

И. П. Бушминский

Изготовление элементов конструкций СВЧ

Волноводы и волноводные устройства

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся по специальности «Конструирование и производство радиоаппаратуры»



МОСКВА «ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1974 г.

6 Ф
Б 90
УДК 621.385.6+621.372.8(075)

Рецензенты:

Кафедра технологии радиоэлектронной аппаратуры Московского авиационно-технологического института

Канд. техн. наук Центрального научно-исследовательского института радиоэлектроники
Парфенов Е. М.

Игорь Петрович Бушминский

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ СВЧ

Редактор Е. А. Орехова. Художественный редактор Н. Е. Ильенко. Переплет художника А. Т. Яковлева. Технический редактор С. П. Педерий. Корректор М. М. Малиновская.
Т-07956 Сдано в набор 22/XI 1973 г. Подп. к печати 18/VI 1974 г. Формат 84×108¹/₃₂. Бум. тип. № 3. Объем 9,5 п. л. Усл. п. л. 15,96 Уч.-изд. л. 15,69 Изд. № ЭР-144. Тираж 15 000 экз. Цена 76 коп. План выпуска литературы издательства «Высшая школа» (вузы и техникумы) на 1974 год. Позиция № 133.
Москва, К-51, Неглинная ул., д. 29/14, Издательство «Высшая школа»
Московская типография № 8 «Союзполиграфпрома» при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли, Хохловский пер., 7. 3867.

Бушминский И. П.

Б 90 Изготовление элементов конструкций СВЧ. Волноводы и волноводные устройства. Учеб. пособие для вузов. М., «Выш. школа», 1974.

304 с. с ил.

В учебном пособии изложены вопросы технологии изготовления волноводов, волноводных корпусов и волноводных устройств, а также технологии изготовления полосковых устройств и интегральных схем СВЧ с распределенными и сосредоточенными параметрами. Рассмотрены способы изготовления и отделки корпусов волноводных устройств лайкой, сваркой, точным литьем, холодным выдавливанием, наращиванием металла; приводится выбор способа изготовления волноводных корпусов, технология изготовления миниатюрных полосковых волноводов.

Г 30404—133
001(01)—74 133—74

6Ф

© Издательство «Высшая школа», 1974 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Техника СВЧ уверенно входит в различные области науки и производства. Область ее применения неуклонно расширяется. Возрастает объем выпуска и разнообразие устройств СВЧ.

В связи с этим возникает необходимость при подготовке инженеров специальности «Конструирование и производство РЭА» рассматривать вопросы технологии изготовления элементов конструкций СВЧ.

При изложении материала автор использовал опыт отечественной и зарубежной промышленности. Материал учебного пособия изложен в предположении, что к моменту его прочтения студенты знакомы с основными методами и способами обработки конструкционных материалов и основами техники СВЧ. Поэтому основное внимание обращено на технологические процессы, присущие устройствам СВЧ.

Учебное пособие состоит из шести глав. В гл. 1 рассмотрено изготовление волноводов прямоугольного и круглого поперечного сечения. Описывается технология изготовления изогнутых, скрученных, гофрированных волноводных труб и способы установки фланцев. В гл. 2 рассматриваются способы изготовления и отделки корпусов волноводных устройств, описывается изготовление корпусов волноводных устройств пайкой, сваркой, точным литьем, холодным выдавливанием и наращиванием металла. Приводит-

ся критерий выбора способа изготовления волноводных корпусов. В гл. 3 на примере изготовления конкретных конструкций показаны способы получения наиболее общих элементов и деталей устройств СВЧ. В гл. 4 описаны способы контроля и испытания устройств СВЧ. В гл. 5 и 6 рассмотрена технология изготовления миниатюрных полосковых волноводов.

Данная книга является учебным пособием по курсу «Технология радиоаппаратостроения» для студентов специальности 0705 и может быть использована специалистами производства.

Автор выражает благодарность канд. техн. наук О. Д. Парфенову за большую помощь при подготовке рукописи.

Просьба к читателям: замечания, пожелания и отзывы направлять по адресу: Москва, К-51, Неглинная ул., 29/14, издательство «Высшая школа».

Автор

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ВОЛНОВОДНЫХ ТРУБ ПРЯМОУГОЛЬНОГО И КРУГЛОГО ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЙ

Волноводы представляют собой простейшие сборочные единицы устройств СВЧ (рис. 1.1). Полые волноводы состоят из трубы прямоугольного или круглого поперечного сечения, имеющей проводящую внутреннюю поверхность (собственно волновода), и соединительных фланцев. В зависимости от конструктивных требований и назначения волноводные трубы бывают *прямолинейными, изогнутыми, скрученными* и могут иметь переменное по длине сечение, гофрированные стенки и т. д. На рис. 1.2 дана классификация волноводных труб и фланцев по технологическим признакам.

Если прямолинейные волноводы выполнены на основе стандартных труб прямоугольного (ЦМТУ 4843—57) поперечного сечения сборкой их отрезков с фланцами, то для производства остальных типов волноводов используются специфические технологические процессы, характерные для изготовления деталей волноводных сборочных единиц.

§ 1.1. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИЗОГНУТЫХ ВОЛНОВОДНЫХ ТРУБ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

Прямоугольные волноводы могут быть изогнуты по узкой и широкой стенкам. В первом случае изменяется направление вектора $\mathbf{H}$ при неизменном направлении вектора $\mathbf{E}$, во втором — направление вектора $\mathbf{E}$. Поэтому различают изгибы в H - и E -плоскостях. В местах изгибов волновода возникают неоднородности, вызывающие отражения энергии колебаний СВЧ. Эти неоднород-

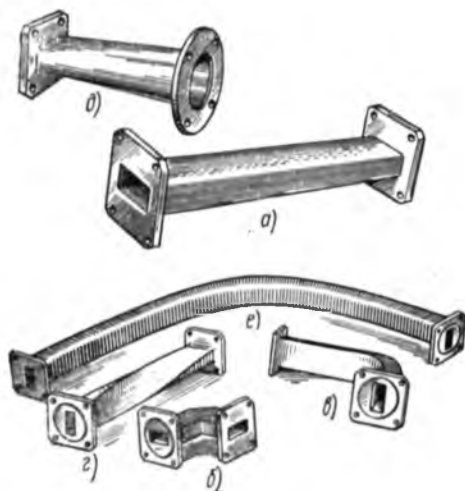


Рис. 1.1. Различные типы волноводов:
 а — прямой; б, в — изогнутые; г — скрученный; д — волновод с переменным поперечным сечением; е — гибкий волновод

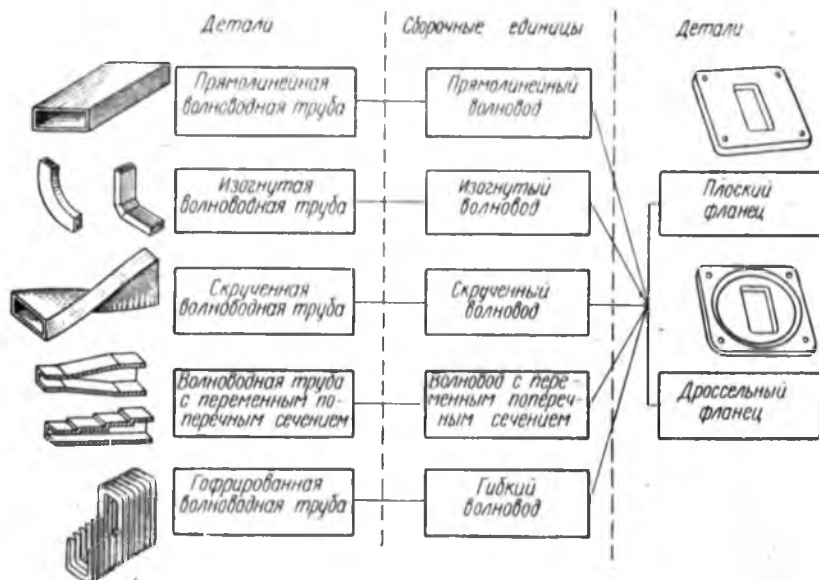


Рис. 1.2. Классификация деталей волноводов по конструкторско-технологическим признакам

ности не сосредоточены в одной плоскости, а распределены в некотором объеме волновода и им можно придать форму, обеспечивающую минимальные отражения.

Существуют два вида изгибов волновода: плавные или радиусные (рис. 1.3) и уголкового (рис. 1.4).

У плавных изгибов пространство распределенной неоднородности начинается с места искривления оси волновода. Так как волновые сопротивления изогнутого и прямолинейного участков волновода различны, то от области изгиба возникнут отражения. Они будут минимальными, если длина средней линии изгиба кратна величине $\lambda_v/2$ (λ_v — длина волны в волноводе). В этом случае используются согласующие свойства полуволновой линии.

Для уменьшения величины неоднородности, вносимой изгибом, необходимо обеспечить постоянство геометрии полости волновода и высокую чистоту токонесущих поверхностей по всей длине изгиба.

Недостатком плавного изгиба волновода являются его относительно большие размеры, для уменьшения которых вместо волноводов с плавным изгибом используются уголки (см. рис. 1.4).

Уголки компактны и имеют хорошие электрические характеристики. Наименьшее отражение получается для уголка, показанного на рис. 1.4, а. Расширение полосы частот, в которой влияние изгиба незначительно, достигается применением уголка с двумя скосами (рис. 1.4, в).

Широко применяются многоступенчатые уголки, в которых углы подобраны так, что коэффициенты отражения от них распределяются по биномиальному закону. Например, трехступенчатый изгиб на 90° с углами $26,3^\circ$, $37,4^\circ$ и $26,3^\circ$, для которого КСВН во всей рабочей полосе частот лежит в пределах 1,01.

Получение плавных изгибов осуществляется двумя методами: 1) *гибкой с заполнением объема волноводной трубы*; 2) *гибкой без заполнения*. Перед гибкой необходим отжиг заготовки (для латуни при температуре 700°C в течение 2 ч) для снятия внутренних напряжений.

При гибке с заполнением происходит процесс растяжения наружной стенки. Толщину стенок в области из-

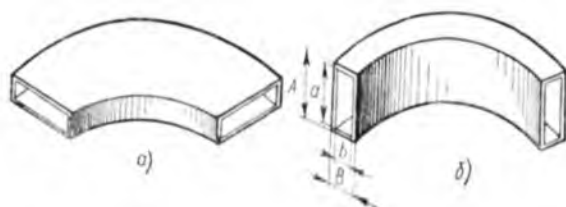


Рис. 1.3. Плавные или радиусные изгибы:
 a — в Н-плоскости; b — в Е-плоскости

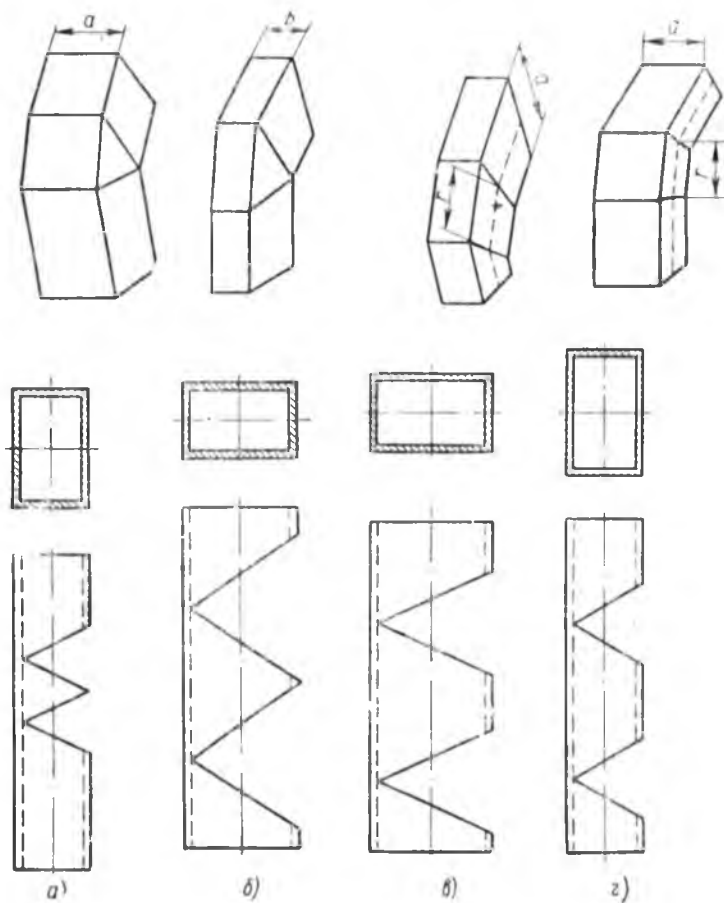


Рис. 1.4. Одноуголковые и двухуголковые изгибы:
 a, b — одноуголковые изгибы в Н и Е-плоскостях и их заготовки; $в, z$ —
 двухуголковые изгибы

гиба можно определить из выражений:

$$T_1 = -0,263H + \sqrt{0,069H^2 + \frac{0,526ATR_c}{R_D + S - 0,5T}};$$

при $0,0175a(R_D + S - 0,5T) > S + A$;

$$T_2 = 2T - (2T - T_1) \times$$

$$\times \sqrt{1 - \frac{[S + A - 0,0175a(R_D + S - 0,5T)]^2 [(2T - T_1)^2 - T^2]}{(S + A)^2 (2T - T_1)^2}}$$

при $0,0175a(R_D + S - 0,5T) < S + A$,

где T_1 , T_2 — толщина наружной стенки волноводной трубы, получающаяся при гибке; A — номинальный наружный размер сечения волноводной трубы до гибки, взятый в плоскости, перпендикулярной плоскости гибки (см. рис. 1.3); T — толщина стенки трубы до гибки; R_D — радиус гибки внутренней стенки; S — номинальный наружный размер сечения волноводной трубы до гибки, взятый в ее плоскости (B на рис. 1.3); H — внутренний размер сечения волноводной трубы, взятый в плоскости, перпендикулярной плоскости гибки (a на рис. 1.3); a — угол изгиба, град; R_c — радиус гибки средней линии волноводной трубы.

Так как предельно допустимая величина утонения материала в процессе растяжения зависит от его пластических свойств, то

$$T_{1\text{ пред}} = \frac{100 - \delta}{100} T,$$

где $T_{1\text{ пред}}$ — предельно допустимая толщина стенки; δ — удлинение материала в процентах; T — исходная толщина стенки волноводной трубы.

Условие сохранения механической целостности волноводной трубы в области изгиба

$$T_1 > T_{1\text{ пред}}.$$

Отсюда можно найти минимально допустимый радиус гибки волноводной трубы.

Выражение $T_{1\text{ пред}}$ включает в себя величину удлинения материала волноводной трубы, определяющую положение границы зоны пластической деформации материала стенок при изготовлении изгиба. Для стандарт-

Таблица 1.1

Изгиб волновой трубы в плоскости E

Сечение волновой трубы	Радиус изгиба, мм		Угол изгиба, град.		КСВ волнового изгиба не более	Допустимые отклонения сечения в зоне изгиба, мм		
	номинальный	допустимые отклонения	номинальный	допустимые отклонения		Δa	Δb	
1	2	3	4	5	6	7	8	
7,2×3,4	5	±0,3	А	±1	1,07	±0,3	±0,3	
	7			±0,5	1,05	—0,2	—0,2	
	12	±0,5						
11×5,5	5	±0,3	А	±1	1,1	±0,3	±0,3	
	7		Б		1,07		±0,3	
	11	±0,3	±0,5	1,05	—0,2	—0,2		
	20	±0,5						
19×9,5	8	±0,3	А	±1	1,1	±0,3	±0,3	
	12	±0,5	Б	±0,5	1,07	—0,2	—0,2	
	19				1,05		—0,2	
	33							
23×10	9	±0,3	А	±1	1,1	±0,3	±0,3	
	15		Б		1,07	—0,2	—0,2	
	23	±0,5		±0,5	1,05		—0,2	
	40							
28,5×12,6	11	±0,3	А	±1	1,1	±0,3	±0,3	
	18	±0,5	Б	±0,5	1,05	—0,2	—0,2	
	29						—0,2	
	50							
35×15	14	±0,3	А	±1	1,1	±0,3	±0,3	
	25	±0,5	Б	±0,5	1,07	—0,2	—0,2	
	35				1,05		—0,2	
	60							

Изгиб волноводной трубы в плоскости *H*

Сечение волноводной трубы	Радиус изгиба, мм		Угол изгиба, град		КСВ волноводного изгиба не более	Допустимые отклонения сечения в зоне изгиба, мм	
	номинальный	допустимые отклонения	номинальный	допустимые отклонения		Δa	Δb
1	2	3	4	5	6	7	8
7,2×3,4	5				1,1		
	8	±0,3	А	±1		+0,3	+0,3
	12	±0,5		±0,5	1,05	-0,2	-0,2
11×5,5	7	±0,3	А	±1	1,1	+0,3	+0,3
	12			±0,5	1,05	-0,2	-0,2
	20	±0,5	Б				
19×9,5	12	±0,3	А	±1	1,1	+0,3	+0,3
	20			±0,5	1,05	-0,2	-0,2
	35	±0,5	Б				
23×10	15	±0,3	А	±1	1,1	+0,3	+0,3
	25			±0,5	1,05	-0,2	-0,2
	40	±0,5	Б				
28,5×12,6	18	±0,3	А	±1	1,1	+0,3	+0,3
	30	±0,5	Б	±0,5	1,05	-0,2	-0,2
	50						
35×15	25		А	±1	1,1	+0,3	+0,3
	40			±0,5	1,05	-0,2	-0,2
	60	±0,5	Б				

Примечание. А соответствует значениям угла изгиба 15; 30; 45; 60; 75; 90°; Б соответствует значениям угла изгиба 15; 30; 60; 75; 90; 105; 120; 135; 150; 165; 180°.

ных латунных труб $\delta=40\%$, для алюминиевых, изготовленных по СТУ 1316—61, $\delta=20—30\%$. При термообработке волноводных труб, изготовленных из алюминия, вместе с улучшением пластических свойств материала увеличивается его зернистость. Это снижает чистоту внутренней поверхности заготовки.

В табл. 1.1 даны значения радиусов изгиба в H и E -плоскостях, допустимые отклонения величины радиуса изгиба и размеров сечения в его зоне.

При первом методе гибки в качестве заполнителя объема заготовки можно использовать сыпучие и пла-

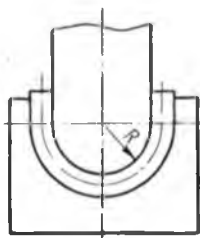


Рис. 1.5. Схема гибки волноводной трубы в закрытом штампе с постоянной матрицей

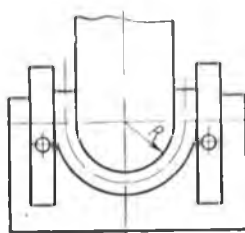


Рис. 1.6. Схема гибки волноводной трубы в штампе с направляющими ножами

стические материалы; металлы и сплавы с низкой температурой плавления; упругие стальные пластины; шарнирные оправки; жесткие калибрующие оправки.

Использование первых трех заполнителей придает волноводной трубе свойства жесткого бруса, который можно изгибать в штампе на прессе.

Для гибки можно использовать закрытые штампы с постоянной матрицей (рис. 1.5) и штампы с направляющими ножами (рис. 1.6). При этом в заготовке возникают упругие и пластические деформации. Удлинение наружных волокон вызывает напряжения, уменьшающие ширину волновода, а сжатие внутренних волокон вызывает напряжения, увеличивающие эту ширину, таким образом исходное прямоугольное поперечное сечение деформируется.

Вследствие упругих деформаций материал заготовки пружинит. Это может быть причиной неточности выполнения изгиба, что надо учитывать при проектировании

пуансона. При изгибании волноводной трубы на 180° с использованием закрытых штампов или штампов с направляющими ножами нельзя обеспечить высокой точности из-за угла пружинения заготовки. Поэтому целесообразно применять гибку на штампе с клиновыми ножами (рис. 1.7). Угол α позволяет изгибать волноводные трубы с учетом пружинящих свойств.

В качестве *пластического заполнения* используются обычно церезин, смесь канифоли с воском, льняным маслом и кварцевым песком.

Из *легкоплавких сплавов* широко применяются ПОС-50; сплав висмута, олова, свинца, сурьмы — церробенд. При использовании в качестве заполнителя церробенда необходимо учитывать, что он сохраняет пластичность лишь в течение двух часов после затвердевания. Поэтому гибку надо производить в этот отрезок времени. Уменьшение температуры трубы после заливки достигается охлаждением в проточной воде.

