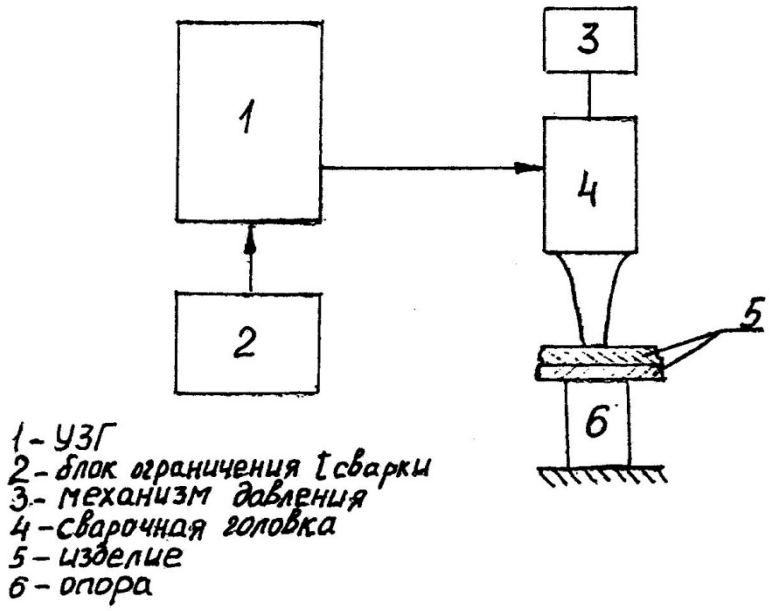

Рис.2. Принципиальная схема ультразвуковой установки для сварки пластмасс.

Волновод-инструмент предназначен для усиления амплитуды колебаний выходного торца трансформатора и передачи механической энергии от последнего к нагрузке (к месту сварки). Рабочий торец волновода может иметь различную форму в зависимости от свариваемого изделия.

Усиление амплитуды колебаний достигаются применением сужающихся по определенному закону волноводов, применяя волноводы сужающейся формы, можно получить на выходном торце амплитуды от 20 до 100 мкм. Для сварки, в основном, применяются волноводы четырёх типов: цилиндрические (ступенчатые), экспоненциальные, катеноидальные и конические волноводы с точечной, ножевой (прямоугольной), контурной, клиновой рабочей (излучающей) поверхностью. I Представлены зависимости амплитуды колебаний от формы волновода. В последнее время созданы волноводы новых форм: контурные волноводы с диаметром рабочего торца до 120 мм, ножевые волноводы с длиной рабочей части достигающей 300 мм, волноводы с изменяемым направлением колебаний и другие.

Волноводы и трансформаторы упругих колебаний следует изготовлять из упругих и лёгких материалов, т.к. потери механической энергии тем меньше, чем меньше масса волновода и трансформатора, и чем лучше упругие свойства материала, кроме того, материалы должны обладать низким декрементом затухания, высокой усталостной прочностью, хорошей обрабатываемостью резанием и невысокой стоимостью. В качестве таких материалов могут быть использованы алюминиевые и титановые сплавы, а также стали 30ХГСА, 45 и 40Х. Трансформатор упругих колебаний (стальные) соединяют с магнитострикционными металлическими

преобразователями преимущественно с помощью пайки. Широкое применение для этой цели получили высокотемпературные припои на основе серебра, алюминия, меди и других металлов, напр. ПСр-40, ПОС-60 и др.

Трансформатор с ферритовыми преобразователями соединяют с помощью специальных клеевых составов па основе эпоксидных смол.

1. Ультразвуковая сварочная машина УПМ-21

а) Назначение и техническая характеристика машины УПМ-21

Машина УПМ-21 предназначена для сварки ультразвуком изделий сложной формы из полистирола.

Техническая характеристика машины УПМ-21

1. Тин машины УПМ-21 (ультразвуковая, полимерная).
2. Питание от сети переменного тока технической частоты 50 Гц, напряжение 220В.
3. У правление машиной – ручное.
4. Охлаждение магнитострикционного преобразователя - водяное, водопроводное давление, атм - 0,6-1,1.
5. Время сварки одного изделия, сек..- 0,5-2 с.
6. Расход воды на охлаждение, л/мин - 0,5-1.
7. Максимальное расстояние между концом волновода и опорой (максимальная высота изделия) мм – 100.
8. Мощность комплектующего преобразователя ПМС-М2, 1,6 кВт при частоте от19 до 22 кГц и ПМС-М1-0,6 кВт.
9. Пределы регулирования усилия сжатия, кг - 5-50

10. Габаритные размеры:
    - ширина, мм – 530;
    - длина, мм – 740;
    - высота, мм – 1300;
    - масса, мм – 85.