После гибки заполнитель выплавляется из волноводной трубы. При этом наблюдается неполное выплавление, что ухудшает электрические свойства волновода, и значительный угар заполнителя, вызывающий рост себестоимости узла. Чтобы не покрывать внутреннюю поверхность волноводной трубы легкоплавкими сплавами, ее предварительно оксидируют и покрывают тонким слоем пушечного сала. После гибки и выплавления заполнителя оксидная пленка удаляется травлением. Для тех же целей применяется меловая суспензия, наносимая на внутреннюю поверхность волноводной трубы.

Искажение размеров поперечного сечения в процессе гибки и остатки заполнителя на тонконесущих поверхностях волноводов ограничивают применение легкоплавких заполнителей. Высокая трудоемкость, сложность механизации в сочетании с высокой стоимостью применяемых для заполнения сплавов, имеющих значительный угар, делает нецелесообразным его применение для серийного производства.

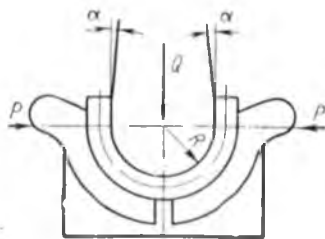


Рис. 1.7. Схема гибки волноводной трубы в штампе с клиновыми ножами

При гибке с заполнением *стальными пластинами* применяются пластины из пружинной стали толщиной 0,1—0,3 мм. Пластины шириной, равной внутреннему размеру заготовки, по которому производится изгиб (по узкой или широкой стенке), и длиной, превышающей длину заготовки в 1,5 раза, набираются в два пакета, суммарная толщина которых на 2—4 мм меньше, чем необходимо для заполнения всего объема волноводной

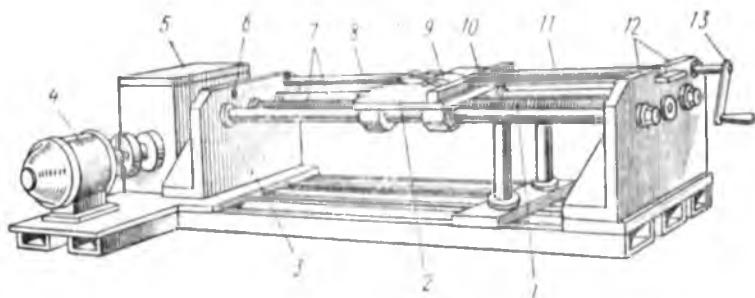


Рис. 1.8. Приспособление для затягивания клина в волноводную трубу

трубы. Каждый пакет с одного конца скрепляется шпилькой. Оба пакета шлифуются по ширине по третьему классу точности, обильно смазываются и устанавливаются в волноводную трубу. Туда же помещают пребшпановую прокладку для защиты боковых стенок. Затем пакеты закрепляются клином, приспособление для затягивания клина в волноводную трубу показано на рис. 1.8. Основные части приспособления: ходовой винт 1, каретка 2, установленная на направляющих 7, станина 3, двигатель 4 и редуктор с кожухом 5. Движение каретки передается от ходового винта разрезной маточной гайкой, расположенной под кареткой. Гайка включается конической шестерней, укрепленной на валике 11. С помощью ручки 13, связанной с валиком, осуществляется освобождение или защемление ходового винта. Палец 8 используется для автоматической остановки двигателя и каретки. Трубу 9 заполняют вручную пластинами и вводят клин, а затем устанавливают на каретку таким образом, чтобы торец трубы прилегал к упорам 10 и Т-образная часть затяжного клина легла бы в прорезь 12. После включения двигателя каретка

будет передвигаться в сторону кнопки 6, а клин затягиваться в полость волноводной трубы. После этого палец 8 нажимает кнопку и выключает двигатель.

Гибка ведется в штампе за несколько переходов, которые осуществляются установкой стальных прокладок между деталью и пуансоном. Количество переходов зависит от радиуса гибки и устанавливается опытным путем. Заполнение полости стальными пластинами обеспечивает стабильность внутренних размеров сечения волноводной трубы. После гибки клин вытягивается и пакеты удаляются.

Точность размеров поперечного сечения волноводной трубы в области изгиба при использовании в качестве заполнителя стальных полос соответствует требованиям 3-го класса точности.

Одним из недостатков является возможность образования рисок на токонесущей поверхности при введении и извлечении стальных пластин.

Перспективной для гибки волноводных труб с сохранением жестких допусков на внутренние размеры является гибка с *шарнирной оправкой*. Приспособление для гибки (рис. 1.9, а) состоит (рис. 1.9, б) из шарнирной оправки 1, подвижного упора 2, поворотного прижима 3, складкодержателя 4 и шаблона 5, который может поворачиваться вокруг оси 6 вместе с изгибаемой заготовкой. Для уменьшения трения между заготовкой и складкодержателем проложена тонкая стальная полоса 7, скрепленная с шаблоном.

Заготовка с шарнирной оправкой закрепляется зажатием между складкодержателем и неподвижным упором с одного конца, шаблоном и поворотным прижимом с другого. При этом шаблон и поворотный прижим жестко соединяются. В процессе гибки они поворачиваются на требуемый угол вокруг оси 6. Часть трубы, обращенная к шаблону подвергается сжатию, а противоположная — растяжению. Сжимаемая часть укорачивается и толщина стенки в этой области растет, в растягиваемой части происходит растяжение стенок с их одновременным утончением. Металл перемещается не только в изогнутой, но и в прямой части трубы — в пределах 15—25 мм от крайних точек изгиба. Вследствие этого предусмотрены скосы на складкодержателе и шаблоне (на рис. 1.9, б — А и В), предохраняющие сжимаемую поверхность от образования гофров.

Несмотря на изменение внешних размеров волновода, внутренние его размеры остаются стабильными благодаря шарнирной оправке. Они могут быть выполнены с точностью $\pm 0,05$ при чистоте токонесущей поверхности в пределах 9—10 классов.

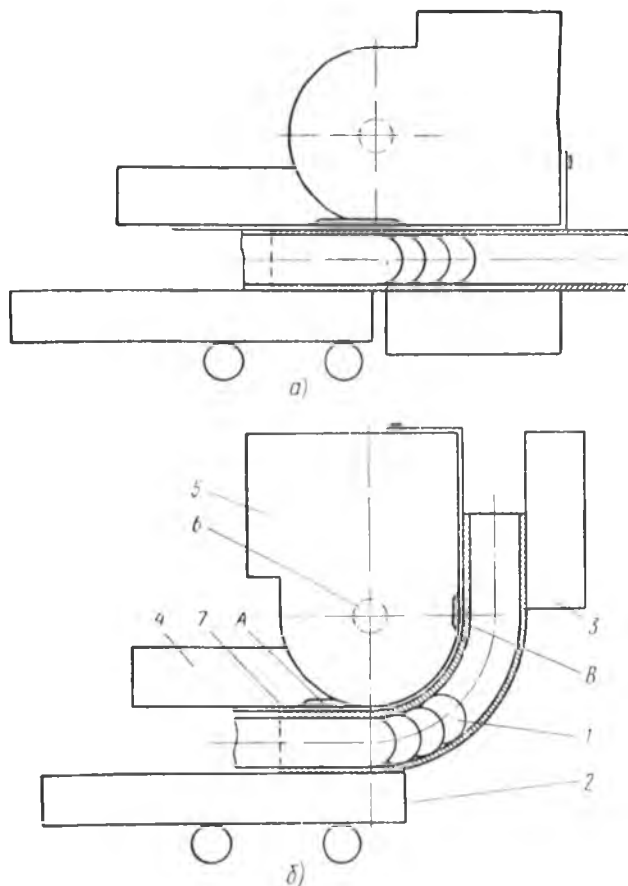


Рис. 1.9. Схема гибки с шарнирной оправкой:
а — исходное положение; б — положение в конце гибки

При гибке волноводов с малыми радиусами внешняя стенка подвергается сильному растяжению. Это может вызвать образование трещин в стенке волновода

и даже ее разрушение. Для уменьшения растягивающих напряжений к концу волновода прикладывается сжимающее усилие, которое смещает нейтральную ось к внешней, относительно изгиба, стенке волновода и способствует сохранению волноводом механической прочности.

На рис. 1.10, а и б даны кривые, характеризующие зависимость максимального изменения толщины внутренней и наружной стенок волноводной трубы от радиуса гибки. Они построены для случая, когда нейтральная ось совпадает с осью изогнутого волновода. Из

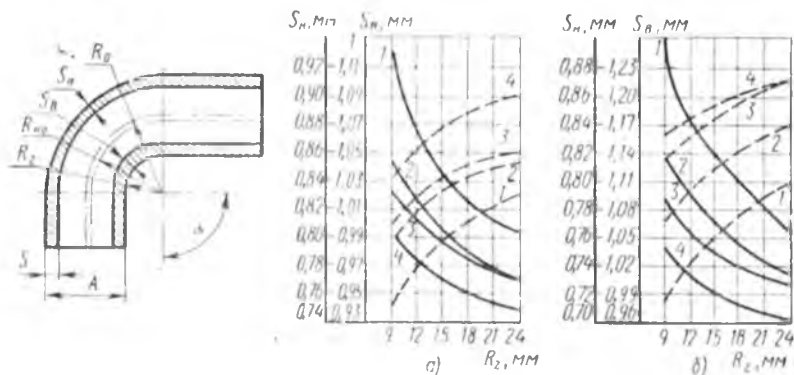


Рис. 1.10. Зависимость максимального изменения толщины внутренней (S_n) и наружной ($S_{\text{н}}$) стенок волноводной трубы в зоне гибки от радиуса гибки (толщина стенок исходных заготовок $S=0,9$ мм): а — гибка в плоскости E; б — гибка в плоскости H; 1 — сечение $11 \times 5,5$ мм; 2 — сечение $7,2 \times 3,1$ мм; 3 — сечение $5,2 \times 2,6$ мм; 4 — сечение $3,6 \times 1,8$ мм

графиков видно, что с изменением радиуса и плоскости изгиба условия гибки для различных сечений меняются по-разному. Наибольшие изменения появляются в случае изгиба сечений $7,2 \times 3,4$ и $11 \times 5,5$ мм в плоскости H с малыми радиусами, когда относительное изменение толщины стенок достигает 20—40%; и наоборот, с увеличением радиуса гибки или уменьшением размеров поперечного сечения величины относительных деформаций уменьшаются.

Точность размеров канала волновода и чистота его токонесущей поверхности определяются качеством шарпирной оправки. Оптимальное положение оправки относительно зоны изгиба определяется экспериментально.

Оправка состоит из жесткой шейки и гибкой секции, которая набрана из роликов, соединенных стальным тросиком. Количество звеньев 15—25. Чистота их поверхности должна быть не ниже 11-го класса. В качестве материала для них используются стали У12 или

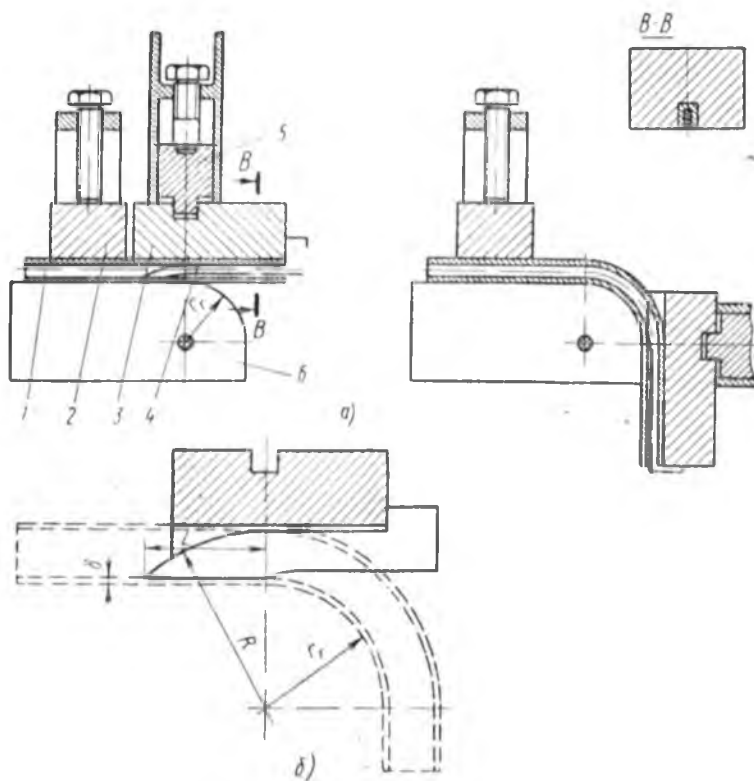


Рис. 1.11. Схема гибки с применением жестких калибрующих оправок:

а — положение оправки в начале и конце гибки; б — калибрующая оправка

ХВГ с последующей термообработкой до HRC 58—60. Хромирование недопустимо, так как оно может вызвать паллирование металла стенок волноводной трубы на оправку, а это ведет к появлению рисок на токонесущей поверхности.

Область применения шарнирных оправок ограничивается сложностью изготовления и малой механической прочностью при малых размерах.

Для гибки волноводных труб с размерами $5,2 \times 2,6$ и $3,6 \times 1,8$ используется гибка с применением жестких калибрующих оправок.

Заготовка 1 (рис. 1.11, а) помещается на шаблон 6, форма которого соответствует требуемому радиусу гибки. Прижим 2 фиксирует положение неподвижного конца трубы.

На подвижный конец заготовки помещается коробчатый фиксатор 3, охватывающий верхнюю и боковые стенки трубы. В трубу вводится калибрующая оправка 4, сцепленная с подвижным фиксатором 3. Гибка осуществляется поворотом рычага 5. При этом фиксатор перемещается относительно неподвижно закрепленной заготовки таким образом, что в процессе гибки зона деформации снаружи ограничена стенками фиксатора, а внутри — оправкой.

Геометрия калибрующей оправки показана на рис. 1.11, б. Размеры ее можно найти из следующих выражений:

при гибке в плоскости E

$$R = r_r + \delta + b;$$

$$L = \sqrt{2b(r_r + \delta) + b^2};$$

при гибке в плоскости H

$$R = r_r + \delta + a;$$

$$L = \sqrt{2a(r_r + \delta) + a^2},$$

где δ — толщина стенок волновода; a и b — внутренние размеры сечения волновода; r_r — радиус гибки (шаблона).

Применение гибки с калибрующей оправкой позволяет обеспечить точность внутренних размеров в пределах $\pm 0,05$ мм.

Для гибки без заполнения полости используется способ *насечки*. При этом изгиб происходит в результате пластической деформации внешних слоев металла стенок волноводной трубы.

Этот способ заключается в том, что изгибаемая заготовка периодически передвигается на шаг l в специальном гибочном станке. В момент остановки происходит удар лезвиями чеканов по верхней и боковым поверхностям заготовки (рис. 1.12). Верхний чекан имеет горизонтально расположенную рабочую кромку и врезаются на одинаковую глубину S по всей ширине верхней стенки. Два боковых чекана имеют кромки, расходящиеся под некоторым углом, и в момент удара врезаются в боковые стенки на глубину, равную глубине резания верхнего чекана, в нижней части они не касаются боковых стенок заготовки.

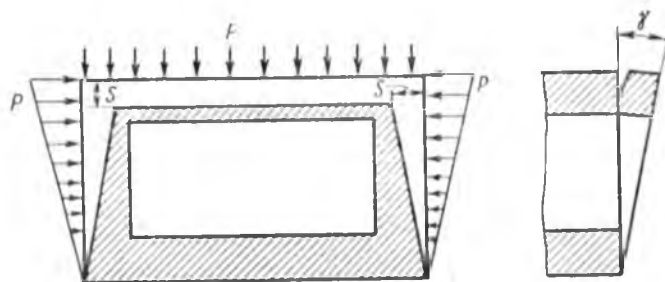


Рис. 1.12. Схема деформаций при гибке волноводной трубы насечкой

В результате происходит удлинение верхней и боковых стенок заготовки — минимальное и постоянное для верхней стенки γ , переменное для боковых, и заготовка изгибается в сторону нижней стенки. Неравномерное удлинение боковых стенок необходимо, чтобы избежать образования на них гофров.

Гибка насечкой характеризуется высокой производительностью и может быть использована для обработки заготовок с различными размерами поперечного сечения (от $11 \times 5,5$ до 248×124 мм).

Кинематическая схема станка для гибки волноводов насечкой приведена на рис. 1.13.

Работает станок следующим образом. Вращение от главного электродвигателя 1 передается через клиноременную передачу 2 на вал 3, на котором находятся эксцентрики 4 и 5. Движение, снятое с эксцентрика 4, при помощи системы рычагов 6, 7, 8 передается на собач-

ку 9 и далее храповому колесу 10. Вал 11, на котором сидит храповое колесо 10, через коническую пару 12, муфту 13 (если она специальной рукояткой фиксатора 14 сдвинута влево) и цепную передачу 15 приводит во вращение ходовой винт 16, по которому поступательно перемещается каретка 17. Она представляет собой гайку,двигающуюся по прямолинейным направляющим.

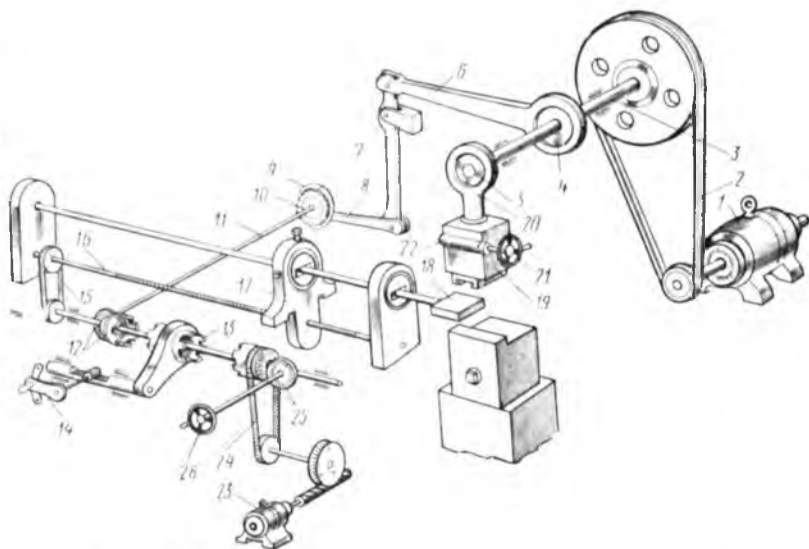


Рис. 1.13. Кинематическая схема станка для гибки насечкой

В прямоугольном окне каретки закрепляется труба (волновод), надетая на оправку (сухарь) 18. Движущаяся каретка осуществляет подачу трубы под ножи. Одновременно с этим вращение с вала 3 передается на эксцентрик 5. Затем вращение с эксцентрика 5 преобразуется в поступательное движение ползуна 19, в котором укреплен верхний нож, деформирующий поверхность трубы. Этот нож своими клиньями нажимает на нижние (боковые) ножи, деформирующие боковую поверхность трубы.

Под действием удара ножей удлиняются верхняя и боковые грани трубы. Радиус изгиба трубы зависит от глубины врезания ножей и расстояния между насечками. Глубина врезания регулируется изменением длины

шатуна 20. Длина шатуна регулируется ввинчиванием или вывинчиванием его из шаровой гайки ползуна 19.

Шаровая гайка связана с червячным колесом. Вращение от рукоятки маховика 21 передается червяку 22, от него — червячному колесу, и через него шаровой гайке.

Для ускоренного отвода или подвода каретки 17 к ножам имеется второй вспомогательный электродви-

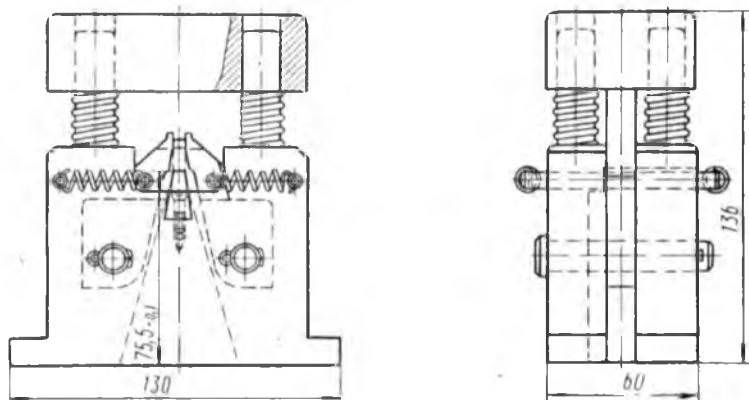


Рис. 1.14. Головка для гибки насечкой (к станку рис. 1.13)

гатель 23, приводящий в движение каретку 17, когда муфта 13 передвинута вправо. В этом случае движение через цепную передачу 24, муфту 13, цепную передачу 15 передается винту 16, а от него — каретке 17.

В этот момент двигатель 1 работает холостую. Отвод и подвод каретки 17 можно осуществлять вручную поворотом маховика 26. Движение от маховика 26 передается ходовому винту 16 через пару конических колес 25, муфту 13 и цепную передачу 15. В этом случае оба двигателя выключены.

С помощью станка осуществляют изгиб волноводной трубы в *E*- и *H*-плоскостях. В связи с этим в комплект станка входят две гибочные головки (рис. 1.14).

Радиус гибки регулируется шагом насечки и глубиной врезания лезвий чекана. Эта глубина может изменяться в относительно узких пределах (до 0,3 толщины стенки волновода), что необходимо для сохранения механической прочности волновода и геометрии его поло-

сти в месте изгиба. Величину шага можно найти аналитически.

Для получения заданного радиуса изгиба требуется определенное удлинение верхней стенки заготовки. Удлинение, даваемое одной насечкой (рис. 1.15, а),

$$\Delta l \approx S / \operatorname{tg} \alpha,$$

где S — глубина врезания; α — угол при вершине лезвия чекана.

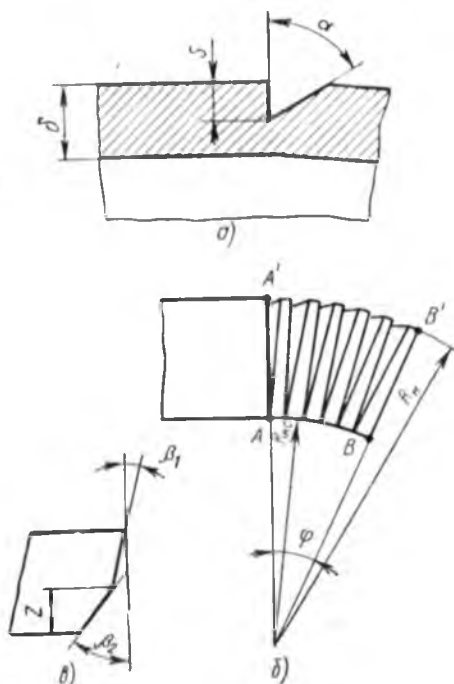


Рис. 1.15. Схема к расчету числа насечек (а, б) и геометрия режущей кромки бокового чекана (в)

Требуемое удлинение верхней стенки (рис. 1.15)

$$\Delta L = \overset{\circ}{A'B'} - \overset{\circ}{AB} = \frac{2\pi f}{360} (R_n - R_{nc}),$$

где R_n — заданный радиус кривизны верхней стенки; R_{nc} — радиус кривизны нижней стенки; f — угол изгиба.

Учитывая, что $R_{ис} = R_n - a_1$, при гибке
по узкой стенке

$$\Delta L = f a_1;$$

по широкой стенке

$$\Delta L = f b_1,$$

где a_1, b_1 — внешние размеры волновода.

Отсюда необходимое число насечек

$$n = \Delta L / \Delta l.$$

При гибке

по узкой стенке

$$n_a = \frac{f a_1 \operatorname{tg} \alpha}{S};$$

по широкой стенке

$$n_b = \frac{f b_1 \operatorname{tg} \alpha}{S}.$$

Тогда шаг насечки

$$t = \frac{AB}{n}.$$

Из выражений для n_a и n_b

$$t_a = \frac{R_{ис} S}{b_1 \operatorname{tg} \alpha},$$

$$t_b = \frac{R_{ис} S}{a_1 \operatorname{tg} \alpha}.$$

Данный расчет справедлив при $t > 1,2 \Delta l$.

Как правило, снимаются графики зависимости $R_{ис} = f(S, n)$ и по ним выбираются оптимальные значения S и n . На рис. 1.16, а приведен такой график для волновода 23×10 и подачи трубы $0,8$ мм/удар.

Оптимальный угол заточки чекана $\alpha = 78-80^\circ$. При меньших углах значительно падает удлинение верхней стенки Δl , при больших — возрастает усилие насечки и становятся более значительными деформации поперечного сечения.

Шаг подачи целесообразно выбирать не менее $0,2$ мм. Уменьшение его против указанной величины дает незна-

чительное уменьшение радиуса гибки за счет перераспределения металла в насечках (рис. 1.16, б).

Уменьшения требуемой глубины насечки при неизменном радиусе гибки и шаге насечки можно достигнуть при использовании боковых чеканов с конфигурацией режущей кромки показанной на рис. 1.15, в. Для него

$$\operatorname{tg} \beta_1 = 0,5/h$$

$$\text{при } \delta = 1,5 \text{ мм};$$

$$\operatorname{tg} \beta_1 = 0,4/h$$

$$\text{при } \delta = 1 \text{ мм};$$

$$\operatorname{tg} \beta_1 = 1,6/h$$

$$\text{при } \delta = 1,5 - 1 \text{ мм},$$

где h — внешний размер боковой стенки волновода; δ — толщина стенки.

Достоинством гибки насечкой является высокая производительность, возможность перестройки на различные радиусы гибки и широкий диапазон размеров волноводов.

Недостатки способа: относительно высокая стоимость оборудования, изме-

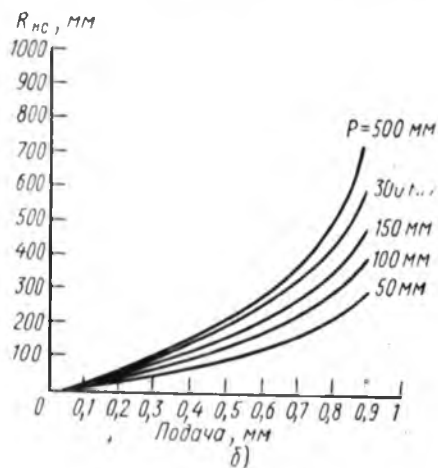
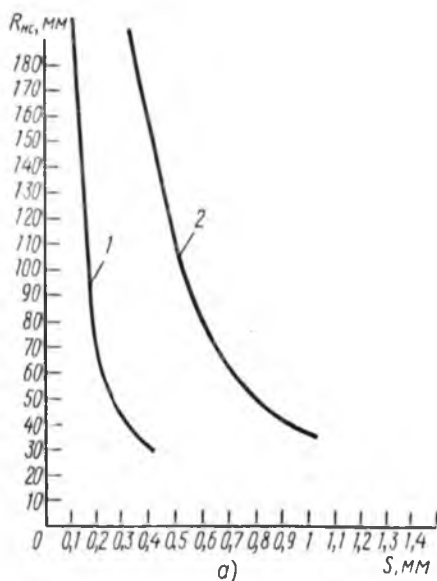


Рис. 1.16. Зависимость радиуса кривизны нижней стенки:

а — от глубины врезания (S) при гибке волновода сечением $23 \times 10 \text{ мм}$; б — от подачи для волноводов с различным периметром (P); 1 — гибка по широкой стенке; 2 — гибка по узкой стенке

нение структуры металла в области насечки, вызывающее рост его удельного сопротивления, ухудшение микро- и макрогеометрии в зоне гибки, уменьшение механической прочности волноводной трубы.

При гибке способом насечки обеспечивается допуск на внутренние размеры волноводной трубы $\pm 0,1$ мм.

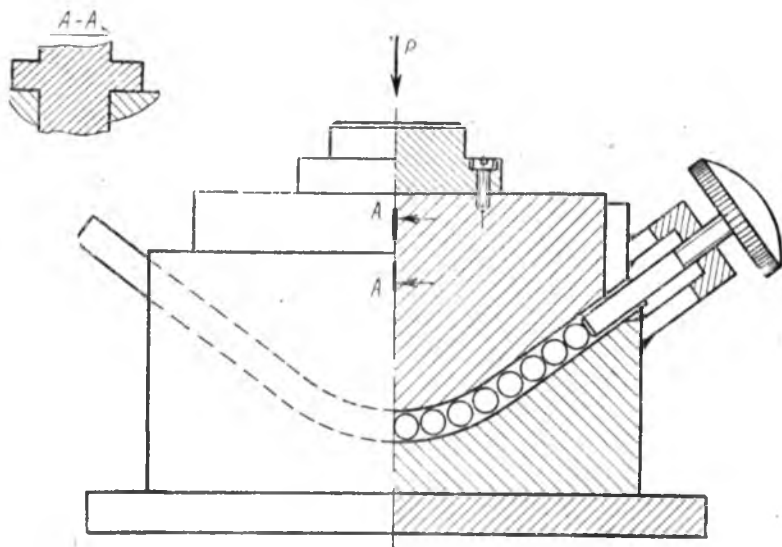


Рис. 1.17. Винтовое приспособление для калибровки изогнутых волноводов с помощью роликов

Повышение точности размеров канала волновода в области изгиба после гибки можно достигнуть путем дополнительной его калибровки, применяемой для всех способов гибки. Изогнутая волноводная труба, обезжиренная и отожженная, помещается в приспособление, фиксирующее ее положение. Через нее проталкиваются калибровочные ролики. Обычно используется 30—50 роликов переменного диаметра. Наименьший ролик на 0,2—0,3 мм меньше окончательных размеров волновода. Каждый из последующих на 0,01 мм больше предыдущего.

Последние 10 роликов имеют одинаковые размеры, соответствующие номинальным размерам неизогнутой части канала волновода. При проталкивании сквозь волноводную трубу ролики осаживают металл стенок

и сглаживают неровности токонесущей поверхности. Калибровочные ролики проталкиваются с помощью фрикционного пресса или винтового приспособления (рис. 1.17). Калибровка сопряжена с наклепом внутренней проводящей поверхности.

Для выбора способа гибки, кроме точностных характеристик, необходим анализ его экономических показателей для конкретных условий производства.

Учитывая, что производительность процесса определяется количеством деталей, изготавливаемых за единицу времени

$$Q = \frac{\Phi}{\Sigma T_{шт}}$$

где Q — производительность; Φ — фонд рабочего времени; $\Sigma T_{шт}$ — штучное время.

По данным табл. 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6 можно сравнить производительность процессов гибки с заполнением различными заполнителями и без них.

Таблица 1.2

Штучное время для изгиба полинодных труб с заполнением легкоплавкими наполнителями

Последовательность изгибов	Плоскость изгиба	Угол изгиба, град	Пресс гидравлический	
			Периметр трубы, мм	
			до 50	до 100
			Время на один изгиб, мин	
1-й	По широкой стенке	45	2,0	2,2
		90	2,5	2,7
		180	3,3	3,5
	По узкой стенке	45	2,4	2,6
		90	3,0	3,2
		180	4,0	4,2
2-й	По широкой стенке	45	3,6	3,8
		90	4,0	4,2
		180	4,5	4,7
	По узкой стенке	45	4,0	4,2
		90	4,5	4,7
		180	4,9	5,1

Таблица 1.3

Штучное время для изгиба поливиниловых труб с заполнением пакетом стальных пластин				
Плоскость изгиба	Длина пакета стальных пластин	Угол изгиба	Периметр трубы, мм	
			до 50	до 100
			Время на один изгиб, мин	
По широкой стенке	200	45	5,3	9,0
		90	6,0	10,2
		180	6,2	11,6
	400	45	6,8	11,6
		90	7,6	13,1
		180	8,7	14,0
По узкой стенке	200	45	6,7	11,2
		90	7,5	12,5
		180	8,6	14,5
	400	45	8,5	14,5
		90	9,5	16,3
		180	10,7	17,5

Таблица 1.4

Штучное время для изгиба поливиниловых труб с шарнирной калибрующей оправкой					
Периметр трубы, мм, до	Угол изгиба, град, до	Внутренний радиус изгиба			
		25	50	75	100
		Время на один изгиб, мин			
25	45	2,3	2,25	2,2	2,05
	60	2,40	2,35	2,30	2,25
	90	2,5	2,45	2,40	2,35
	120	2,6	2,55	2,50	2,45
	150	2,70	2,65	2,60	2,55
50	45	2,75	2,70	2,65	2,60
	60	2,90	2,80	2,75	2,70
	90	3,00	2,96	2,90	2,80
	120	3,10	3,05	3,00	2,95
	150	3,25	3,20	3,10	3,05

Таблица 1.5

Штучное время для изгиба волноводных труб с жесткой калибрующей оправкой		
Периметр трубы, мм до	Угол изгиба в градусах	
	до 90	свыше 90
	Время на одну волноводную трубу, мин	
25	1,7	2,0
50	2,1	2,5

Таблица 1.6

Неполное штучное время для изгиба волноволновых труб насечкой														
Число двойных ходов подзума в минуту	Подача за один двойной хол. мм	Разнос изгиба, мм, до	Угол изгиба, град, до											
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	120	150	180
			Время на один изгиб, мин											
140	0,2	15	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,4	1,5	1,6	1,7	2,1	2,3	2,7
		25	0,9	1,0	1,2	1,3	1,5	1,7	1,9	2,0	2,2	2,7	3,2	3,7
		50	1,0	1,3	1,7	2,0	2,3	2,7	3,0	3,3	3,6	4,7	5,6	6,9
		75	1,3	1,9	2,4	3,0	3,6	4,2	5,0	5,4	6,0	7,7	9,4	11,1
120	0,2	15	0,8	0,9	1,1	1,2	1,3	1,4	1,6	1,7	1,8	2,2	2,6	3,0
		25	0,9	1,1	1,3	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	3,0	3,6	4,2
		50	1,1	1,5	1,8	2,2	2,6	3,0	3,3	3,7	4,1	5,3	6,4	7,5
		75	1,4	2,0	2,7	3,4	4,1	4,7	5,4	6,1	6,6	8,8	10,5	12,8
140	0,4	50	0,8	1,0	1,1	1,3	1,5	1,7	1,8	2,0	2,2	2,7	3,3	3,8
		75	0,9	1,2	1,4	1,7	2,0	2,3	2,5	2,8	3,1	3,9	4,6	5,5
		100	1,0	1,3	1,7	2,0	2,4	2,7	3,1	3,4	3,8	4,8	5,9	6,9
		125	1,1	1,5	2,0	2,4	2,8	3,3	3,7	4,3	4,6	5,9	7,2	8,3
		150	1,2	1,6	2,1	2,7	3,2	3,7	4,2	4,8	5,3	6,8	8,4	9,9
120	0,4	50	0,8	1,0	1,2	1,4	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	3,1	3,7	4,3
		75	0,9	1,2	1,6	1,9	2,2	2,5	2,8	3,1	3,4	4,4	5,3	6,2
		100	1,0	1,4	1,8	2,3	2,7	3,1	3,5	3,9	4,3	5,6	6,8	8,0
		125	1,1	1,6	2,1	2,7	3,2	3,7	4,2	4,7	5,2	6,8	8,3	9,8
		150	1,2	1,8	2,5	3,1	3,7	4,3	4,9	5,5	6,2	8,0	9,9	11,7

Нормативы штучного времени, приведенного в таблицах, включают: основное и вспомогательное время, а также время обслуживания рабочего места, перерыв на отдых.

Неполное штучное время имеет все элементы штучного времени, исключая вспомогательное время на установку, крепление и снятие детали.

Угловые изгибы получают пайкой, используя прямолинейную волноводную трубу прямоугольного поперечного сечения. Раскрой заготовок, который ведется фрезерованием, показан на рис. 1.4.

Гибку заготовок осуществляют в гибочном приспособлении, фиксирующем положение заготовки. Для этого в полость трубы с обеих сторон вводятся металлические вкладыши, которые затем фиксируются. Остывание волноводной трубы после пайки происходит в том же приспособлении, это исключает возможность ее коробления.

В условиях серийного производства угловые и плавные изгибы получают литьем или используя гальванопластику. Подробно эти методы, их точностные и экономические характеристики рассмотрены в гл. 2.

§ 1.2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ СКРУЧЕННЫХ ВОЛНОВОДНЫХ ТРУБ

Скрученные волноводы используются для изменения направления поляризации волны. Участок от начала



Рис. 1.18. Волноводная труба, скрученная на 90°

скрутки до ее конца является областью распределенной неоднородности. Для лучшего согласования длина участка (рис. 1.18) должна быть равна длине волны в волноводе. Длины волн в скрученном и прямолинейном

волноводах примерно равны, если размеры и форма прямоугольного и скрученного участков в любом поперечном сечении постоянны и одинаковы.

При изготовлении скрученных труб кроме требуемого угла скручивания заготовки необходимы постоянные внутренние размеры и чистота внутренней поверхности. Применяют скручивание с заполнением полости заготовки. В качестве заполнителей используют те же материалы, что и при гибке волноводов.

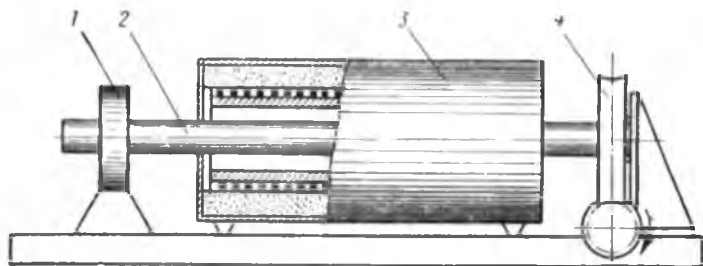


Рис. 1.19. Установка для скручивания волноводных труб в нагретом состоянии:

1 — неподвижный зажим; 2 — волноводная труба; 3 — муфельная печь;
4 — вращающийся зажим

В зависимости от размеров поперечного сечения трубы применяются разные заполнители и технологические процессы скручивания.

Волноводные трубы большой жесткости с размерами поперечного сечения более 72×34 скручивают в нагретом состоянии. Схема установки приведена на рис. 1.19. В качестве заполнителя применяют кварцевый песок, что приблизительно на один класс ухудшает чистоту внутренней поверхности волноводной трубы.

Процесс скручивания состоит в следующем. Заготовку заполняют кварцевым песком, после чего ее концы закрывают заглушками, помещают в муфельную печь и выдерживают при $300\text{--}400^\circ\text{C}$ в течение 25—30 мин. Один конец заготовки закреплен в неподвижном зажиме, второй — в подвижном, ось вращения которого совпадает с осью заготовки. Скручивание волноводной трубы на требуемый угол осуществляется с помощью червячной пары. Большое значение имеет постоянство температуры в зоне скручивания. Непостоянство температу-

ры, вызванное повышенной теплоотдачей в краевых областях печи, ведет к неравномерному скручиванию, что учитывают при конструировании печи, предусматривая повышение температуры краевых областей при понижении в центральных. Это дает возможность обеспечивать точность внутренних размеров волноводной трубы в зоне скручивания в пределах $\pm 0,1$ мм.

Волноводные трубы с поперечным сечением 72×34 или меньше можно скручивать в *холодном состоянии*. Для снятия внутренних напряжений перед скручиванием проводится отжиг.

В качестве заполнителя наиболее распространены стальные пластины, располагаемые перпендикулярно к оси заготовки. Набранные в пакет пластины соединяются шпилькой и сжимаются вкладышами и гайками так, чтобы обеспечить возможность вращения пластин вокруг шпильки при скручивании. Собранный пакет шлифуется с четырех сторон, обильно смазывается и помещается в волноводную трубу. Между пакетом и стенками волноводной трубы прокладывается медная или латунная фольга толщиной 0,2 мм для предохранения токонесущей поверхности от царапин при скручивании, установке и извлечении пакета.

Скручивание ведется в приспособлении (рис. 1.20), которое обеспечивает жесткое закрепление одного конца волноводной трубы и поворот другого ее конца на требуемый угол. Хорошие результаты дает замена стальных пластин гетинаксовыми.

При этом чистота внутренней поверхности волноводной трубы в области скрутки остается такой же, что и в прямолинейной части.

Если рассматривать скручиваемую волноводную трубу как жесткую балку, что несколько завышает требуемое усилие, то момент кручения для нее

$$M_{кр} = (1/l) f G \beta b_1^2 a_1,$$

где f — угол скручивания; $G = \frac{E}{2(1-\mu)}$ — модуль упругости второго рода (для латуни $E = 1-1,2 \cdot 10^6$ кг/см²); μ — коэффициент Пуассона (0,25—0,35); l — длина скручиваемого участка; a_1 и b_1 — внешние размеры поперечного сечения волноводной трубы; β — коэффи-

ент, зависящий от соотношения сторон (при $a/b=2$, $\beta=0,229$).

Для червячной передачи окружное усилие червяка

$$P = \frac{2M_{кр}}{\eta dn}; \quad d = qm_s,$$

где q — относительный диаметр червяка; m_s — осевой модуль; η — к.п.д. червячной передачи; n — число оборотов червяка в минуту.

Требуемое для скручивания усилие определяется из:

$$Ph = M_{кр}d,$$

где P — требуемое усилие; h — плечо усилия, приложенного к червяку.