б)Устройство машины УПМ-21

Устройство машины УПМ-21 поясняется схематичным чертежом рис. 3, где показаны следующие узлы и механизмы:

На станине 1 установлен стол 2, на котором закреплен кронштейн 3. По направляющим кронштейна 3 может перемещаться платформа 4, с закрепленным на ней установочным кронштейном 5, в последнем крепится магнитострикционный преобразователь 6, охлаждение которого осуществляется водой 7. В состав магнитострикционного узла входит

рабочий инструмент-волновод 8, соединяемый с преобразователем упругих колебаний резьбовой шпилькой. Перемещение платформы 4 осуществляется при нажатии на педаль 10. Педаль и платформа связаны тягой 9 и 11. Для возвращения магнитостриктора в верхнее положение служит пружина 12 и противовес 13. Свариваемые детали размещаются на рабочем столе-опоре 14. При отсутствии рабочего стола-опоры 14 происходит сжатие пружины в стакане 15. Первоначальное давление пружины регулируется установочным винтом 16. Включение ультразвука осуществляется при заданной деформации пружины с помощью микровыключателя 17 и штифта, установленного на рабочем столе 14. Подвод воды для охлаждения магнитостриктора осуществляется через штуцер 18. Выводы микропереключателя и обмотки преобразователя расположены на клемной коробке 19, закрытой защитным кожухом.

в)Источник питания машины УПМ-21

Источником питания является ультразвуковой генератор мощностью 0,4 - 4 кВт. В комплекте с машиной УПМ-21 возможно применение ультразвуковых генераторов типа УЗГ6-1Д УЗГ5-1,6, УЗГЗ-0,4 и т.д.

г)Источник ультразвуковых колебаний

Источником ультразвуковых колебаний является магнитостриктор, питаемый комплектующим генератором (см. описание генератора). Как известно, с помощью ультразвуковых колебаний можно производить сварку, очистку, обезжиривание различных предметов и изделий, механическую обработку материалов, приготовление эмульсий. Для каждого вида операций требуется специальный магнитострикционный преобразователь, который служит для преобразования электрической энергии высокой частоты в энергию механических колебаний той же частоты. В машине УПМ-21 для сварки изделий сложной формы из полистирола используется магнитостриктор типа ПМС-М1 мощностью 0,6 кВт, разработанный в МВТУ им Н.Э. Баумана, а также ПМС-М2, мощностью 1,6 кВт.

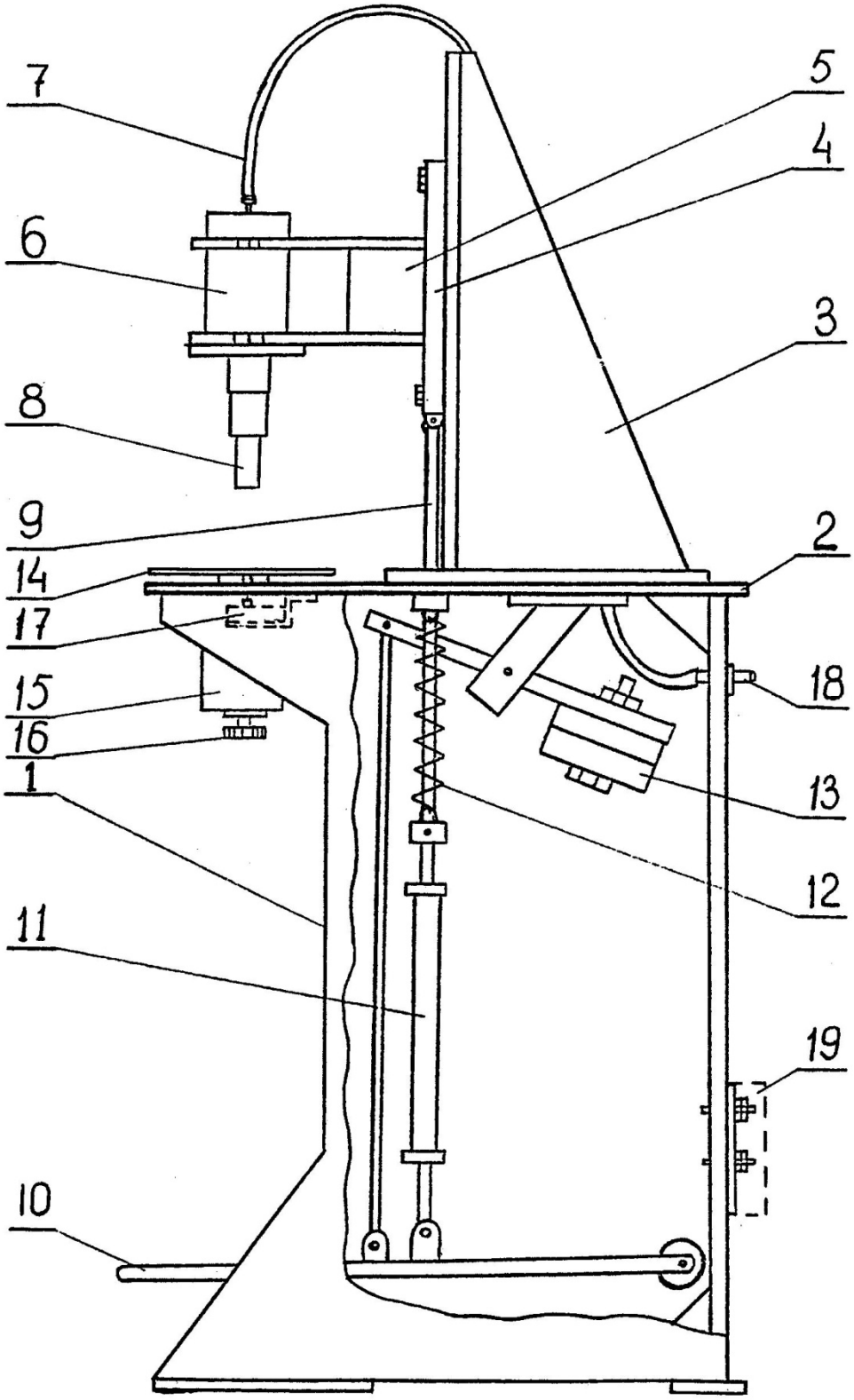

Рис. 3. Схематический чертеж машины УПМ-21

2. Машина для точечной ультразвуковой сварки типа МТУ-1,5-ЗУ4

а)Назначенце машины

Машина типа МТУ -1,5 -ЗУ 4 предназначена для точечной ультразвуковой сварки пластмасс. На машине можно сваривать изделия из термопластичных материалов: полистирола марок ПС-СУ-2, УПЛ-12М, полиамида марок П-610, капролон В, П-54, полиметилметакрилата марки ЛПТ толщиной до 1,5 мм, поливинилхлорида марок ПХВ-065, ПХВ-Л2, полиэтилена марок П-2010-В, П-4007Т толщиной до 0,8 мм.

Технические данные

Мощность преобразователя кВт	$1.5_{-0,30}^{+0,15}$
Рабочая частота кГц	22 ± 1,65
Максимальная производительность при сварке полиэтилена марки П-2010-В, толщиной = 0,1 мм, сварок/мин., не менее	80
Номинальное напряжение питающей сети, В	220 или 380
Номинальная частота питающей сети, Гц	50
Привод давления	пневматический
Охлаждение преобразователя	водяное
Расход воды, л/мин, не менее	2
Масса машины/без источника питания, кг	150

б)Устройство машины МТУ-1,5-ЗУ4

Машина состоит из сварочного устройства и источника питания, ультразвукового генератора УЗГ5-1,6/22.

Порядок выполнения работы

Ознакомиться с устройством и работой сварочной машины УПМ-21 и источником питания EPU5-1,6 по техническому описанию и инструкциям эксплуатации; включить источник питания и сварочную машину.

Путем изменения скорости подачи сварочного усилия и зазора между опущенным до конца УЗ инструментом-волноводом и его опорой, экспериментально подобрать режим сварки для полиэтиленовой пленки; Сварить на выбранном режиме образцы из чистой полиэтиленовой пленки и загрязненной (пыль, масляная пленка). Полученные образцы испытать на разрывной машине и сравнить результаты; Полученные результаты занести в журнал.Составить отчёт по выполненной работе.

Контрольные вопросы

В чем сущность сварки с фиксированным зазором и постоянным давлением?;
Особенности схем ультразвуковой сварки полимерных и композитных материалов;
Объяснить устройство и работу акустической сварочной головки; Объяснить принцип работы ультразвукового генератора;
Назвать основные параметры ультразвуковой сварки;
Объяснить устройство и работу сварочной машины УПМ-21.

Содержание отчета

Отчет по лабораторному практикуму представляется на отдельных листах и пишется разборчивым почерком чернилами или шариковой ручкой. В отчете указывается фамилия школьника, номер его класса, школы (лицея, ЦО и т.п.), название и цель работы. Приводятся схема установки, таблицы экспериментальных результатов, результаты графического представления и аппроксимации экспериментальных данных. Схемы и графики можно выполнять карандашом. В отчет заносится таблица с калибровочными коэффициентами. Записываются выводы.

Список литературы

1. Волков С.С. Сварка и склеивание полимерных материалов: учебное пособие для вузов. - М.: Химия, 2001. 376 с.
2. Гуль В.Е., Акутин М.С. Основы переработки пластмасс. - М.: Химия, 1985.399 с.
3. Каменев Е.И., Мясников Г.Д., Платонов М.П. Применение пластических масс: справочник. - JL: Химия, 1985. 448с.
4. Донской А.В., Келлер О.К., Кратыш Г.С. Ультразвуковые электротехнические установки, 2е издание, переработанное и дополненное - JL: Электроиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. 208с.
5. Волков С.С., Орлов Ю.Н., Черняк Б.Я. Сварка пластмасс ультразвуком. - М.: Химия, 1974. 267с.
6. Волков С.С., Черняк Б.Ю. Сварка пластмасс ультразвуком, 2е издание, переработанное и дополненное. - М.: Химия 1986. 254с.