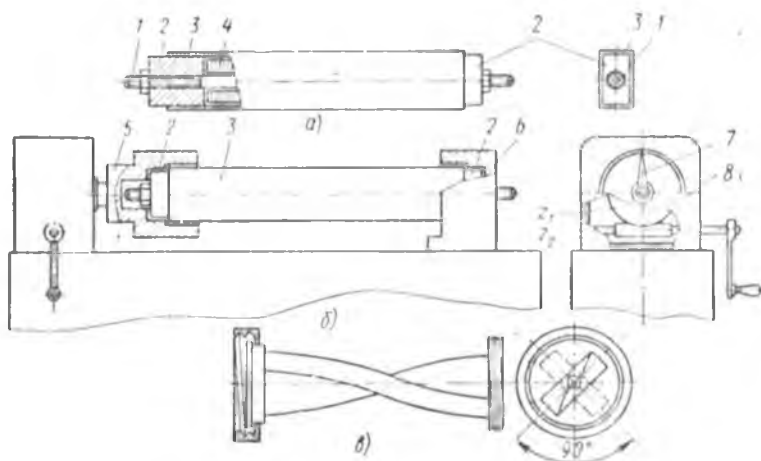


Рис. 1.20. Приспособление для скручивания волноводов в холодном состоянии:

a — заготовка, заполненная пластинами; b — схема станка для скручивания; a — скрученный волновод: 1 — шпилька; 2 — вкладыши; 3 — заготовка; 4 — пластины; 5 — патрон; 6 — зажимное устройство; 7 — указатель угла скручивания; 8 — червячная передача

Для волноводных труб с размерами поперечного сечения 23×10 усилие скручивания лежит в пределах 30–40 кг.

После скручивания удаляется шпилька и пластины извлекаются из полости волноводной трубы.

Для скручивания волноводных труб с размерами поперечного сечения менее $11 \times 5,5$ мм один из рассмотренных способов не пригоден, так как не обеспечивает требуемой точности размеров поперечного сечения и чистоты токонесущей поверхности. Для этого случая скручивание ведется в приспособлении (рис. 1.21) с помощью жесткой калибрующей оправки. Конец заготовки 1 вводится в цангу 2, находящуюся в задней бабке 3, на глубину l , равную длине участка, не подвергающегося скручиванию. Для предохранения волноводной трубы от повреждения при сжатии цанги в нее вводится оправка 4. Поворотом гайки 5 конец заготовки 1 прочно за-

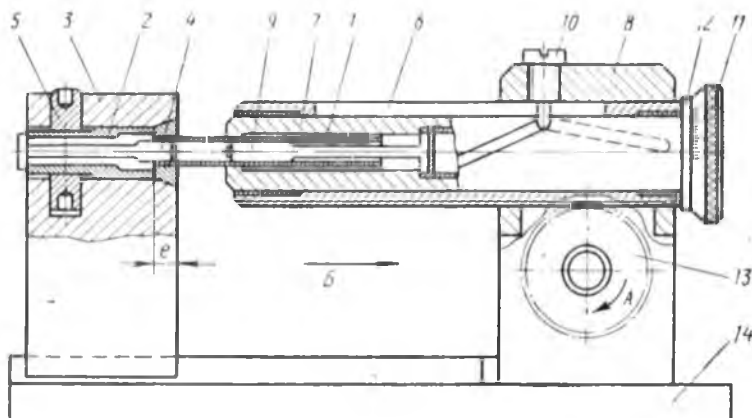


Рис. 1.21. Приспособление для скручивания волноводов миллиметрового диапазона с применением жесткой калибрующей оправки

жимается в цанге 2. Затем пиноль 6 и шпindel 7, расположенные в передней бабке 8, перемещаются влево в исходное положение таким образом, чтобы заготовка 1 вошла в окно шпинделя 7, а находящаяся в шпинделе оправка 9 вошла в полость заготовки 1.

В этом положении торец шпинделя 7 должен упираться в торец задней бабки 3, с тем чтобы оправки 9 и 4 полностью перекрывали полость заготовки 1. Предварительно оправка 4 устанавливается своим торцом заподлицо с торцом задней бабки, а оправка 9 заподлицо с торцом шпинделя 7. На шпинделе 7, который

может вращаться в шпиндели 6, имеется несколько паружных спиральных пазов. Шаг спирали равен $4l_1$, где l_1 — требуемая длина скрученного участка (при скручивании на 90°). В спиральный паз, служащий копиром, входит фиксатор 10, неподвижно укрепленный на корпусе передней бабки 8. Указатель угла скручивания — кольцо 11. Оно соединено со шпинделем 7, вращаемым вместе с ним относительно неподвижного, укрепленного на шпиндели 6 кольца 12, и ставится в нулевое положение. При повороте шестерни 13, находящейся в зацеплении с рейкой, нарезанной на нижней стороне шпиндели 6, последняя перемещается вправо в направлении стрелки Б. Вместе с шпинделем поступательное движение совершает шпиндель 7, причем фиксатор 10, входящий в спиральный паз шпинделя, заставляет его одновременно вращаться относительно продольной оси. Вращаясь, шпиндель 7 осуществляет скручивание заготовки 1 на шаг, равный шагу спирального паза, в который входит фиксатор 10. При отходе шпинделя от задней бабки оправка 9 постепенно выходит из скручиваемой зоны, предохраняя от деформации участок волноводной трубы, находящийся внутри шпинделя. Приспособление установлено на основании 14.

Момент окончания скручивания фиксируется указателем угла поворота. При этом риска на подвижном кольце 11 должна совпадать с риской на кольце 12, смещенной относительно первой на 90° или на любой другой заданный угол скручивания.

В зависимости от длины волноводной трубы и скручиваемого участка фиксатор 10 устанавливается в соответствующий паз шпинделя.

Скручивание осуществляется с применением смазки — животного жира или сурепного масла.

Если выбор способов скручивания волноводных труб с размерами поперечного сечения более 72×34 и менее $11 \times 5,5$ однозначен, то для скручивания волноводных труб с размерами поперечного сечения, лежащими в промежутке между указанными величинами, возможно варьирование применяемого заполнителя. Выбор типа заполнителя возможен на основе как достижимых точностных характеристик, так и экономического анализа. В табл. 1.7 и 1.8 приведены значения штучного времени скручивания при использовании различных заполнителей.

Таблица 1.7

Материал-заполнитель	Длина трубы, мм, до	Длина скрученной части, мм, до	Периметр трубы, мм, до				
			25	50	100	150	200
			Время, мин				
Церобент, канифоль	500	—	1,9	2,2	2,7	3,2	3,8
	1000	—	2,0	2,4	3,0	3,7	4,3
	1500	—	2,3	2,7	3,4	4,0	4,8

Таблица 1.8

Материал-заполнитель	Длина трубы, мм, до	Длина скрученной части, мм, до	Периметр трубы, мм, до							
			100	150	200	250	300	400	500	600
			Время, мин							
Пакет из мерных пластин	500	150	6,5	9,0	11,3	—	—	—	—	—
		300	—	10,1	12,5	14,7	—	—	—	—
	1000	150	7,2	10,0	12,6	15,0	—	—	—	—
		300	—	11,2	13,9	16,5	19,1	22,0	—	—
		500	—	—	15,4	18,0	20,7	23,6	26,2	28,8
	2000	150	7,9	11,0	13,8	—	—	—	—	—
		300	—	12,3	15,2	18,1	21,0	24,2	—	—
		500	—	—	17,1	19,8	22,7	25,9	28,7	31,6
		750	—	—	—	21,8	24,8	27,9	31,9	35,1
	3000	150	8,7	12,1	15,1	—	—	—	—	—
		300	—	13,5	16,7	19,9	23,1	26,6	29,5	31,0
		500	—	—	19,6	22,0	24,9	28,4	31,5	33,7
		750	—	—	—	24,5	27,8	30,5	33,9	36,4

§ 1.3. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ВОЛНОВОДНЫХ ТРУБ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

В аппаратуре СВЧ часто используются волноводы с переменным по длине поперечным сечением. Обычно это трансформаторы волновых сопротивлений, которые применяются для согласования волноводов с различны-

ми поперечными сечениями и волновыми сопротивлениями. Простейшие трансформаторы с плавно изменяющимися размерами поперечного сечения состоят из волноводной трубы и фланцев. Размеры и форма поперечного сечения волноводной трубы обеспечивают переход от одного поперечного сечения к другому.

При этом согласовании переменными могут быть один или оба размера поперечного сечения волноводной трубы трансформатора (рис. 1.22).

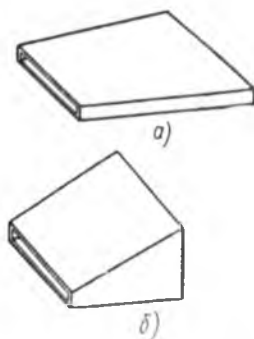


Рис. 1.22. Волноводные трубы с одним (а) и двумя (б) переменными размерами

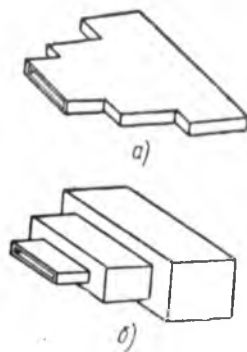


Рис. 1.23. Волноводные трубы со ступенчатым изменением размеров поперечного сечения:

а — переменен один размер поперечного сечения; б — переменны оба размера поперечного сечения

Возможно согласование и с использованием ступенчатых четвертьволновых трансформаторов, при котором происходит ступенчатое изменение размеров поперечного сечения волноводной трубы. Переменными могут быть, как и в первом случае, один или оба размера поперечного сечения (рис. 1.23).

При согласовании волноводов с различной формой поперечного сечения используются трансформаторы, у которых волновод плавно или ступенчато изменяет размеры и форму поперечного сечения. Примером этого служат широкополосные волноводно-коаксиальные переходы (рис. 1.24). Широкополосность такого перехода достигается за счет низкого волнового сопротивления П-образного волновода, которое может быть равным вол-

новому сопротивлению стандартного коаксиального волновода. Клин, согласующий П-образный волновод с прямоугольным, выполняется плавной формы — с линейным или экспоненциальным законом изменения высоты, или ступенчатым — с различным законом изменения высоты ступенек. Наибольшую широкополосность при наименьших размерах перехода обеспечивает так называемый чебышевский ступенчатый клин. В таком клине длина и высота отдельных ступенек рассчитываются по полиномам Чебышева.

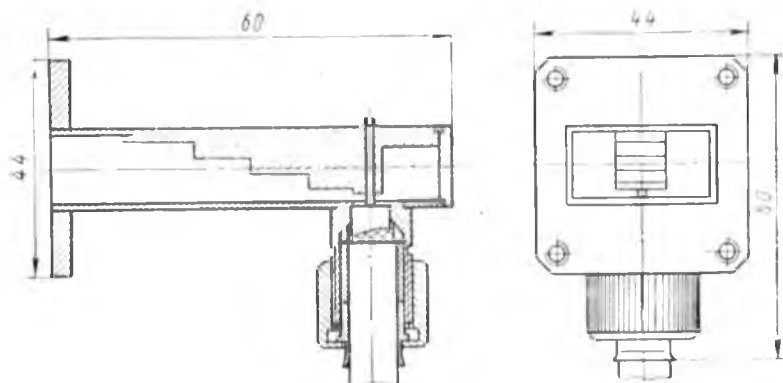


Рис. 1.24. Широкополосный волноводно-коаксиальный переход

Принята следующая классификация волноводных труб с переменным поперечным сечением: с одним переменным размером (переменной высотой или шириной); с двумя переменными размерами (переменной высотой и шириной); с переменной формой поперечного сечения. Волноводные трубы с *одним переменным размером* в условиях мелкосерийного производства изготавливают с помощью сварки или пайки. В качестве заготовки используют стандартные трубы прямоугольного поперечного сечения, у которых на расчетной длине удаляют соответствующие стенки. При изготовлении волноводных труб с переменной шириной у заготовки удаляют участки широких стенок, если переменна высота — участки узких стенок (рис. 1.25). Удаление участков стенок производят на фрезерном станке. Выступающие части стенок формируются на оправке в соответствии с требуемым законом изменения поперечного сечения. Оправка вы-

полняет роль матрицы, концы которой вводят в полость заготовки, базируя оправку (рис. 1.25, б).

После формовки на обрабатываемый участок заготовки помещают накладки 2 (рис. 1.25, в), представляющие собой пластины толщиной, равной толщине стенок заготовки, с такой же чистой поверхностью и из того же материала. Накладки служат стенками участка волноводной трубы с переменным поперечным сечением. Соединение накладок с заготовкой осуществляется сваркой или пайкой на формирующей оправке 1. Способ соединения определяется конфигурацией шва, размерами сборочной единицы и требуемыми эксплуатационными характеристиками. В процессе пайки, сварки или при остывании волноводной трубы оправка препятствует деформации ее поперечного сечения.

В табл. 1.9, 1.10 приведены значения штучного и неполного штучного времени на формовку стенок и пайку твердым припоем волноводных труб с одним переменным размером.

Изменить один из размеров исходного прямоугольного поперечного сечения полости заготовки можно с помощью вкладышей (рис. 1.26), которые крепятся к стенкам заготовки винтами. Поверхность вкладышей, контактирующая с поверхностью заготовки, предварительно серебрится. После их установки и закрепления осуществляют пайку сборочной единицы в печах. Припоем служит гальванически осажденное серебро. Вкладыши изготавливаются из того же материала, что и прямоугольная труба, фрезерованием. Если на минимальный размер поперечного сечения волноводной трубы заданы жесткие допуски (например, $\pm 0,01$ мм), которые

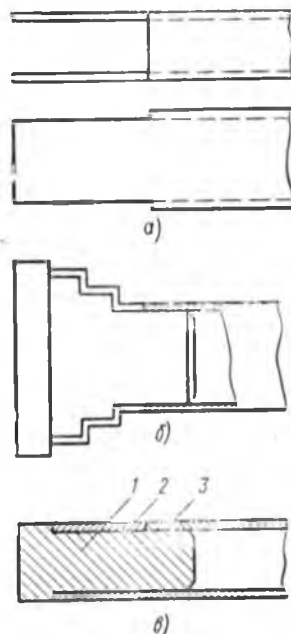


Рис. 1.25. Получение ступенчатого волновода методом пайки:

а — форма исходной заготовки; б — формовка стенок заготовки; в — установка накладок на заготовку: 1 — оправка; 2 — накладка; 3 — прямоугольная заготовка

Таблица 1.9

Длина изгибаемой стенки, мм до	Периметр трубы, мм, до	Количество изгибов		
		4	6	8
		Время на формовку обеих стенок, мин		
200	150	1,8	2,2	2,5
	200	2,1	2,7	3,2
	300	2,5	3,2	4,0
300	150	2,1	2,5	3,0
	200	2,6	3,3	3,7
	300	3,0	3,8	4,8
600	150	2,9	3,4	4,1
	200	3,6	4,5	5,1
	300	4,2	5,2	6,5

Таблица 1.10

Метод пайки и припой	Периметр трубы, мм, до	Суммарная длина шва, мм, до					
		600	800	1000	1200	1400	1600
		Время, мин					
ПСР-45 Пайка газовой горелкой	100	4,5	5,9	7,4	8,9	10,3	11,9
	200	5,1	6,4	8,1	9,6	11,6	12,6
	300	5,5	6,7	8,4	10,1	11,5	13,2
	400	5,9	6,9	8,7	10,4	12,0	13,8
ПСР-40 Пайка паяльни- ком	100	7,7	9,1	10,5	12,0	13,5	14,7
	200	8,4	9,7	11,1	12,6	14,0	15,3
	300	9,6	10,8	12,4	13,7	15,2	16,7
	400	10,4	11,7	13,2	14,6	16,0	17,5

при сборке и пайке получить очень сложно, то после пайки производят калибровку. При ширине волновода $a \geq 2$ мм она выполняется жестким пуансоном; при $a < 2$ мм хорошие результаты дает использование отрезка стальной закаленной проволоки. Пуансон (рис. 1.27) де-

дается несколько тоньше щели и проталкивает сквозь нее калибрующую проволоку, которую при износе легко заменить. При этом пуансон практически не изнашивается.

Волноводные трубы прямоугольного поперечного сечения с *двумя переменными размерами* с изменяющейся шириной и высотой выполняются калибровкой конусной заготовки в штампах. Эта заготовка выдавливается по оправке на токарном станке из листа. Точность размеров лежит в пределах 0,2—0,5 мм. После выдавливания следует отжиг для снятия внутренних напряжений и калибровка в штампе, обеспечивающая точность размеров $\pm 0,5 \div \pm 0,25$ мм и чистоту поверхности по 6—8-му классу. Завершающими опе-

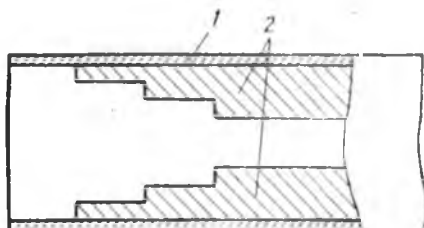


Рис. 1.26. Волновод с переменным сечением, выполненный с использованием ступенчатых вкладышей:

1 — заготовка; 2 — ступенчатые вкладыши

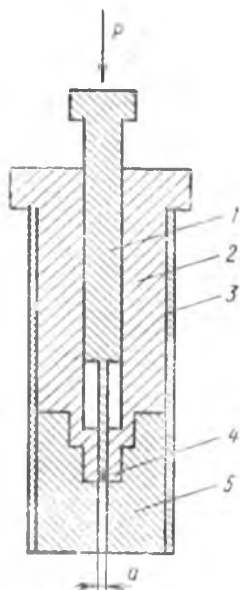


Рис. 1.27. Приспособление для калибровки канала волновода:

1 — пуансон; 2 — направляющие; 3 — заготовка; 4 — калибрующая проволока; 5 — ступенчатые вкладыши

рациями являются отрезка дна, образовавшегося при выдавливании, и подрезка торца.

Волноводные трубы с *переменной формой поперечного сечения* и прямоугольного сечения с двумя переменными размерами изготавливаются одинаково. В условиях мелкосерийного производства волноводные трубы, представляющие собой переход от прямоугольного к П-образному поперечному сечению, изготавливаются сборными с последующей пайкой. Вкладыш крепится к стенке волновода винтами. Правильность установки достигается

применением оправок, помещаемых между стенкой волновода и вкладышем. Оправки извлекаются из узла после его пайки.

В серийном производстве все перечисленные типы волноводных труб с переменным поперечным сечением можно изготовить точным литьем или с применением гальванопластики (см. § 2.2, 2.4).

При использовании точного литья волноводная труба выполняется из двух половин, которые соединяются винтами или спаиваются, в зависимости от конструкции.

При изготовлении волноводных труб с помощью гальванопластики используется наращивание на возвратные формы.

§ 1.4. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ГОФРИРОВАННЫХ ВОЛНОВОДНЫХ ТРУБ

Основные требования к гибким волноводам — гибкость, механическая прочность и обеспечение минимальных потерь энергии при включении в передающую линию. Эти волноводы позволяют соединять жесткие волноводы со смещенными или пересекающимися осями.

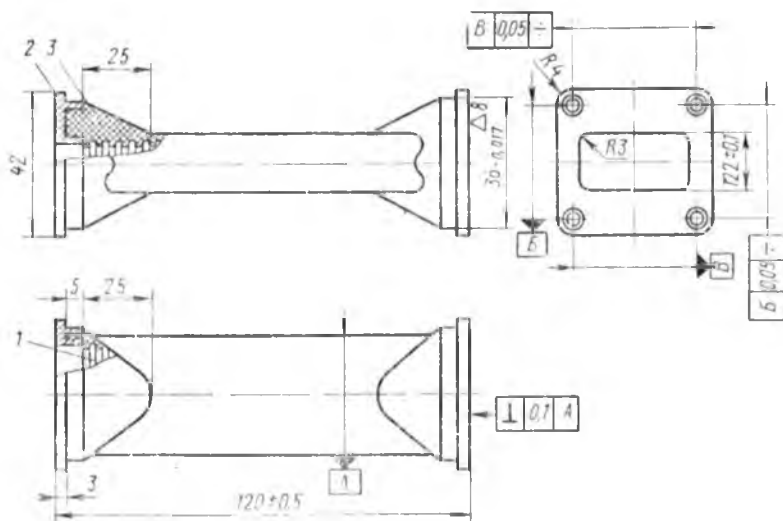


Рис. 1.28. Гибкий волновод

Гибкий волновод (рис. 1.28) состоит из гофрированной волноводной трубы прямоугольного поперечного сечения 1 с соединительными фланцами 2 на концах. Для предохранения от коррозии, увеличения срока службы его внешняя поверхность покрыта слоем резины 3.

Геометрия гофра очень сильно влияет на механические и электрические характеристики гибкого волновода.

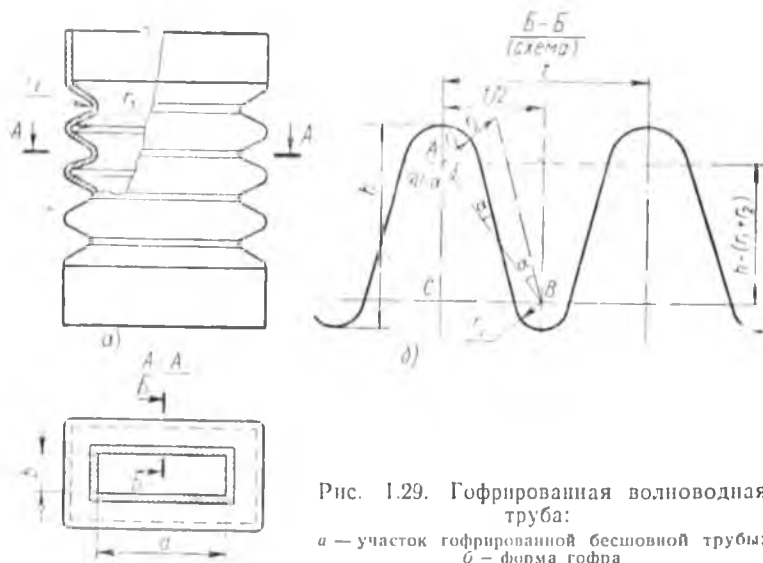


Рис. 1.29. Гофрированная волноводная труба:

a — участок гофрированной бесшовной трубы;
б — форма гофра

Правильно выбранная геометрия обеспечивает изгиб с малым радиусом в *E* и *H*-плоскостях без изменения поперечного сечения волновода.

Для снижения влияния неоднородностей, вызванных гофрированной структурой стенок гибкого волновода, глубину гофрировки делают значительно меньше длины волны (менее $0,1\lambda_w$).

Как показали исследования, лучшие механические и электрические характеристики у гибкого волновода, форма гофра которого показана на рис. 1.29, б. Верхняя и нижняя части гофра выполнены закругленными. Радиус закругления выбирается в соответствии с толщиной стенки и материалом трубы. Так, для латуни Л62 и Л68 он должен не менее чем в пять раз превышать исходную толщину стенки, для бериллевой бронзы — в шесть раз.

Высота гофра составляет $(0,07—0,08)\lambda_n$, где λ_n — длина волны в волноводе.

Технологический процесс изготовления гибкого волновода состоит из получения заготовки; гофрирования волноводной трубы; сборки с фланцами; покрытия наружной поверхности волновода резиной и серебрения.

Гофрированные волноводные трубы изготавливаются из тонкостенных труб (толщина их стенок выбирается в пределах $0,12—0,4$) с малым разбросом по толщине стенки и высокой чистотой внутренней поверхности. Прямоугольные заготовки получают из тонкостенной круглой трубы.

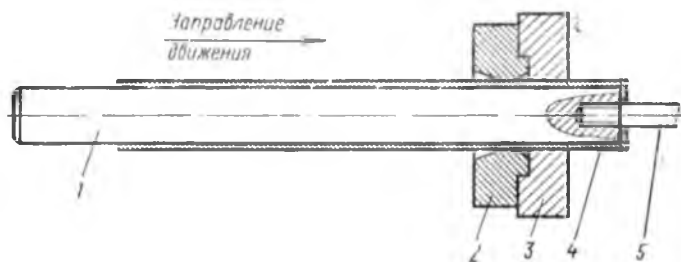


Рис. 1.30. Схема получения заготовки гофрированного волновода:

1 — оправка; 2 — волока; 3 — неподвижная опора станка; 4 — заготовка волноводной трубы; 5 — тяга станка

Тонкостенные латунные трубы изготавливаются из латуни марок Л96 и Л62 по ГОСТ 5685—51. По наружному диаметру и толщине стенки трубы изготавливаются обычной и повышенной точности. В качестве заготовки целесообразно выбирать трубы повышенной точности. Заготовки из других марок латуни можно получить глубокой вытяжкой из стандартных труб с толщиной стенки $0,8—1$ мм. Они калибруются в размер протягиванием через фильер или обкаткой. Затем заготовки отжигаются при $t=540—560^{\circ}\text{C}$ в течение 30 мин с последующим охлаждением на воздухе и осветляются в смеси из азотной, соляной и серной кислот. При калибровке протягиванием через фильер один из торцов исходной заготовки завальцовывается. Перед вытяжкой для снятия напряжений производится отжиг в нейтральной или восстановительной среде. Вытяжка ведется на протяжном станке и оправке за несколько проходов

(рис. 1.30). После каждого прохода заготовка отжигается и обильно смазывается маслом ВМ1. Этим методом можно получить заготовки с толщиной стенки 0,12—0,14 мм с отклонением по толщине не более 0,02 мм. Переход от круглого поперечного сечения заготовки к прямоугольному осуществляется волочением. Внутренний диаметр круглой трубы — заготовки определяется из выражения

$$D_{\text{вн}} \approx P/\pi(k/100 + 1),$$

где P — требуемый периметр прямоугольной волноводной трубы;

$$k = 480/P^{1,075}, \%$$

Для уменьшения вогнутости граней и незаполнения углов волокна применяется одновременное волочение через две волокна. В первой производится обжатие трубы, во второй — профилирование. Размеры волок находят по стандартной методике.

После прохождения через первую волоку труба имеет овальное поперечное сечение, после прохождения через вторую — прямоугольное. Для того чтобы избежать вогнутости граней, вторая волока изготавливается с незначительной выпуклостью, подбираемой экспериментально.

Величина деформации в первой волоке не должна превышать значений, полученных при волочении цилиндрических труб, а внешний периметр сечения трубы должен равняться периметру исходной заготовки.

Для тех же целей используется калибровка обкаткой. Однако условия деформации стенок при этом значительно облегчаются по сравнению с вытяжкой на протяжном станке. Заготовка — отрезок толстостенной трубы с завальцованным концом надевается на оправку, которая изготавливается из стали ХВГ и закаливается до твердости HRC 58—60, что повышает ее износостойчивость. Оправка с надетой заготовкой устанавливается на токарный станок донышком к центру. В патроне зажимается ее свободный конец. Между патроном и концом имеется зазор, определяемый последующим удлинением заготовки в результате утонения стенок. Заготовка обжимается тремя роликами, расположенными под углом 120°; усилие прижима их одинаково и постоянно. При вращении заготовки ролики перемещаются вдоль нее. Обработка ведется в несколько переходов с промежуточными

отжигами. Ролики крепятся в обкатной головке, конструкция которой аналогична конструкции головки для пакатывания зубчатых колес. Головка устанавливается взамен снятого суппорта.

Тонкостенные заготовки в условиях мелкосерийного производства изготавливаются из листа. Резка листа ведется на гильотинных ножницах. Затем кромки листа обрабатываются с таким расчетом, чтобы при их соединении внахлестку толщина стенки в месте стыка осталась равной толщине листа. Обработка ведется методом химического травления. Для этого края листа изолируют лаком, оставляя открытой с одной стороны кромку шириной $l=4-6$ мм у его края. Затем край заготовки погружается в ванну с азотной кислотой (удельный вес 1,3) на глубину $l \pm 1$ мм на 20—25 мин. В результате на краю листа образуется ступенька. После снятия лака, промывки и сушки лист отжигается в нейтральной или восстановительной среде и края его свариваются двумя параллельными швами.

Профилирование заготовки ведется на оправках с таким расчетом, чтобы шов оказался в середине шириной стенки. Высота оправки соответствует номинальному значению высоты полости прямоугольной заготовки. Ширина переменна — от 0,5 требуемой ширины до ее номинального значения. Изменение ширины осуществляется введением клиньев.

Длина заготовки гофрированной части для гофров, форма которых дана на рис. 1.29, б, рассчитывается по формуле

$$l = \left[0,035p \left(90 - \arccos \frac{h-p}{k} + \arcsin \frac{p}{k} \right) + \right. \\ \left. + 2 \sqrt{k^2 - p^2} \right] n, \text{ [мм]},$$

где h — высота гофров, мм; n — количество гофров;

$$0,035 = \pi/90 \text{ град}^{-1};$$

$$p = r_1 + r_2;$$

$$k = \sqrt{(l/2)^2 [h - (r_1 + r_2)^2]}.$$

Здесь r_1 и r_2 — внутренние радиусы закруглений гофров, мм; l — шаг гофров, мм.

Для гофрирования волноводных труб используются два основных метода: 1) *формовка стенок заготовки жестким пуансоном*; 2) *формовка эластичным пуансоном по жесткой матрице*. Первый метод включает в се-

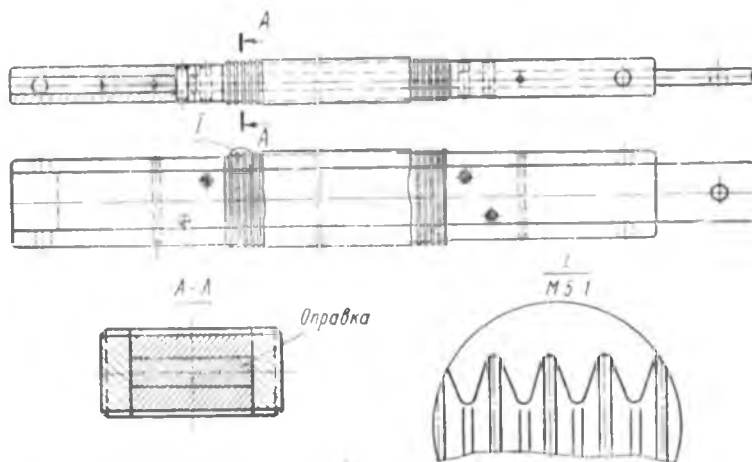


Рис. 1.31. Зубчатая оправка для гофрирования волноводных труб

бя следующие способы: а) профилирование заготовки на зубчатой оправке; б) профилирование заготовки разжимным пуансоном; в) зафиксированное обжатие гофра.

Для профилирования заготовки на зубчатой оправке (рис. 1.31) труба надевается на рейку и ее конец заправляется во впадины рейки. Рейка с надетой на нее трубой прокатывается через фильерное устройство, состоящее из четырех шестерен (рис. 1.32), зубья которых входят в зацепление с рейкой и таким образом обкатывают поверхность заготовки с четырех сторон, создавая гофры по профилю рейки. После того как рейка протягивается фильером в одном направлении и на поверх-

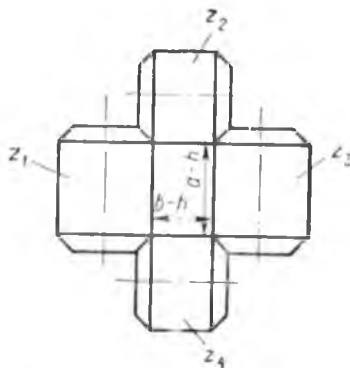


Рис. 1.32. Фальер из зубчатых колес для гофрирования

ности создаются гофры (рис. 1.33), вращая в обратную сторону шестерни фильера, извлекаем гофрированную секцию вместе с оправкой. Вращение ($n=10$ об/мин — прямой ход и $n=20$ об/мин — обратный ход) можно осуществить вручную или от двигателя через редуктор. При вращении от двигателя надо предусмотреть ограничительные по длине рейки — выключатели, а также реверс движения. После того как выбиваются шпильки, соединяющие части рейки, рейка разбирается, т. е. удаляется центральная часть — вкладыш, затем остальные части.

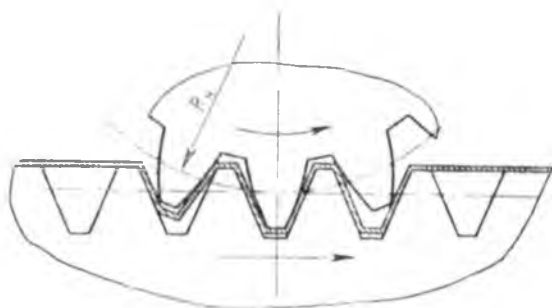


Рис. 1.33. Схема формирования гофра

При этом способе трудно выполнить требование строгой периодичности изменения размеров поперечного сечения за счет набегания погрешности по шагу зубьев рейки.

Точность изготовления гофрированной волноводной трубы определяется точностью изготовления оправки и фильера. За счет зазора между пуансоном и матрицей неизбежна погрешность формы гофр. Вытяжка металла стенки заготовки получается неравномерной.

Этим способом можно получить гофрированные волноводные трубы до 6—7-го классов точности.

В табл. 1.11 приведено штучное время на гофрирование волноводных труб на зубчатой оправке.

Гофрирование заготовки можно осуществить *разжимным пуансоном*, находящимся внутри волноводной трубы.

Кинематическая схема станка для гофрирования труб размерами от 38×24 до 120×57 мм этим способом показана на рис. 1.34. Гофрирование производится следующую

Таблица 1.11

Периметр трубы, мм, до	Длина гофрирования, мм, до					
	50	100	200	300	400	500
	Время на одну трубу, мин					
25	4,9	5,1	5,4	—	—	—
50	5,1	5,3	5,6	6,0	—	—
100	5,5	5,7	6,0	6,4	6,9	—
150	5,9	6,1	6,4	6,8	7,3	7,9

щим образом. Заготовка 11 насаживается на прямоугольную оправку 12, жестко закрепленную через стойку 13 на станине станка. Внутри этой оправки перемещается клин 7, а в поперечном пазу размещена рамка 3, разрезанная на четыре части. При движении клина 7 внутри рамки она раздвигается во все стороны равно-

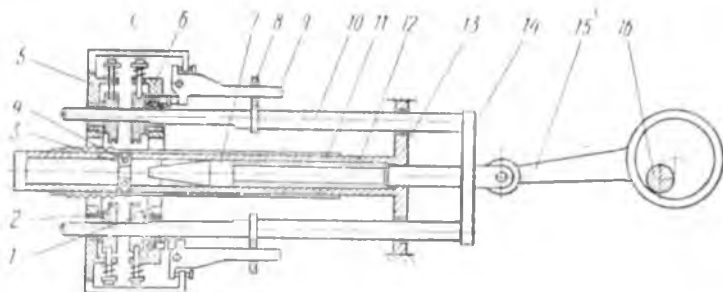


Рис. 1.34. Кинематическая схема станка для гофрирования волноводных труб с помощью разжимного пуансона

мерно, деформируя стенки заготовки. При обратном движении клина рамка стягивается пружиной 4. Движение клина обеспечивается шатунно-кривошипным механизмом, который приводится во вращение электродвигателем и совпадает с движением направляющих 10, связанных между собой траверсой 14.

Движение направляющей вызывает движение прижимных кулачков 1 и 2 до соприкосновения с трубой и поворот рычагов, которые вызывают сближение опор прижимных кулачков 5 и 6. Это движение происходит в определенной последовательности: при вращении эксцентрикового вала 16 шатун 15 приводит в движение

траверсу 14, клипшток и направляющие. Когда скосы направляющих 10 входят в отверстия прижимных кулачков 1 и 2, последние приходят в движение в поперечном направлении до соприкосновения с трубой 11. При дальнейшем движении направляющих планки 8 с прямоугольным отверстием надвигаются на скосы рычагов 9, заставляя их поворачиваться и сближать между собой опоры прижимных кулачков 5 и 6. Одновременное сближение этих опор и раздвижение под действием клина разрезной рамки 3 заставляет стенки трубы вытягиваться, таким образом создается выступ — гофр.

Точность изготовления гофрированной волноводной трубы с использованием разжимного пуансона соответствует требованиям 5-го класса. Лучшие, по сравнению с предыдущими, характеристики имеет способ изготовления гофрированных волноводных труб с *зафиксированным обжатием гофра*. Схема его дана на рис. 1.35, а, б и в.

При этом способе условия деформации стенок заготовки значительно легче. Поэтому растрескивание стенок в процессе гофрирования практически отсутствует. Срок службы гибких волноводов, гофрированных трубы которых получены зафиксированным обжатием гофров, на 15—20% выше, чем для других волноводов. Процесс гофрирования ведется в три этапа (рис. 1.35, а, б и в). После каждого этапа проводят отжиг для снятия внутренних напряжений. Заготовку нагревают до 650—680°С и выдерживают в течение 10 мин, затем охлаждают на воздухе, после окончательного гофрирования тра-
вят для удаления окисной пленки.

Точность размеров гофрированных труб, полученных зафиксированным обжатием гофра, лежит в пределах 4-го класса. Недостаток способа — высокая трудоемкость. В табл. 1.12 и 1.13 приведены значения штучного времени для гофрирования разжимным пуансоном и зафиксированным обжатием гофра.

При перечисленных способах гофрирования чистота внутренней поверхности волноводной трубы ухудшается на 1—2 класса по сравнению с исходной. Этот недостаток отсутствует при изготовлении гофрированной волноводной трубы *последовательной вытяжкой с помощью резинового пуансона*. При этом гофр образуется под действием равномерного давления резинового пуансона. Станок для получения гофрированных волноводных труб

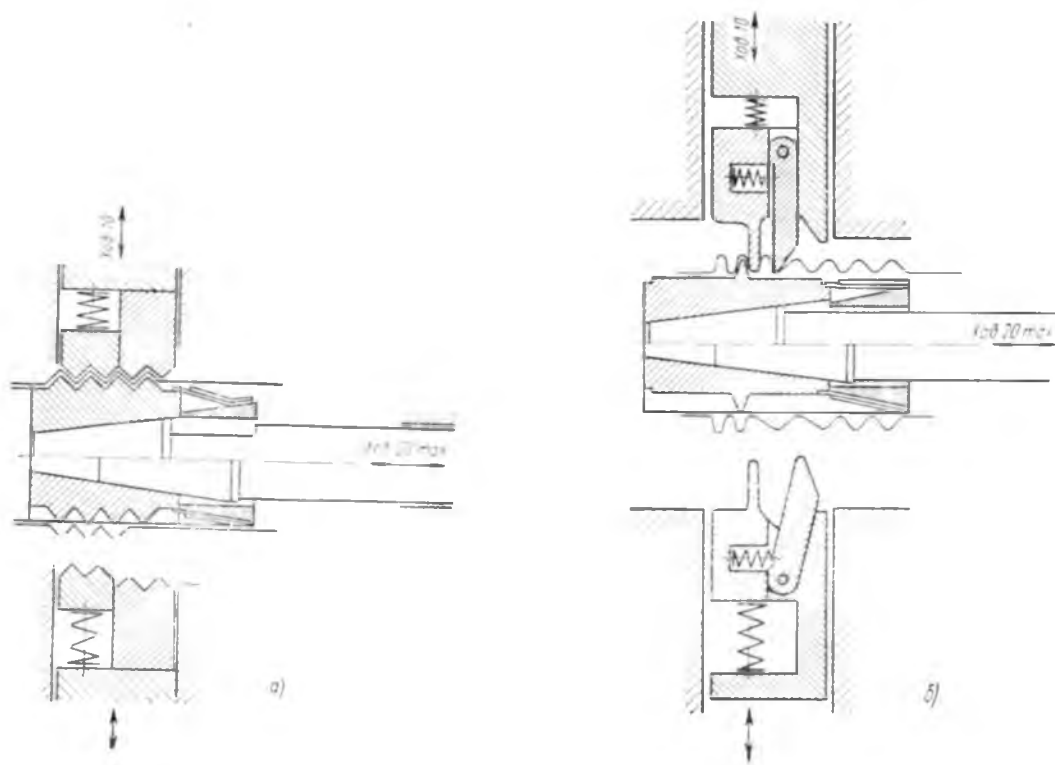


Рис. 1.35. Схема формирования гофров зафиксированным обжатием

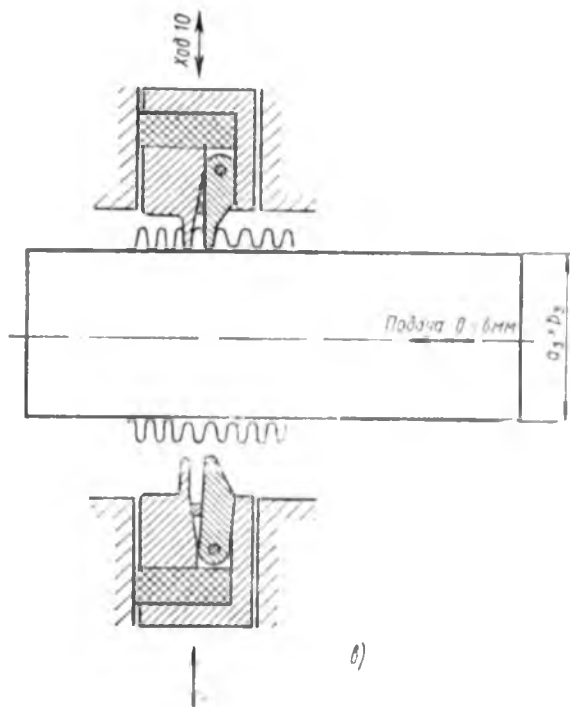


Рис. 1.35 (продолжение)

Таблица 1.12

Шаг Гофриро- вания, мм. до	Длина гофрирования, мм. до					
	30	50	80	120	150	200
	Время на одну трубу, мин					
3	3,0	4,0	5,0	7,0	9,0	11,5
5	2,4	3,0	3,9	5,1	6,0	7,5
10	2,0	2,3	2,7	3,3	3,8	4,5

этим способом (рис. 1.36) работает на основе гидропри-
вода. Он состоит из насоса 1; золотников 4, 5, 6; предо-
хранительных клапанов 7, 8, 9; матриц, скоб, рабочего
цилиндра 2; штока 3, неподвижной части 10, резинового
пуансона 11, разжимной матрицы 12 и манометров на
60 и 10 ат. Предохранительный клапан 7 отрегулирован

Таблица 1.13

Шаг гофрирования, мм, до	Длина гофрирования, мм, до					
	30	50	80	120	150	200
	Время на одну трубу, мин					
3	7,0	9,0	11,0	14,0	19,0	23
5	5,8	7,0	8,8	11,2	13,0	15
10	5,0	5,6	6,4	7,6	8,6	9

на давление, превышающее на 40% номинальное, давление в системе регулируется предохранительным клапаном 8. Предохранительный клапан 9 отрегулирован на давление 8—9 ат и обеспечивает давление, необходимое для подъема рабочего штока.