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторного практикума по
Школе-лаборатории
кафедры «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э.Баумана

Влияние рода температуры газа на прочность сварных соединений при сварке газом

Москва 2012

Волков С.С., Бигус Г.А., Дерябин А.А. Влияние рода температуры газа на прочность сварных соединений при сварке газом: Методические указания к выполнению лабораторного практикума по Школе-лаборатории кафедры «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана «Влияние рода температуры газа на прочность сварных соединений при сварке газом». – М.: Кафедра «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. -10с.

В лабораторной работе исследуются характеристики газов используемых при сварке полимерных материалов. Определяются оптимальные температуры при сварке газом. Подробно рассматривается процесс сварки газовыми теплоносителями пластмасс с применением присадочного материала. Определяются основные параметры сварки на стыковых, угловых, тавровых, торцевых видов сварных соединений.

Методические указания имеют целью помочь школьникам усвоить физическую сущность процесса сварки газовыми теплоносителями, изучить технику и овладеть методами сварки нагретым газом. Освоить методику проведения физического эксперимента на всех видах сварных соединений. Изучить оборудование и уметь подбирать типы и виды газов.

Для обучающихся в общеобразовательных учреждениях в рамках исполнения обязательств МГТУ им. Н.Э. Баумана по техническому заданию Соглашения с Департаментом образования города Москвы о социальном обслуживании населения города Москвы в части предоставления образовательных услуг в интересах города Москвы.

Табл. Ил. Библиогр. Назв.

УДК 621.791

1.Цель работы.

Ознакомление с оборудованием и техникой сварки полимеров газовым теплоносителем. Определение оптимальной температуры сварки.

2.Оборудование и материалы.

8.1 Газовая горелка;
8.2 Компрессор или баллон со сжатым газом;
8.3 Приспособление для крепления заготовок;
8.4 Пирометрический милливольтметр или термометр для замера температуры газа;
8.5 Штатив для крепления горелки;
8.6 Секундомер;
8.7 Образец из винипласта с размером 70х100 мм толщиной 3-6 мм;
8.8 Испытательная разрывная машина.

3.Содержание и форма отчета.

Название и цель работы :
3.7 Привести эскиз сварочной горелки.
3.8 Нарисовать схему определения области оптимальных температур.
3.9 Привести таблицу полученных данных.
3.10 Выводы по проделанной работе.

4.Содержание работы.

Сварка пластмасс газовыми теплоносителями благодаря своей простоте и доступности стала известна с появлением пластмасс. Сварка нагретым газом применяется при изготовлении и ремонте конструкций из толстолистового материала или толстостенных деталей, предварительно отлитых на машинах для литья под давлением - термопластавтоматах. К таким конструкциям относятся трубы, фасонные детали, различная химическая аппаратура, ёмкости, ванны для травления и т.д., которые изготовляются из винипласта, ПВХ, фторопласта, полиэтилена, полипропилена, полиамидов, полистирола и т.д. Преимуществом данного способа сварки является простота оборудования, несложность соединения деталей практически любых размеров и конфигураций.

Сущность способа состоит в том, что тепловая энергия в зону соединения вводится с помощью горячего газа. Соединяемые поверхности, а если сварка

выполняется с присадочным материалом, то и присадочный материал, нагреваются горячим газом до температуры вязкотекучего состояния, а затем сдавливаются с определенным усилием (рис. 1).

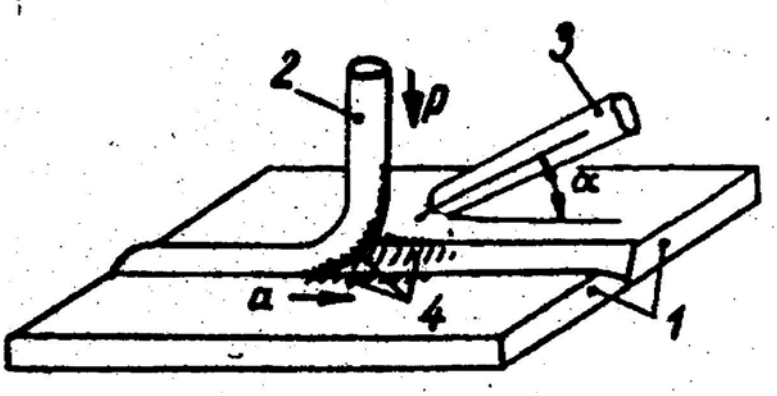

Рис. 1. Схема сварки пластмасс газовыми носителями с присадочным материалом.