При работе на стенке необходимо отрегулировать ход штока на величину шага гофра, надеть заготовку на резиновый пуансон и устранить перекосы. Перед началом работы на гладкую поверхность матрицы для уменьшения трения между заготовкой и матрицей наносят тонкий слой стеарина.

При рабочем ходе силового штока 3 резиновый пуансон сжимается и давит на стенки трубы-заготовки, формируя ее в соответствии с поверхностью матрицы. В процессе деформации заготовки давление на ее стенки постоянно в каждой точке поверхности за счет упругих свойств резинового пуансона. Это обеспечивает точное соответствие форм гофра и матрицы и равномерную вытяжку металла заготовки.

После того как гофр отформован сжимающее усилие снимается с резинового пуансона, матрица разъединяется и шток, на котором помещен резиновый пуансон вначале поднимается, а затем вместе с заготовкой волноводной трубы опускается на шаг t (шаг гофра). Последующий процесс гофрообразования повторяется в той же последовательности. Все указанные операции, кроме установки заготовки, производятся автоматически. Геометрические размеры поперечного сечения гофрированных секций, полученных этим способом, изменяются строго периодически. Матрица должна конструироваться с учетом упругих деформаций формируемого материала. Точность ее изготовления будет определять точность изготовления гофрированной волноводной трубы. Поэтому до-

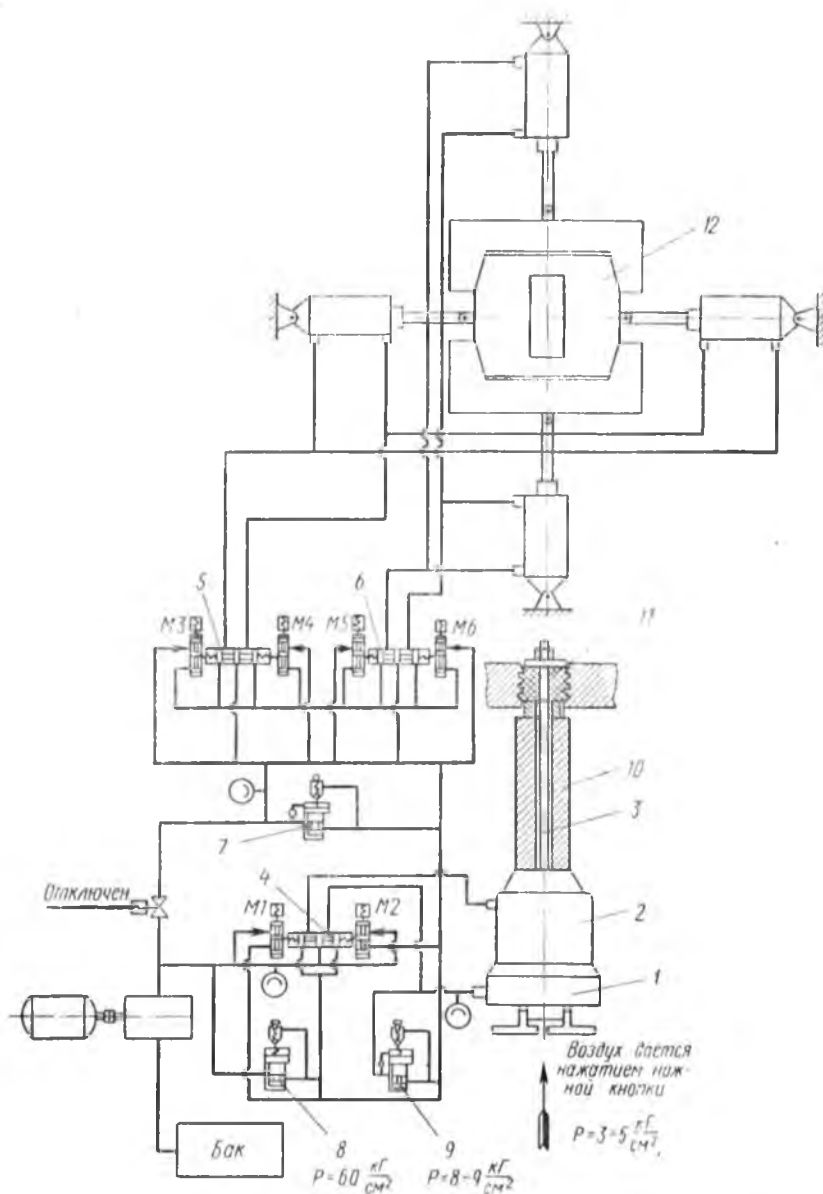


Рис. 1.36. Схема станка для формовки гофр резиновым пуансоном по жесткой матрице

пуски на размеры матрицы должны соответствовать требованиям 2-го класса, а чистота обработки поверхности требованиям 10-го класса. Матрица изготавливается из качественной стали и закаливается до твердости HRC48-52. При точном изготовлении матрицы достигается не только периодичность изменения размеров поперечного сечения волноводной трубы, но и точность в пределах требований 4—5-го классов.

Чистота токонесущей поверхности не ухудшается в процессе гофрирования и определяется чистотой внутренней поверхности заготовки, которая может быть очень высокой. Геометрия гофр остается практически постоянной на всей длине гофрированной волноводной трубы.

В табл. 1.14 приведены значения неполного штучного времени для гофрирования способом последовательной вытяжки.

Таблица 1.14

Шаг гофриро- вания, мм, до	Длина гофрирования, мм, до					
	30	50	80	120	150	200
	Время на одну трубу, мин					
3	5,0	6,0	7,0	9,0	11,0	13,0
5	4,5	5,0	6,0	7,2	8,0	9,5
10	4,0	4,3	5,0	5,5	6,0	6,5

Рассмотренные способы гофрирования волноводных труб отличаются точностными и экономическими характеристиками. Выбор способа гофрирования зависит от точности, которую требуется обеспечить при изготовлении гофрированной волноводной трубы, и ее заданных механических характеристик. При неоднозначности выбора по этим показателям определяющей становится производительность.

В табл. 1.15 приведены усредненные сравнительные характеристики для волноводной трубы с размерами поперечного сечения $28,5 \times 12,6$, длиной 300 мм, полученной рассмотренными способами.

Волноводная труба после гофрирования промывается бензином для удаления с поверхности загрязнений и проверяется на геотермичность. Внутрь трубы подает-

Таблица 1.15

Способ гофрирования	Классы точности	Допустимый угол изгиба, град. в плоскостях		Допустимое количество изгибов с максимальным радиусом в плоскостях		КСНН
		Е	Н	Е	Н	
На зубчатой оправке	6—7	140	120	1000	800	1,3—1,4
Разжимным пуансоном	5	170	130	1200	1100	1,2—1,3
Зафиксированным обжатием гофра . .	4	180	140	1400	1200	1,1
Последовательной вытяжкой	4—5	180	130	1200	1100	1,1—1,2

ся избыточное давление не более 0,3 ат. Затем она погружается в ванну с дистиллированной водой. При наличии течи будут выделяться пузырьки воздуха.

Сушку гофрированной волноводной трубы ведут при температуре 110—120°С, чтобы избежать окисления поверхности. После гофрирования необходимо произвести низкотемпературный отжиг для снятия внутренних напряжений и обезводороживания (при необходимости). Отжиг гофрированной заготовки ведется в защитной среде при температуре 220—250°С и выдержке 2 ч с последующим охлаждением до температуры 60—80°С в защитной среде, а затем на воздухе до 18—20°С. После этого производится напайка фланцев и осаживание гофрированной трубы. Специфика конструктивного оформления фланцев гибкого волновода и способы их пайки рассмотрены в § 1.5.

Операция осаживания отожженной гофрированной трубы важна для достижения требуемых механических характеристик. При осаживании гофрированная волноводная труба сжимается на ручном прессе и надевается на оправку для исключения перекосов. Волноводная труба должна быть откалибрована уменьшением длины. Калибрование путем растяжения не допускается.

Под действием осадки материал стенок прямоугольной гофрированной волноводной трубы приобретает нагартовку, что увеличивает упругие свойства волновода. При этом большое влияние на окончательную форму

гофра и периодичность изменения размера поперечного сечения трубы оказывает непостоянство толщины стенок заготовки и механических свойств гофрированной волноводной трубы.

Следующим этапом процесса изготовления является покрытие внешней поверхности гибкого волновода резиновой пленкой. Поверхность фланцев, подлежащая покрытию резиной, обрабатывается с помощью пескоструйного аппарата. Остальная поверхность волноводной трубы защищается от песка специальными колпачками и прокладками. После обработки волновод промывают в бензине, высушивают и обработанные поверхности фланцев покрывают 20%-ным клеем «Лейконат». Сушка ведется при комнатной температуре. Так как этот клей разлагается под действием влаги воздуха, покрытие секции производят не позднее чем через 4 ч после нанесения слоя клея.

Для покрытия используется резиновая смесь НО-68-1, предварительно отвальцованная на холодных вальцах в лист толщиной 5—7 мм. Из этих листов для каждой секции вырезают две полосы, равные длине обрезаемого участка. Резину надо использовать не позже, чем через 7 ч после вальцовки.

Обрезнивание гофрированных заготовок ведется в пресс-формах, куда вначале помещают одну полосу резины, на нее накладываются гофрированный волновод с оправкой внутри, затем помещается вторая полоса. Пресс-форма подпрессовывается на ручном прессе, после этого помещается в вулканизационный пресс и дважды подпрессовывается при 140°C в течение 35 мин и давлении 40—50 кг/см².

Если гибкий волновод должен сохранять работоспособность в широком интервале температур, то для покрытия его внешней поверхности используется компаунд на основе кремнийорганических низкомолекулярных каучуков «Виксинт К-18» (МРТУ 6 № ЕУ 107—61). Диапазон рабочих температур этого каучука 60—250°С, предел прочности на разрыв 110 н/см², температура полимеризации 20°С, продолжительность полимеризации 4—6 ч, удельный вес 1,01 г/см³.

К недостаткам этого компаунда относится малая жизнеспособность (до 0,5 ч), низкая адгезия ко всем материалам, а также агрессивное действие «Виксинта К-18» на серебро, медь и ее сплавы. Для улучшения ад-

гезии поверхность гофрированной заготовки покрывают адгезином П-90 или кремнийорганическим лаком К-55. Предохранить от коррозии медь, серебро, латунь при контакте с компаундом «Виксинт К-18» можно защитными лаками К-55, УР-231.

Завершающей операцией является серебрение, которому подвергаются контактные поверхности фланцев и внутренняя поверхность волноводной трубы. Серебрение ведется гальванически с внутренними анодами при прокачке электролита (см. § 2.7). Серебрение исключает влияние технологического процесса на качество токонесущего покрытия.

§ 1.5. ИЗГОТОВЛЕНИЕ И УСТАНОВКА ФЛАНЦЕВ

Волноводные тракты изготавливаются из отдельных сборочных единиц, которые стыкуются с помощью волноводных фланцев (см. рис. 1.2), что облегчает изготовление, монтаж и ремонт волноводного тракта. Фланцевое соединение должно обеспечивать электрический контакт и не допускать изменения характеристического сопротивления в местах соединений. При несоблюдении этих требований возможны потери в контактах, частичное отражение энергии от области разъема и излучение ее в окружающее пространство. Так, при мощности 500 кВт, передаваемой на $\lambda_n = 3$ см, амплитуда плотности продольного поверхностного тока в середине широкой стенки составляет более 40 а/см². Полный продольный ток, протекающий в одном направлении через стык, равен 60 а. Это приводит к тому, что при высоком переходном сопротивлении во фланцах возможны расплавления материала волновода.

Фланцы можно разделить на два класса — контактные и дроссельные. Контактные фланцы за счет соприкосновения их торцевых поверхностей обеспечивают непосредственный электрический контакт между стыкуемыми волноводными сборочными единицами. Условие стабильности электрических характеристик обуславливает жесткие требования к точности выполнения контактных фланцев — перпендикулярности контактной поверхности фланца к оси волновода, плоскостности кон-

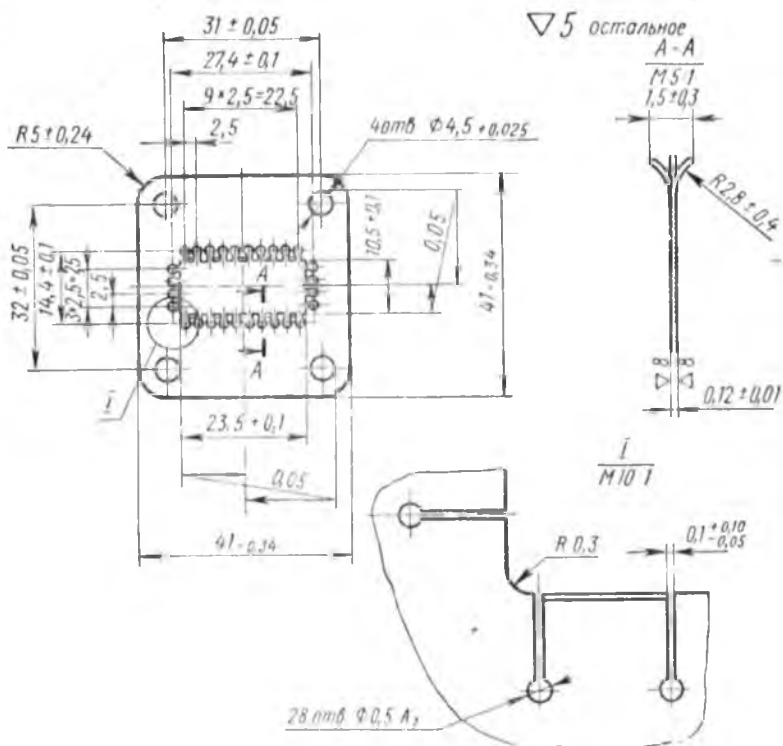


Рис. 1.37. Упругая контактная прокладка для прямоугольного волновода с размерами канала 23×10 мм

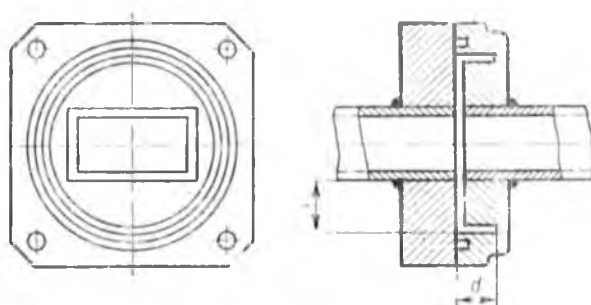


Рис. 1.38. Конструкция дроссельного соединения
 $(l = d = \frac{\lambda_n}{4})$

тактной поверхности, точности расположения базирующих элементов. Все это вызывает резкий рост себестоимости контактных фланцевых соединений. Загрязнения и окислы могут стать причиной сильного ухудшения качества контакта. Поэтому контактные фланцы редко используются в полевых условиях и измерительной аппаратуре.

На практике широко применяются плоские фланцы с упругими контактными прокладками, которые имеют лепестки, разведенные в противоположные стороны так, что при соединении фланцев между стенками волновода образуется электрический контакт (рис. 1.37). Прокладки обеспечивают хороший электрический контакт независимо от рабочей частоты волновода и имеют КСВН менее 1,002. Плоские волноводные фланцы (рис. 1.38) могут изготавливаться из листового материала. Лист режется на заготовки требуемого размера, которые рихтуются в штампе до требуемой плоскостности. Окно в заготовке фрезерируется (в мелкосерийном производстве) или вырубается в штампе (в серийном производстве). После вырубки окна в штампе необходима дополнительная рихтовка заготовки. В зависимости от требуемой точности на размеры окна фланца его калибровку можно осуществить протягиванием (фланцы собираются в пакет и протягиваются без закрепления) или обработкой в штампе.

Хорошие результаты дает использование для изготовления плоских фланцев не листового, а профильного материала — бруса с прямоугольным продольным отверстием. Промышленностью выпускаются такие заготовки, например из сплава АД-33, СТУ 14-16-61 с размерами окна 25×12 . Тогда технологический процесс состоит в отрезке заготовки требуемой толщины и калибровке окна протягиванием. Трудоемкость изготовления плоских фланцев из профильного материала на 60% ниже, чем из листового.

Контактные прокладки изготавливаются из листовой бронзы БрБ2М ГОСТ 1789—60, которую предварительно термообработывают. Затем лист прокатывают на вальцах, уменьшая толщину на 10—15% против исходной. Эта операция производится для повышения упругих свойств материала. У прокладок для волноводов сечением от $11 \times 5,5$ до 58×25 мм контуры и все отверстия вырубаются в штампе за одну установку.

При конструировании оснастки для изготовления прокладок необходимо учитывать изменение размеров прокладок после окончательной термообработки (облагораживания), которое в направлении проката составляет 0,1—0,15%, а перпендикулярно ему — 0,15—0,25%.

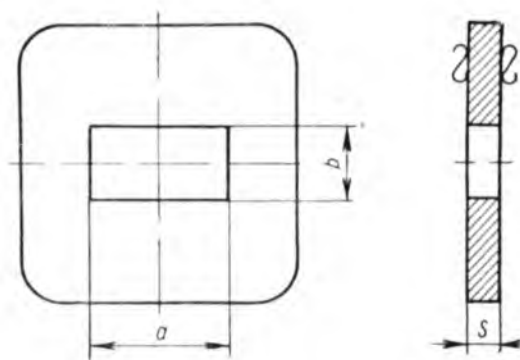
Вырубка контактных лепестков и их гибка выполняются также в штампах. Вначале пробиваются прорезы по двум широким сторонам окна, затем по двум узким. Штамповка прорезей шириной 0,1—0,3 мм на контактных прокладках выполняется следующим образом: прорезы подрезаются по двум широким сторонам окна, затем заготовка поворачивается в плоскости на 180° и тем же штампом подрезают прорезы заданной ширины. Штамп конструируется так, что рез смещен относительно оси прореза на 0,05—0,15 мм. Для окончательной термообработки прокладки собирают в приспособление, где каждая деталь укладывается отдельно между пластинами и пакет сжимается. В приспособление помещают и образцы — свидетели, по которым контролируется качество термообработки.

После термообработки для снятия заусенцев и притупления острых граней прокладки электрополируют. Полированные прокладки калибруются, а затем обезвоживаются при 180—190° С в течение 2,5—3 ч.

Все прокладки проходят механическую тренировку, заключающуюся в 23—30-кратном сжатии, до полного выпрямления лепестков. Цель тренировки — повышение упругости лепестков за счет появления в них внутренних напряжений.

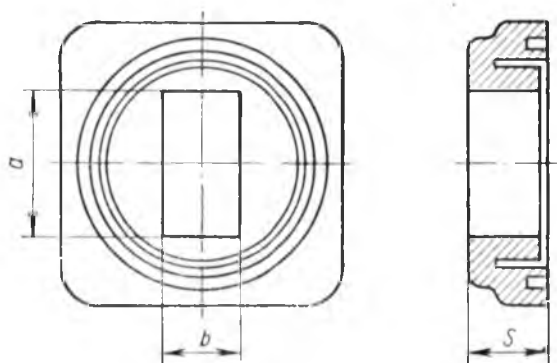
В мелкосерийном и опытном производстве для получения контактных прокладок можно пользоваться методом травления. При этом достигается точность в пределах $\pm 0,1$ мм при толщине материала до 0,15 мм. Поверхность бронзовой заготовки с двух сторон покрывают защитной маской по способу, используемому при производстве печатных схем. Незащищенные места вытравливаются в растворе хлорного железа (удельный вес 1,36) при 45—50° С. После оформления контура заготовка контактной прокладки обрабатывается аналогично изложенному ранее.