1. *Свариваемые листы;*
2. *Присадочный материал;*
3. *Сопло сварочного аппарата;*
4. *Зона нагрева (заштрихована);*

P -Давление на присадочный материал;
a - Направление сварки.

В качестве газа-теплоносителя можно использовать воздух, азот, аргон, углекислый газ. Наиболее экономичным газом-теплоносителем является сжатый воздух, благодаря простоте его получения.

Г аз для нагрева свариваемого изделия выбирают в зависимости от свойств пластмассы. Так, для сварки винипласта можно применять воздух, азот, углекислый газ, аргон, однако наиболее высокая прочность сварного соединения достигается при применении воздуха. При сварке полиэтилена и других пластмасс, подверженных воздействию кислорода, в качестве газа-теплоносителя применяют азот.

Воздух или инертные газы, подогретые до определенной температуры (выше температуры вязкотекучего состояния полимера на 323-373 К) нагревают полимер и пруток в месте сварки до требуемой температуры. Воздух или газы нагреваются при прохождении через электронагревательные элементы сварочной аппаратуры, или же пламенем горящего газа в специальных устройствах, называемых горелками (нагревателями). Сварку газом можно проводить с применением присадочного материала (прутковая сварка) и без присадочного материала (беспрутковая сварка).

Сварка с применением присадочного материала внешне напоминает газопламенную сварку металлов. Нагретым газом подогревают одновременно зону разделки кромок и присадочный пруток. При надавливании на пруток последний приваривается к размягченным кромкам изделия, образуя сварной шов.

Присадочный пруток изготавливается, как правило, из того же материала, какой сваривается. Формы его - круг, треугольник, ромб, прямоугольник и

др. Диаметр прутков 2-6 мм. Для повышения скорости сварки применяются также сдвоенные прутки. Диаметры прутков выбирают в зависимости от толщины изделия и вида разделки кромок. Для снижения температуры размягчения и повышения пластичности присадочного материала в него добавляют пластификаторы. Например, для сварки полиэтилена применяют присадочный материал, состоящий из полиэтилена и 5-10 % полиизобулена. Для сварки капрона с температурой плавления 483-513 К применяют полиамид-54, имеющий температуру плавления 433-443 К.

При сварке нагретым газом могут быть выполнены швы практически всех видов сварных соединений - стыковые, угловые, тавровые, торцевые, а также швы внахлестку. Типы выполняемых швов, их условные обозначения и размеры конструктивных элементов определены ГОСТ 16310-70. Выбор вида соединения обусловлен главным образом толщиной и свойствами свариваемых материалов, особенностями конструкций и условиями нагружения в процессе эксплуатации (рис. 2).

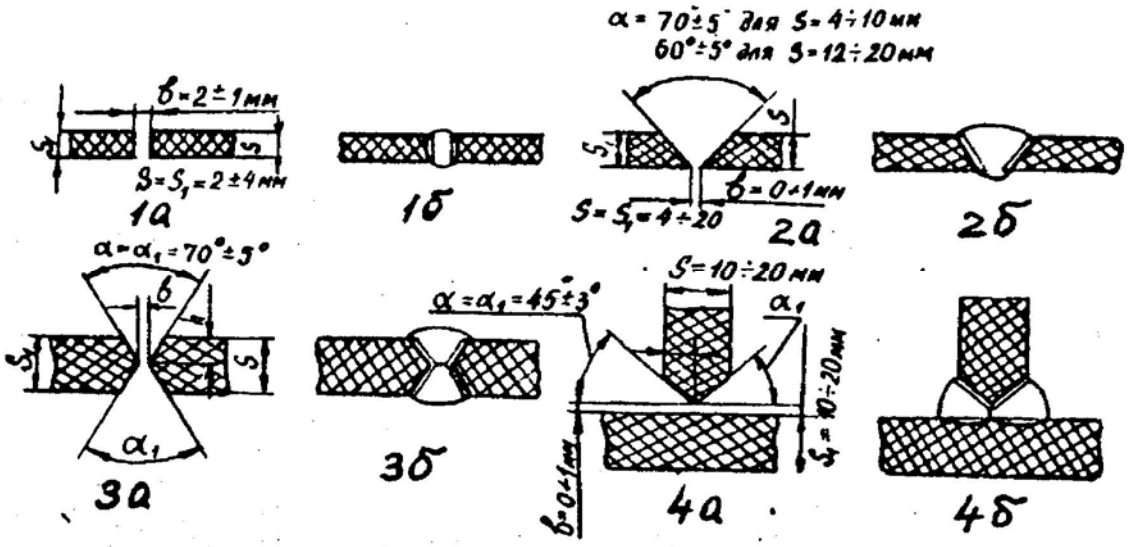

Рис. 2. Некоторые типы швов сварных соединений, выполняемые сваркой газовыми теплоносителями с присадочным материалом по ГОСТ 16310-70.

1. *Стыковое сварное соединение без разделки кромок;*
2. *С V-образной разделкой;*
3. *С X-образной разделкой;*
4. *Тавровое сварное соединение с двусторонним швом со скосом двух кромок;*
   а - подготовка кромок;
   б — выполненный шов.

Сварка швов стыковых соединений деталей толщиной до 4 мм возможна без подготовки кромок. В этом случае между листами следует оставлять зазор 1-3 мм для обеспечения равномерного провара. Сварку выполняют с одной, либо с двух сторон без подкладки, а также на съемной или привариваемой подкладке. При сварке встык листов толщиной свыше 4 мм рекомендуется предварительная подготовка кромок: скос кромок одного, либо обоих свариваемых листов с одной или двух сторон. X-образные швы более прочны, чем V-образные, так как благодаря их симметричному

строению при воздействии растягивающих и изгибающих нагрузок в них не возникают дополнительные изгибающие моменты. Для уменьшения коробления материала с целью равномерного распределения возникающих напряжений прутки при сварке укладывают в определенном порядке (рис.3).

Швы внахлестку при сварке нагретым газом применяются редко, так как прочность нахлесточных соединений при растягивающих и изгибающих нагрузках в два раза меньше, чем стыковых. Например, прочность стыкового соединения труб при испытании на растяжение составляет 79% прочности основного материала, при испытании на изгиб - 96%, а прочность нахлесточного соединения при растяжении составляет 40% и при изгибе - 41% прочности основного материала.

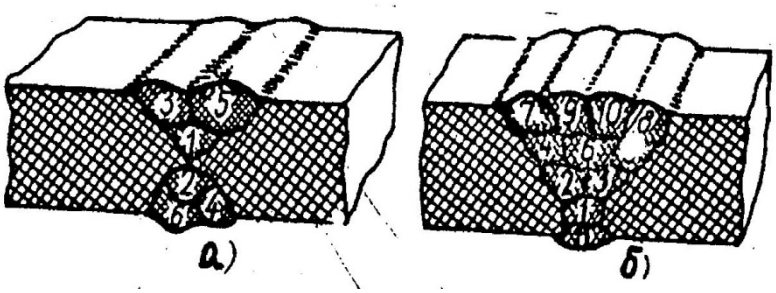

Рис. 3.Последовательность укладки прутков при сварке Х-образного шва (а) и при сварке V-образного шва (б).

Основные параметры режима сварки пластмасс нагретым газом следующие:

1. температура, давление струи газа на выходе из наконечника нагревателя и расход газа;
2. усилие, прикладываемое к прутку;
3. скорость сварки, т.е. скорость укладки присадочного материала в разделку шва;
4. положение присадочного прутка и наконечника горелки.

Температуру газа на выходе из сопла наконечника устанавливают в зависимости от свариваемого материала, она должна быть на 323-373 К превышать температуру вязкотекучего состояния полимера. Повышение температуры необходимо для компенсации потерь тепла газовой струи между соплом наконечника и поверхностью материала. Расстояние между соплом наконечника и поверхностью свариваемых деталей следует поддерживать постоянным и равным 5-8 мм. Температура струи газа на выходе из сопла наконечника при сварке полиэтилена составляет около 573 К, в то время как температура вязкотекучего состояния полиэтилена в месте контакта составляет 453-523 К. При сварке ПВХ температура струи газа должна быть равна 543-553 К. Изменение расстояния приводит к колебанию температуры прутка и основного материала, что снижает качество сварного шва.

Скорость сварки зависит от температуры газа, чем выше температура, тем большей должна быть скорость сварки, т.е. режим сварки будет более жестким. Скорость сварки зависит от толщины и типа свариваемого материала, а также от температуры нагрева присадочного и основного материала. При сварке жесткого ПВХ скорость сварки при температуре 453 К

составляет 0,1 $*10^{-2}$ м/с, при температуре 623К - 0,4$*10^{-2}$ м/с. Для увеличения производительности процесса присадочный и основной материалы предварительно перед сваркой нагревают. Кроме того, для повышения скорости сварки применяют сдвоенный пруток, а также прутки квадратного, треугольного и других сечений.

Усилие прижима в процессе сварки должно оставаться постоянным 5-50 Н на пруток. При сварке полиэтилена и полиамида прижим составляет 10-20 Н, а при сварке винипласта 10-40 Н на пруток. Прижим можно осуществлять рукой сварщика или роликами. Обычно ролики применяют для мягких пластифицированных прутков, которые не выдерживают осевого давления, оказываемого рукой сварщика. Усилие прижима ролика составляет 10-30 Н на пруток.

Величина давления на пруток зависит от диаметра прутка.