Дроссельные фланцы используют в системах, часто подвергающихся разборке или при малых относительных перемещениях элементов волноводного тракта. Дроссельный фланец работает на основе чет-



габариты	a	17,4 - 48,4
	b	8,4 - 24,4
	S	- 15

Рис. 1.39. Плоский волноводный фланец



габариты	a	17,4 - 48,4
	b	8,4 - 24,4
	S	- 15

Рис. 1.40. Дроссельный волноводный фланец

вертьволновой линии, нагруженной на бесконечное сопротивление, и способен создать бесконтактное короткое замыкание между стенками волноводов (рис. 1.39). При изготовлении фланцев в зависимости от конструктивного оформления используются различные технологические приемы.

Дроссельные волноводные фланцы (рис. 1.40) в мелкосерийном производстве изготавливают на универсальных металлообрабатывающих станках, в серийном — применяют штамповку жидкого металла или горячую штамповку. В табл. 1.16 приведены данные по трудоемкости процессов горячей штамповки фланцев (и штамповки жидкого металла). По сравнению с получением квадратных дроссельных фланцев на универсальном металлообрабатывающем оборудовании трудоемкость их изготовления с использованием горячей штамповки или штамповки жидкого металла снижается в среднем на 40%. Горячей штамповкой и штамповкой жидкого металла изготавливают фланцы из латуни марок ЛС59-1, Л62 и алюминия марок АК6, Д1.

Технологический процесс изготовления заготовок волноводных фланцев *штамповкой жидкого металла* обеспечивает получение ажурной конструкции фланцев с ребрами жесткости, расположенными перпендикулярно к основной плоскости. Заготовки при этом обладают повышенными механическими свойствами, так как структура металла получается однородной, мелкозернистой, без газовых пор и раковин.

Этот процесс заключается в следующем. Штамп устанавливается на плиту прессы и нагревается до температуры 150—200°С электронагревателями. Полость матрицы и рабочая часть пуансона покрывается смазкой следующего состава:

а) для алюминиевых сплавов — пчелиный воск или касторовое масло с добавкой 5—10% серебристого графита,

б) для медных сплавов — машинное или веретенное масло с добавкой 5—10% серебристого графита.

В полость матрицы заливается дозированная порция металла. Температура алюминиевых сплавов при заливке должна быть 660—680°С, медных — 960—1000°С. Металл выдерживается в матрице до появления на поверхности жидкой ванны тонкой корочки. Затем к пуансону прикладывается плавно растущее до номинального

Таблица 1.16

Методы штамповки	Оборудование	Оснащение	Трудоемкость операции, н.ч. для фланцев размерами			
			35×35×7,5 мм		80×60×21 мм	
			T _{вспом.}	T _{основ.}	T _{вспом.}	T _{основ.}
Штамповка жидкого металла						
А. Операция плавильная	Плавильная печь типа ИО-102 (от высокочастотной установки МГП-103)	Графитовые тигли	0,25	Для медных сплавов 0,002	0,25	0,004
	Раздаточная печь Г-65	Чугунные тигли	0,25	Для алюминиевых сплавов 0,001	0,25	0,002
	Плавильная печь типа САТ-0,25					
Б. Операция штамповочная	Раздаточная печь типа САТ-0,15	Универсальный блок с водяным охлаждением	0,25	Для медных сплавов 0,001	0,25	0,012
	Фрикционный пресс модели ФА-122, усилие 63 Т			Для алюминиевых сплавов		
Горячая штамповка						
А. Операция нагревательная	Камерная электропечь типа Н-30	Универсальный блок с водяным охлаждением	0,5	Для медных сплавов 0,008	0,5	0,015
	Фрикционный пресс модели ФА-124, усилие 160 Т		0,5	Для алюминиевых сплавов 0,006	0,5	0,011
			Матрица Пуансон			

значения усилие. Штамповка заканчивается 2—3 ударами пуансона.

Штамповка заготовок фланцев производится на гидравлических и фрикционных прессах. Удельное давление при штамповке должно быть не менее $0,8\text{--}1\text{ Т/см}^2$ для деталей весом от 0,1 до 1 кг и не менее $1,3\text{--}1,5\text{ Т/см}^2$ для деталей весом от 1,5 до 5,5 кг. При работе на фрикционных прессах после заливки жидкого металла в полость матрицы необходимо дать выдержку из расчета 2 сек на 10 мм высоты заготовки для предотвращения выброса жидкого металла.

Температура матрицы при работе не должна превышать 400°С , а пуансона — 350°С .

При конструировании оснастки для изготовления фланцев методом штамповки жидкого металла необходимо предусмотреть, чтобы разъем между матрицей и пуансоном находился в плоскости, проходящей через периметр наибольшей поверхности заготовки. Для того чтобы распространение фронта кристаллизации шло в направлении места приложения давления, наиболее массивную часть заготовки располагают в непосредственной близости к пуансону штампа.

Штамповочные уклоны для внутреннего контура заготовки можно найти из табл. 1.17 (см. рис. 1.41).

Таблица 1.17

Глубина l , мм	Уклон α , град
До 25	3—5
Свыше 25 до 30	5—7
Свыше 30	7—10

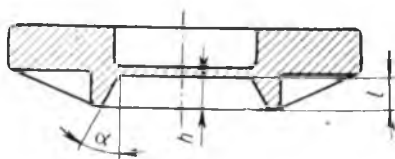


Рис. 1.41. Заготовка дроссельного фланца к табл. 1.17

Таблица 1.18

Высота H , мм	Наружные уклоны, град	
	α	β
До 10	1	2—3
Свыше 10 до 20	1,5	3—5
Свыше 25 до 40	2	5

Эти уклоны для наружных поверхностей заготовок, штампуемых на фрикционных прессах, приведены в табл. 1.18 (см. также рис. 1.42). При штамповке заготовок на гидравлических прессах с неразъемной матрицей штамповочные уклоны по наружному контуру не делаются.

Все сопряжения поверхностей заготовки выполняют по радиусам, иначе при штамповке в местах сопряжений появляются трещины и штампы подвергаются быстрому износу. На необрабатываемых поверхностях сопряжения по наружному контуру заготовки имеют радиусы скругления не менее 1,5 мм, по внутреннему — не менее 2,5 мм,

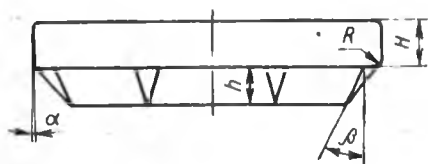


Рис. 1.42. Заготовка дроссельного фланца к табл. 1.18

на обрабатываемых по наружному контуру — не менее 2 мм, по внутреннему — не менее 3,5 мм. Односторонние припуски на механическую обработку заготовки фланца, полученной штамповкой жидкого металла, приведены в табл. 1.19.

Таблица 1.19

Размеры заготовки, мм	Припуски на механическую обработку в зависимости от чистоты обработки, мм		
	▽4	▽6	▽8
До 40	0,8	1,25	1,5
40÷60	1,0	1,5	1,75
60÷100	1,25	1,75	2,0
100÷160	1,5	2,0	2,25
160÷250	1,75	2,25	2,5
250÷360	2,0	2,5	3,0

Допуски на размеры заготовки волноводного фланца, полученного штамповкой жидкого металла, можно определить из табл. 1.20.

Пример конструкции заготовки волноводного фланца, полученного штамповкой жидкого металла, приведен на рис. 1.43. В табл. 1.21 указаны основные размеры заго-

Таблица 120

Размер заготовки, мм	Допуски, мм		Дополнительный плю- совый допуск на раз- меры, зависящие от неточности дози- ровки металла
	(+)	(-)	
До 16	0,2	0,1	2,0
16 ÷ 25	0,25	0,15	2,0
25 ÷ 40	0,3	0,2	2,0
40 ÷ 60	0,4	0,2	2,0
60 ÷ 100	0,5	0,3	2,5
100 ÷ 150	0,7	0,4	2,5
150 ÷ 210	0,9	0,5	3,0
210 ÷ 280	1,0	0,6	3,0
280 ÷ 350	1,2	0,7	3,5

товки, припуски на механическую обработку и допуски на размеры заготовки.

При изготовлении прямоугольных дроссельных фланцев горячей штамповкой нагретые заготовки (латунные до температуры 820—850° С, алюминиевые до 450° С)

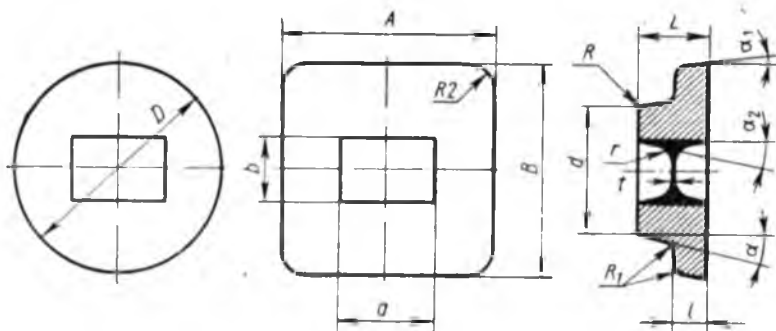


Рис. 1.43. Заготовка дроссельного фланца к табл. 1.21

помещаются в штамп, нагретый до температуры 150—200° С. Предварительно матрица и рабочая часть пуансона покрываются смазкой, аналогичной по составу смазке, применяемой при жидкой штамповке. Штамповка ведется на эксцентриковых прессах. Припуски на изготовление корпуса дроссельного фланца при горячей штамповке можно выбрать по табл. 1.21.

Таблица 1.21

Обозначения	Чистовые размеры, мм		Припуск на механическую обработку, мм		Допуск на размеры заготовки	
	min	max	min	max	min	max
<i>A</i>	35—0,3	80—0,46	—	—	—0,3	—0,46
<i>B</i>	35—0,3	80—0,46	—	—	—0,3	—0,46
<i>D</i>	∅ 45	—	—	—	—0,34	—
<i>a</i>	23,9 ^{+0,14}	47,9 ^{+0,17}	0,5	0,6	±0,3	±0,5
<i>b</i>	9,6 ^{+0,03}	18,4 ^{+0,45}	0,4	0,5	±0,2	±0,3
<i>d</i>	∅ 26 ^{—0,52}	∅ 68 ^{—0,74}	1,5	2	±0,3	±0,5
<i>L</i>	7,5 ^{—0,4}	21 ^{—0,14}	2,0	3,0	±0,5	±0,5
<i>l</i>	4,5 ^{—0,3}	7 ^{—0,36}	1,5	2,0	±0,5	±0,5
<i>R</i>	1	2	1,5	2,5	±0,3	±0,3
<i>R</i> ₁	0,5	1	1	1,5	±0,3	±0,3
<i>R</i> ₂	3	8	—	—	±0,3	±0,4
<i>r</i>	—	—	1,0	2,0	±0,3	±0,3
<i>t</i>	—	—	2	2,5	±0,3	±0,3
<i>α</i>	—	—	—	30	±5	±5
<i>α</i> ₁	—	—	—	30	±5	±5
<i>α</i> ₂	—	—	—	2°	±10	±10

Заготовка фланца, полученная горячей или жидкой штамповкой, отжигается для снятия внутренних напряжений, с нее удаляется окалина и обрабатывается внешний контур.

Обрубку по контуру, черновую прошивку окна (удаление перегородки) и последующую рихтовку ведут в штампах. Калибровку окна осуществляют притягиванием или штамповкой в зависимости от требуемой точности размеров. Подрезка торцевой поверхности и фрезерование или расточка дроссельной канавки и канавки под уплотнение осуществляется после установки фланца на волноводную трубу.

При изготовлении дроссельных фланцев применяется литье по выплавляемым моделям и под давлением. Это позволяет получить заготовки фланцев, нуждающиеся в незначительной механической обработке.

Процесс сборки фланца с волноводом заключается в следующем:

- 1) подготовка волноводной трубы;
- 2) установка фланца и соединение его с волноводной трубой;

3) обработка контактной поверхности, получение дроссельных канавок, канавок под уплотнение и крепежных отверстий.

Фланец устанавливается на необработанную волноводную трубу или на специально обработанный посадочный пояс, обработка которого ведется: протягиванием парными протяжками на вертикальном протяжном станке (рис. 1.44, а); фрезерованием парными дисковыми фрезами (рис. 1.44, б); фрезерованием на вертикально-фрезерном станке в универсальном приспособлении с помощью концевых фрез (рис. 1.44, в).

Показатели трудоемкости получения посадочных поясков под фланец приведены в табл. 1.22.

Для предупреждения деформации в канал волновода при обработке вводится стальная оправка.

После обработки посадочных мест волноводная труба и фланец обезжириваются, травятся для удаления окислов и собираются. При этом для предварительной фиксации и крепления фланцев на волноводной трубе используют кернение или специальные приспособления.

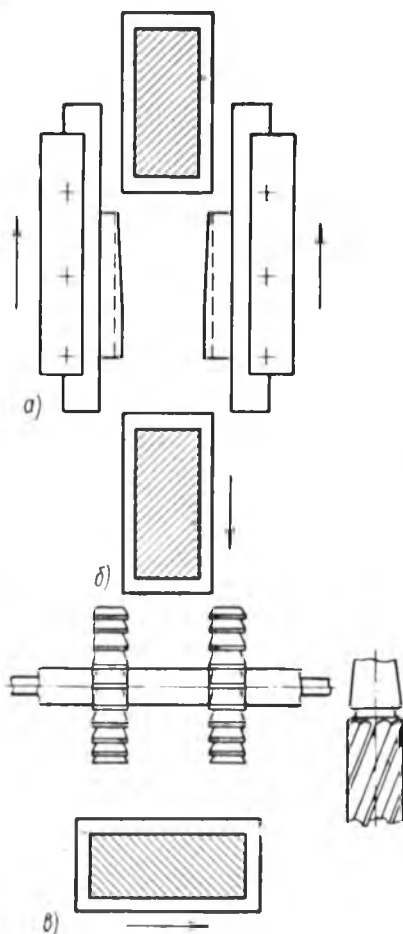


Рис. 1.44. Обработка посадочных поясков:

а — протягиванием парными протяжками;
б — фрезерованием парными дисковыми фрезами; в — фрезерованием концевой фрезой

Таблица 1,22

Способ обработки	Оборудование	Трудоемкость операции для труб сечением, мм			
		17×8		72×34	
		$T_{\text{вспом.}}$	$T_{\text{основ.}}$	$T_{\text{вспом.}}$	$T_{\text{основ.}}$
Протягивание парными протяжками	Вертикально-насто- льно-протяжной ста- нок	0,17	0,02	0,17	0,03
Фрезерование парными фрезами	Специальная фрезер- ная установка	0,34	0,05	0,34	0,1
Фрезерование в универсальном приспособлении	Вертикально-фрезер- ный станок	0,34	0,08	0,34	1,2

Для того чтобы при пайке избежать затекания флюса и припоя в полость волноводной трубы, она должна выступать с наружной стороны фланца не менее чем на 2 мм. Зазор под пайку составляет 0,05—0,15.

Для *соединения* волноводных труб с фланцами используются следующие основные методы: 1) пайка; 2) склеивание; 3) сварка.

Первый метод включает в себя несколько способов пайки: а) газопламенная; б) индукционная; в) в печах с контролируемой средой; г) в соляных ваннах.

Опыт предприятий, использующих *газопламенную пайку*, выявил существенные недостатки этого способа. При пайке в пламени кислородно-ацетиленовой горелки волноводная труба и фланец по периметру нагреваются неравномерно, происходит их коробление, и отдельные участки шва не пропаяваются. Для устранения этих дефектов приходится выполнять припиловку канала волновода или дополнительное его протягивание.

Уменьшение коробления в процессе газопламенной пайки достигается применением специальных оправок-калибров (рис. 1.45, а). Оправка вводится в канал волноводной трубы сразу же после пайки, когда узел еще не успел остыть. Охлаждение его ведется на оправке (рис. 1.45, б), которая затем извлекается. В качестве материала оправки используется высоколегированная нержавеющей сталь Ст. 4Х13, закаленная до твердости HRC40—45. Размер *b* (широкая часть оправки) делается равным номинальному размеру внутреннего сечения

волновода плюс половина поля допуска на него, а размер a по номинальному размеру узкой стенки плюс $\frac{\delta}{2} - 0,01 - 0,02$ мм, где δ — поле допуска.

Для облегчения извлечения оправка имеет конусность от 0,7 : 100 до 1,2 : 100. Чистота рабочей поверхности должна отвечать требованиям 9-го класса, что способ-

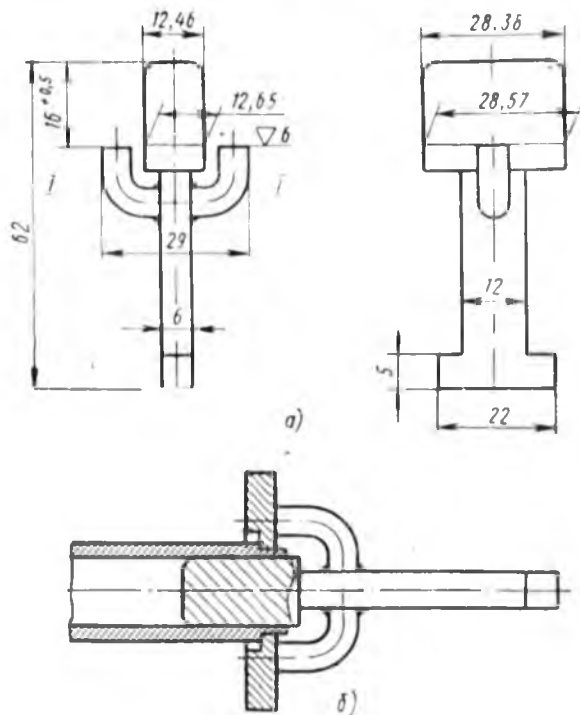


Рис. 1.45. Оправка-калибр:
а — чертеж оправки; б — положение оправки в канале волновода

ствует сохранению чистоты токонесущей поверхности волновода при извлечении. Одну оправку можно использовать для калибровки 10—12 тысяч соединений.

Лучшие результаты даст пайка фланцев с помощью *индукционного нагрева*. При этом способе паяемый узел нагревается за счет наводимых вихревых токов. Преимущества индукционной пайки: быстрый и равномерный нагрев паяемого соединения, уменьшающий возможность

окисления токонесущих поверхностей и коробления волновода; быстрый и избирательный разогрев, исключаящий ступенчатую пайку с использованием припоев с разной температурой плавления, и легкость регулировки.

Приспособление для индукционной пайки фланца

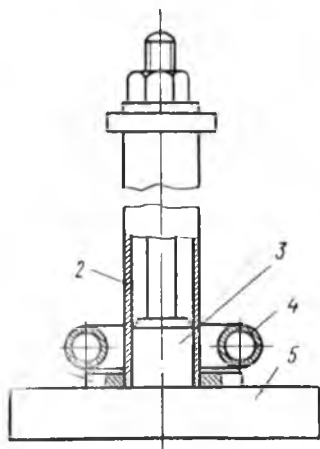


Рис. 1.46. Приспособление для индукционной пайки фланца с волноводом:

1 — фланец; 2 — волноводная труба; 3 — базирующий сухарь; 4 — индуктор; 5 — основание

с волноводом показано на рис. 1.46. Зазор между индуктором и волноводом подбирается экспериментально и лежит обычно в пределах 8—10 мм. Индуктор представляет собой медную трубку, внутри которой циркулирует вода для охлаждения. Припой размещается на спае в виде фольги или проволочных колец.

Для индукционного нагрева используются лампы-высокочастотные генераторы с выходной мощностью 10—60 кВА и частотой 200—600 кГц марок ЛГЗ-10, ЛГЗ-30, ЛГЗ-60.

При индукционной пайке, несмотря на кратковременность нагрева, возможность окисления поверхно-

сти волновода полностью не исключается. Для этого необходима пайка в электрических печах. Однако этот способ из-за большой длительности производственного цикла и высокой стоимости оборудования применяется редко.

Снижение трудоемкости операции пайки фланцев и повышение качества паяных соединений достигается использованием пайки в соляных ваннах. Волноводная труба и фланец закрепляются в приспособлениях. На места спаев накладывается припой в виде рамки или проволоки и приспособление погружается в ванну с расплавленными солями (процесс подробно рассмотрен в § 2.1).

Все перечисленные ранее способы пайки не исключают возможности искажения размеров волновода в ре-

зультате нагрева. Минимальными эти искажения будут при пайке в соляных ваннах или печах с защитной средой. Иногда при изготовлении волноводов миллиметрового диапазона, особенно полученных методом холодного выдавливания и имеющих большие внутренние напряжения, температурные деформации могут быть причиной несоблюдения жестких допусков на размеры канала ($\pm 0,01$ — $0,02$ мм). Тогда для соединения волноводных труб с фланцем используется метод *склеивания*.