Диаметр, мм	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Н	**10**	**16**	**25**	**30**	**36**

В зависимости от расположения присадочного прутка и горелки можно в некоторых пределах управлять процессом сварки. Если необходимо сильнее нагревать присадочный пруток, то угол наклона надо уменьшить, а если необходимо сильнее нагревать свариваемый материал, то угол наклона увеличивают. При сварке полиэтилена, ПВХ и полиизобутилена сварочный пруток наклоняют под углом 45-50°. Под прямым углом 90° держат пруток при сварке винипласта и полиметил акрилата. Под углом более 90° наклоняют присадочный пруток при сварке полипропилена (рис. 4). Угол наклона наконечника сварочной горелки к основанию шва зависит от толщины свариваемых деталей и составляет 20-25° при толщине деталей до 5 мм. При толщине деталей свыше 5 мм угол наклона равен 30-45° . Подготовка и разделка кромок перед сваркой производится механическим путем на фрезерных, строгальных станках или вручную с помощью рубанка, напильника и наждачного круга.

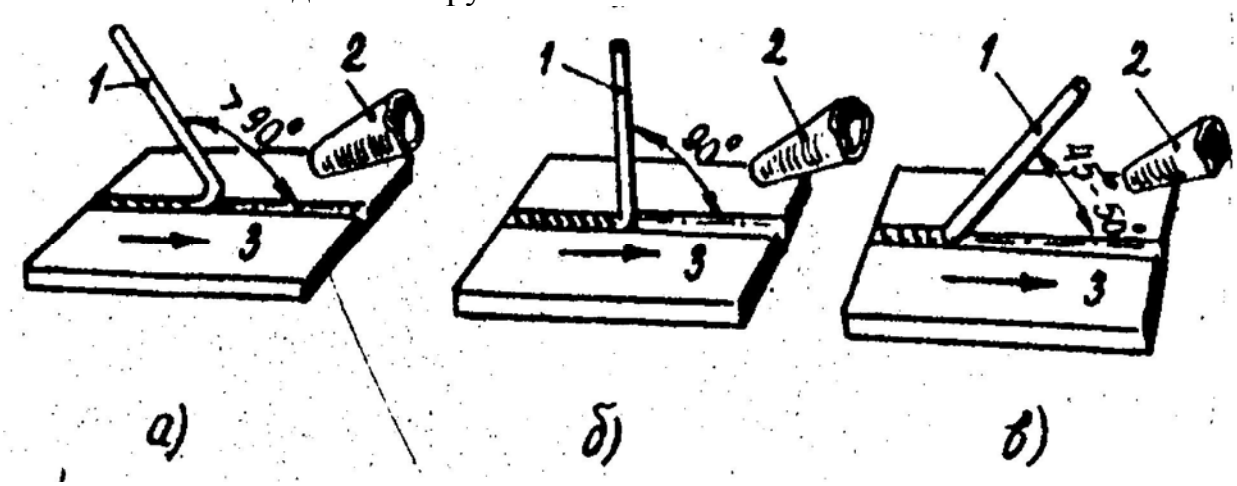

Рис. 4. Положение сварочного прутка в процессе сварки:

(а) -угол наклона прутка больше 90° ; (б) -равен 90° ; (в) -угол наклона меньше 90^0.

Качество сварки во многом зависит от квалификации сварщика. При сварке нагреватель-горелку держат правой руке, а присадочный пруток - между большим и указательным пальцами левой руки. Рука сварщика должна быть удалена от свариваемой поверхности на расстоянии 70-80мм, чтобы обеспечить равномерный нагрев зоны сварки. Газовая струя большую часть времени должна быть направлена на основной материал, так как он имеет большую массу, чем присадочный пруток.

Сварка нагретым газом с использованием присадочного прутка широко применяется при изготовлении конструкции и аппаратов из винипласта, полиэтилена, полиметилакрилата и других термопластов благодаря своей универсальности и простоты оборудования.

Особенно целесообразно применять этот метод применять в тех случаях, когда необходимо выполнить швы сложной конфигурации при малом масштабе производства в монтажных условиях и при ремонтных работах.

Основными параметрами процесса являются:

- температура газа;
- состав и диаметр присадочного прутка;
- давление на пруток;
- расход газа;
- скорость сварки.

Выбор этих параметров производится с учетом марки и толщины свариваемого материала. Регулирование температуры газа может осуществляться путем изменения мощности нагревателя, расхода газа-теплоносителя и расстоянии от сопла горелки до свариваемой поверхности.

Низкие температуры сварки приводят к плохим показателям механической прочности, из-за того, что молекулы полимера не обладают необходимой подвижностью. Перегрев материала выше температуры вязкотекучего состояния вызывает деструктивные процессы и, как следствие, снижение прочности сварного соединения.

5.Порядок выполнения работы.

1. Ознакомиться с конструкцией сварочной горелки и инструкцией по сварке горящими газами термопластов;
2. Произвести пробную сварку с регулированием температуры газа;
3. Определить область оптимальных температур газа-теплоносителя;
4. Закрепить горелку на штативе согласно рис. 5

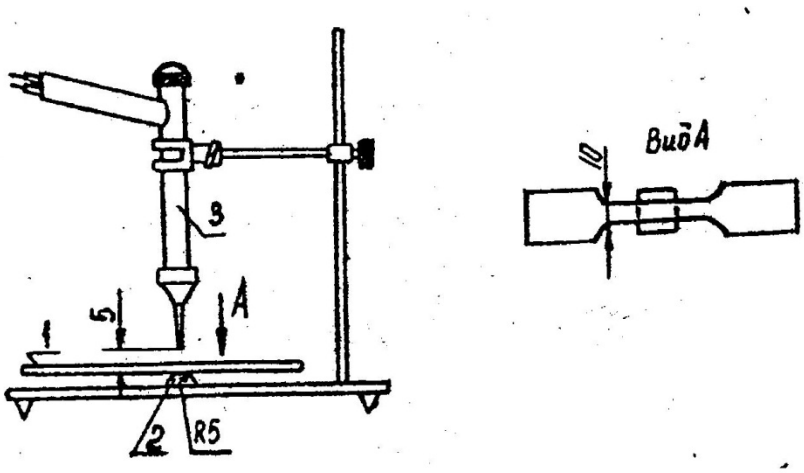

Рис. 5. Схема определения времени размягчения образцов.

5. Образец 1 из винипласта шириной 10 мм уложить на цилиндрическую опору 2 так, чтобы она строго приходилась по середине образца и расстояние между наконечником нагревателя 3 и поверхностью образца было как и при сварке равно 5 мм;
6. Определить время размягчения места прогрева образца по моменту касания концами лопатки основания штатива для температур 433, 493, 423, 543 К. Начало деструкции устанавливается по образованию вздутий на поверхности образца и изменению окраски полимера;
7. На основании полученных данных определить область температур, в которой происходит быстрое размягчение материала без его деструкции;
8. Уложить образец для сварки в приспособление;
9. Сварить образцы при температурах 433, 493, 543 К и прочих постоянных параметрах процесса;
10. Определить удлинение присадочного прутка по формуле

    $\text{Delta } L = L_{СВ} - L_1$

    Где $L_{СВ}$ - длина прутка сварного шва, см;

    L_1 - длина прутка до сварки, см.

    Если шов сварен правильно, то удлинение прутка должно составлять не более 20 %.
11. Вырезать и обработать образцы (по 3 образца из каждой сварной заготовки);
12. Испытать образцы на разрывной машине. Полученные результаты занести в таблицу;
13. Составить отчет.

6.Контрольные вопросы:

1. Как объяснить снижение прочности сварного соединения при повышенной температуре газа?;
2. Как можно регулировать температуру газа-теплоносителя?;
3. Какие параметры режима сварки определяют качество сварных швов?

Содержание отчета

Отчет по лабораторному практикуму представляется на отдельных листах и пишется разборчивым почерком чернилами или шариковой ручкой. В отчете указывается фамилия школьника, номер его класса, школы (лицея, ЦО и т.п.), название и цель работы. Приводятся схема установки, таблицы экспериментальных результатов, результаты графического представления и % аппроксимации экспериментальных данных. Схемы и графики можно выполнять карандашом. В отчет заносится таблица с калибровочными коэффициентами. Записываются выводы.

Список литературы.

1. Волков С.С. Сварка и склеивание полимерных материалов: учебное пособие для вузов. - М.: Химия, 2001. 376 с.

2. Гуль В.Е., Акутин М.С. Основы переработки пластмасс. - М.: Химия, 1985.399 с.

3. Каменев Е.И., Мясников Г.Д., Платонов М.П. Применение пластических масс: справочник. - JL: Химия, 1985. 448с.

4. Донской А.В., Келлер О.К., Кратыш Г.С. Ультразвуковые
   a. электротехнические установки, 2е издание, переработанное и дополненное - JL: Электроиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. 208с.

5. Волков С.С., Орлов Ю.Н., Черняк Б.Я. Сварка пластмасс ультразвуком. - М.: Химия, 1974. 267с.

6. Волков С.С., Черняк Б.Ю. Сварка пластмасс ультразвуком, 2е издание, переработанное и дополненное. - М.: Химия 1986. 254с.

7. Зайцев К.И., Мацюк JI.Н., Богдашевский А.В. и др. Сварка полимерных материалов: справочник. - Под общ. ред. Зайцева К.И., Мацюк JI.Н. М.: Машиностроение, 1988. 312с.

8. Волков С.С., Черняк Б.Я. Сварка пластических масс: учебное пособие. - М.: Химия, 1937. 168с.

9. Технологияи оборудование для соединения изделий из полимерных материалов.: Под. ред. Г.Н. Кораба. Киев: им. Е.О. Патона, 1983. 144с.