В качестве склеивающего состава применяется компаунд на основе эпоксидной смолы ЭД-5 с пластификатором МГФ-9 и отвердителем — полиэтиленполиамином. Для обеспечения электропроводности в склеивающий состав добавляется мелкодисперсное серебро, полученное восстановлением азотинокислого серебра.

Склеивающая паста имеет следующий состав, *вес. ч.*:

эпоксидная смола ЭД-5	1
полиэтиленполиамин	0,12
полиэфир МГФ-9	0,2
серебро	1,25

Склеенные соединения имеют механическую прочность около 50 кг/см^2 . Недостаток пасты — ее ограниченное время годности 30—40 мин, поэтому она приготавливается непосредственно перед склеиванием. Склеиваемые поверхности предварительно зачищаются и обезжириваются. Паста наносится на внешнюю поверхность волноводной трубы, стенки окна фланца и подсушивается на воздухе в течение 5—10 мин. Затем фланец надевается на волноводную трубу и клей высушивается при 100°C в течение 1 ч. Оптимальные механические и электрические характеристики обеспечиваются, если зазор между волноводной трубой и фланцем не превышает 0,05 мм. Специфично изготовление фланцевого соединения для гибких волноводов. Конструктивно оно выполняется так, что углы окна фланца имеют плавное изменение от 0 до R радиус закругления на длине 2,5—3 мм. Такая конфигурация принята для согласования прямоугольного волновода с гофрированной заготовкой.

Фланец выполняется вместе с переходом штамповкой жидкого металла, горячей штамповкой, гальваническим наращиванием или точным литьем. Базировка гибкой секции относительно исходного поперечного сечения в процессе пайки достигается использованием ступенча-

той оправки, размеры одного конца которой равны минимальным размерам полости гофрированной заготовки, а другого — максимальным размерам окна фланца.

Для повышения механической прочности фланцевого соединения и его устойчивости к воздействию окружающей среды используется два способа сварки: а) аргонодуговая и б) литьевая. *Аргонодуговая сварка* применяется при изготовлении волноводной трубы из алюминия и его сплавов. При соединении ее с фланцем снимается фаска с наружной стороны окна фланца под 45° на глубину 1,5—2 мм. При этом волноводная труба должна выступать с наружной стороны окна на 1,5—2 мм, чтобы при оплавлении и механической обработке торца фланца сохранить требуемые размеры канала волновода. Подробно процесс аргонодуговой сварки рассмотрен в § 2.1. После сварки волноводную трубу обрабатывают, так же как после пайки. В процессе аргонодуговой сварки фланца с волноводом размеры канала волновода уменьшаются на 0,02—0,05 мм в области шва.

Интересен способ *литевой сварки* фланца с волноводной трубой. Он используется для медных и алюминиевых литевых сплавов и совмещает процессы изготовления фланца и его соединения с волноводной трубой. Трудоемкость при этом на 15—20% ниже, чем для сборных конструкций. Полностью отпадает необходимость в таких технологических операциях, как пайка фланца, удаление флюса после пайки, калибровка канала волновода, удаление затеков припоя. Волноводная труба устанавливается в литевую металлическую форму, где есть полости для образования фланцев и детали, преграждающие доступ расплавленному металлу в канал волновода. Перед заливкой металлическая литевая форма подогревается до температуры $480\text{--}500^\circ\text{C}$ для литья алюминиевых сплавов и $740\text{--}760^\circ\text{C}$ для — медных сплавов. Заливку алюминия производят при температуре металла $850\text{--}870^\circ\text{C}$, медных сплавов — $1020\text{--}1040^\circ\text{C}$. После затвердевания металла узел извлекают из формы и производят обрезку литников.

Совмещение процессов изготовления фланца и его соединения с волноводной трубой используется и при производстве волноводов с пластмассовыми фланцами. Такой волновод представляет собой металлическую волноводную трубу с пластмассовыми фланцами на концах, у которых контактные поверхности металлизирова-

ны. Формообразование фланца и его соединение с волноводной трубой выполняют в пресс-формах. После прессования торцы фланцев фрезеруются, притираются и металлизуются путем химического меднения с последующим гальваническим осаждением серебра. При изготовлении волноводов с пластмассовыми фланцами необходимо учитывать некоторые технологические особенности. Для того чтобы избежать попадания пресс-материала в канал волновода, волноводная труба должна на 3—5 мм выступать над поверхностью фланца. При прессовании в канал волноводной трубы вводится оправка, препятствующая его деформации. Поэтому при конструировании волновода на его концах надо предусматривать прямолинейные участки длиной не менее 15—20 мм.

На участках внешней поверхности волноводной трубы, которые будут запрессованы в пластмассу, выполняется 2—3 канавки глубиной 0,4—0,5 мм, расположенные перпендикулярно к оси волноводной трубы и обеспечивающие прочное крепление пластмассовых фланцев к ней.

Эти фланцы конструируются толщиной не менее 5 мм и для прочности крепления имеют концентрический наплыв вокруг волноводной трубы толщиной 4—5 мм.

Рассмотренный способ перспективен в условиях мелкосерийного и серийного производства. С уменьшением трудоемкости он обеспечивает повышенную устойчивость фланцевых соединений к воздействию окружающей среды. При соединении фланца с волноводной трубой пайкой или сваркой коррозияруется в первую очередь шов. При совмещении изготовления и соединения фланца с волноводной трубой шов отсутствует и коррозионная устойчивость определяется качеством защитного покрытия.

После соединения трубы с фланцем контактную поверхность подвергают обработке, чтобы обеспечить ее перпендикулярность к оси волновода. Для этого используется фрезерование с последующей притиркой контактной поверхности, которое ведется при базировке по каналу волновода. В зависимости от условий производства и технико-экономической целесообразности рекомендуются следующие способы обработки для притирки поверхности: а) на притирочном станке шевингованием без пасты; б) вручную на плите без пасты; в) вручную

Таблица 1.23

Способы приточки поверхности	Трудоемкость операции для труб сечением, мм, м/ч			
	17×8		72×34	
	$T_{\text{всном.}}$	$T_{\text{основ.}}$	$T_{\text{всном.}}$	$T_{\text{основ.}}$
На станке шевнигованием без пасты	0,2	0,05	0,2	0,4
Вручную на плите без пасты	0,15	0,05	0,15	0,07
Вручную на плите с пастой	0,17	0,08	0,17	0,6

на плите с пастой. Экономические показатели этих способов приведены в табл. 1.23.

Обработанная контактная поверхность должна иметь плоскостность не хуже 0,02 : 100, чистоту, соответствующую требованиям 6—8-го класса. В табл. 1.24 приведены допустимые отклонения от перпендикулярности контактной поверхности фланца к оси волновода на 100 мм длины секции.

Таблица 1.24

Сечение волновода, мм	Допустимое отклонение, мм
48×24÷90×45	0,5
23×10÷40×20	0,3
11×5,5÷19×9,5	0,2
9×4,5 и менее	0,1

Фрезерование или растачивание дроссельных канавок, канавок под уплотнение и сверление крепежных отверстий осуществляется после обработки контактной поверхности при базировке по каналу волновода и плоскости фланца. Вначале получают дроссельную канавку, затем канавку под уплотнение, после чего обрабатывается обнижение дроссельного фланца от канала волновода к дроссельной канавке. Сверление ведется по кондуктору.

§ 1.6. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ И ИЗОГНУТЫХ ВОЛНОВОДНЫХ ТРУБ КРУГЛОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

Круглый волновод представляет собой трубу с проводящей внутренней поверхностью, снабженную на концах присоединительными фланцами. Используются прямолинейные и изогнутые волноводы.

Требования к чистоте токонесущей поверхности и стабильности геометрических размеров канала круглого волновода диктуются допустимым затуханием и требуемой чистотой типа колебаний в волноводе. Степень влияния чистоты токонесущей поверхности на величину потерь в круглом волноводе видна из данных табл. 1.25.

Таблица 1.25

Способы обработки токонесущей поверхности волновода	Отношение измеренного затухания к теоретическому
Полированный электролитически	1 005
Полированный электрохимически и протравленный азотной кислотой	1,03
Полированный фетром	1,05
Посеребренный и полированный фетром	1,13

Примечание. Результаты получены для медного волновода диаметром 18 мм при его работе на частоте 25 Гц и являются усредненными.

По круглым волноводам одновременно распространяются различные типы волн, причем число их тем выше, чем больше диаметр волновода по сравнению с длиной волны. Для волновода диаметром 50 мм, например, число возможных видов колебаний возрастает с 42 на частоте 24 000 Мгц до 163 при удвоении частоты. Эти волны независимы друг от друга лишь в волноводе с идеально круглым поперечным сечением. Если же волновод имеет эллиптичность, то энергия основной волны переходит к возбуждаемым при этом паразитным волнам.

На рис. 1.47 дан график зависимости затухания волны H_{01} в круглом медном волноводе диаметром 50 мм с удельным сопротивлением стенок $\rho = 2 \cdot 10^{-8}$ ом/м от эллиптичности волновода, где S — среднеквадратичная величина отклонения формы поперечного сечения от круга. Из графика видно, что изменение S от 0,02 до 0,05 вызывает увеличение затухания на 200% при $\lambda = 1$ см.

Основными технологическими задачами при изготовлении круглых волноводов являются: обеспечение минимальной эллиптичности канала и требуемой чистоты токонесущих поверхностей. В табл. 1.26 приведены значения диаметров волноводов и допуски на них.

В качестве заготовок круглых волноводов используются стандартные тянутые трубы повышенной точности (ГОСТ 5685—51). Эллиптичность этих труб превышает допустимые значения эллиптичности для круглых волноводов. Поэтому на предприятиях, изготавливающих

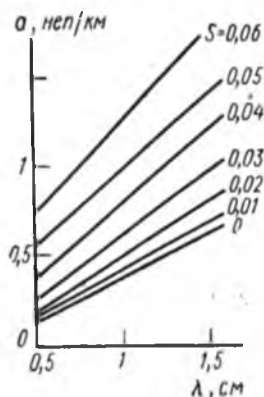


Рис. 1.47. Зависимость затухания волны H_{01} в круглом медном волноводе диаметром 50 мм от эллиптичности волновода (S)

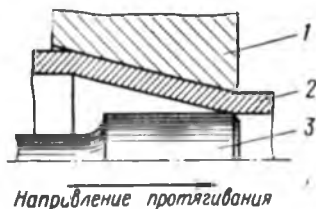


Рис. 1.48. Калибровка внутреннего диаметра круглой волноводной трубы протягиванием через волоку с формующей оправкой:
1 — волока; 2 — заготовка; 3 — формующая оправка

волноводы, осуществляется дополнительная калибровка заготовок.

Технологический процесс изготовления прямолинейных волноводов круглого сечения следующий:

- 1) калибровка заготовок волноводных труб;
- 2) обработка на волноводной трубе посадочных мест под фланцы;
- 3) изготовление фланцев;
- 4) сборка фланцев с волноводной трубой;
- 5) обработка контактной поверхности фланцев;
- 6) нанесение гальванических покрытий;
- 7) отделка токонесущих поверхностей.

Этот технологический процесс не отличается по построению от процесса изготовления прямолинейного волновода прямоугольного поперечного сечения. Однако он специфичен. Рассмотрим его подробнее.

Таблица 1.26*

Диаметр канала волновода, мм	Допуск, мм		Диапазон частот, Гц (для H_{01})
	на диаметр	на эллиптичность	
97,87	0,1	0,13	3,74—6,84
83,62	0,08	0,08	4,37—8,01
71,42	0,07	0,07	5,12—9,37
61,04	0,063	0,051	5,99—11,0
51,99	0,05	0,05	5,61—7,03
44,45	0,044	0,038	8,23—15,1
38,10	0,038	0,038	9,6—17,6
32,54	0,033	0,033	11,2—20,6
27,79	0,028	0,028	13,2—24,1
23,825	0,024	0,023	15,3—28,1
20,244	0,02	0,02	18,1—33,1
17,475	0,017	0,017	20,9—38,3
15,088	0,015	0,015	24,2—44,4
12,70	0,013	0,013	28,8—52,7
11,125	—	—	32,9—60,2
9,525	—	—	38,4—70,3
8,331	—	—	43,9—80,4
7,137	—	—	51,2—93,8
6,35	—	—	57,6—105

* По данным Международной электротехнической комиссии.

Для калибровки внутреннего диаметра круглых волноводных труб в основном используют два способа: а) калибровка протягиванием; б) импульсная магнитная калибровка.

При первом способе применяется протягивание заготовки через волоку, с помещенной внутри трубы формующей оправкой (рис. 1.48).

Для волноводных труб с толщиной стенки равной или меньше 1,5 мм в качестве заготовки используется труба с толщиной стенки 2—3 мм. Минимальное число проходов при калибровке определяется допустимой степенью деформации для данного материала. Толщина стенки t_n , получаемая за один проход:

$$t_n = t_{\text{заг}} z,$$

где $t_{\text{заг}}$ — толщина стенки заготовки; z — коэффициент (для латуни Л68 $z = 0,38$, для латуни Л62 $z = 0,54$, для меди $z = 0,35$).

Число необходимых проходов

$$m = \frac{\lg \frac{t_n}{t_{\text{нар}}}}{\lg z},$$

где m — число проходов; t_n — толщина стенки волновода.

Изменение внешнего диаметра заготовки за проход может быть рассчитано из соотношения

$$\Delta D/D_n = 0,15,$$

где D_n — диаметр трубы после прохода.

Для восстановления пластических свойств заготовки

после очередного прохода производится отжиг. Минимальное отклонение от формы круга для труб диаметром менее 30 мм при калибровке составляет 0,08 мм. Для получения минимальной эллиптичности необходимо использовать обновляемые точные волокни из легированной вольфрамом стали и тщательный контроль стабильности размеров калибрующей оправки в процессе производства.

В последнее время широко распространена импульсная магнитная калибровка труб, которая ведется по схеме (рис. 1.49). Внутри соленоида 1 помещается цилиндр 2, на который надевается заготовка волновода 3. Магнитное поле соленоида наводит токи в заготовке волновода. Сила взаимодействия между этими токами и магнитным полем используется для обжатия заготовки по оправке. Давление, развиваемое на поверхности деформируемой заготовки,

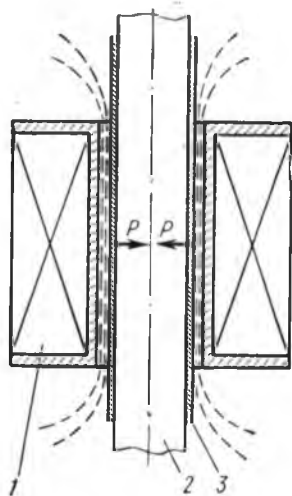


Рис. 1.49. Схема импульсной магнитной калибровки круглых волноводных труб

$$P = \frac{B^2}{8\pi},$$

где B — максимальное значение индукции.

Скорость деформации заготовки

$$v = \frac{B}{4 \sqrt{\pi \rho}} \text{ см/сек},$$

где ρ — плотность материала заготовки, г/см^3 .

Частота формирующих импульсов выбирается таким образом, чтобы условная глубина проникновения магнитного поля была меньше толщины стенки волновода.

В качестве оправки используется стальной стержень, поверхность которого оксидируется. Перед формовкой

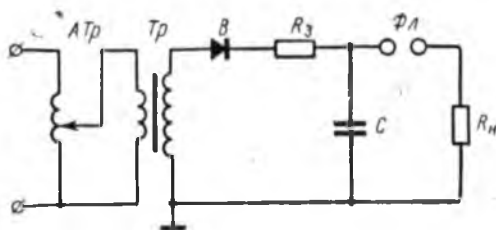


Рис. 1.50. Схема конденсаторного генератора для импульсной магнитной калибровки

поверхности оправки и заготовки покрываются тонким слоем смазки. Минимальная разность диаметров, достигаемая при калибровке магнитным полем, для волноводных труб диаметром менее 30 мм составляет 0,01 мм. Наиболее простым генератором импульсных токов, подаваемых на формирующую обмотку, является конденсаторный генератор (рис. 1.50).

Емкостной накопитель C заряжается через зарядное сопротивление R_3 до определенного напряжения, после чего разряжается через шаровой разрядник на сопротивление нагрузки R_n . Величина зарядного сопротивления должна быть тем меньше, чем выше рабочая частота генератора. Частота следования импульсов

$$\varphi = \frac{1}{2,3 R_3 C \lg(1 - U_p/U)},$$

где U_p — разрядное напряжение.

Мощность источника постоянного тока с учетом рабочей частоты генератора берется равной:

$$W_n = W_c \eta,$$

где $W_c = \frac{v^2 c}{2T}$ — мощность, накапливаемая в зарядном контуре; $\eta = 0,5$ к.п.д. зарядного контура; T — время накопления энергии.

Для использования в генераторах требуются конденсаторы, выдерживающие до $2 \cdot 10^6$ разрядов с частотой 100 гц. Этим требованиям отвечают конденсаторы высокого напряжения с бумажно-масляной изоляцией типа ИМ-5-150 и ИМ-50-2,7, предназначенные для работы в импульсных генераторах.

Импульсная магнитная калибровка легко поддается механизации, проста, экономична и является перспективной при калибровке круглых волноводных труб. Трудоемкость снижается на 60—80% по сравнению с калибровкой протягиванием.

Рассмотренными способами калибровки обрабатывают заготовки волноводов с внутренним диаметром свыше 9,52 мм. Волноводные трубы меньших диаметров требуют более жестких допусков (см. табл. 1.25).

Для круглых волноводов, предназначенных на частоты выше 40 Ггц, промышленных методов калибровки не разработано. При сборке такого волноводного тракта для уменьшения затухания волноводы взаимно ориентируют вращением вокруг оси, производят их взаимный подбор и применяют фильтры типов волн.

После калибровки на концы волноводной трубы устанавливают фланцы. Для посадки фланца на волноводную трубу на концах заготовки изготавливаются посадочные места — шейки. Радиальное смещение оси шейки по отношению к оси канала при измерении на расстоянии 2 мм от конца шейки допускается не более $\pm 0,05$ мм, а угол скрещивания осей шейки и канала на длине 60 мм не более 2,8 угл. мин. Неперпендикулярность торцевой поверхности шейки к оси канала должна быть не более 0,05 мм.

Требуемая точность при обработке посадочной шейки обеспечивается применением оправок с гидропластовым разжимным устройством (рис. 1.51). Оправка состоит из основания 1, разжимной втулки 2, гидропласта 3, плунжеров 4 и нажимного винта 5. Обработка ведется на токарно-винторезных станках повышенной точности. Оправка закрепляется в шпинделе станка. Волноводная труба надевается на разжимную втулку гидропластового устройства до упора. Под давлением гидропласта втул-

ка разжимается, центрируя волноводную трубу и закрепляя ее. Конец волноводной трубы поджимается грибковым центром, устанавливаемым в пиноль задней бабки станка. Режущий инструмент для обработки шейки изготавливается из стали Р18. Обработка ведется при скорости вращения шпинделя 250—300 об/мин. Подрезку торца шейки волноводной трубы ведут от внутренней к внешней поверхности во избежание заусенцев в рабочей полости волновода. Вторая шейка обрабатывается аналогично первой.

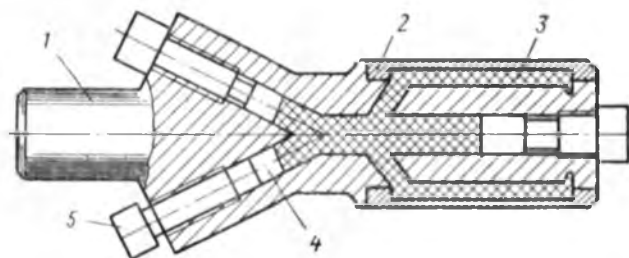


Рис. 1.51. Оправка с гидропластовым разжимным устройством для обработки посадочных мест под фланцы

При сочленении круглых волноводов используются *дроссельные и контактные фланцы*. Их конструкция, методы изготовления и пайки с волноводной трубой аналогичны рассмотренным ранее для прямоугольных волноводов. Однако требования к плоскостности контактной поверхности фланца, ее перпендикулярности к оси волновода и точности совмещения каналов волноводов здесь значительно выше.

Посадочное место во фланце калибруется протягиванием.

В последнее время разрабатываются методы бесфланцевого соединения волноводов. Примером является холодная сварка круглых волноводов. Стыкуемые трубы предварительно обжимаются на концах для уменьшения диаметра на 0,1—0,15 мм на длине 3—5 мм от торца, чтобы при последующей их развальцовке получить исходный диаметр. Затем они торцуются, очищаются от заусенцев, располагаются встык и положение их фиксируется. С внешней стороны на волноводы в месте их сочленения помещается стальная муфта (рис. 1.52). Внутри волновода вводится развальцовочный инструмент с удлинителем до 10 м. Под его воздействием происходит

калибровка канала волновода в месте стыка и холодная сварка. Прочность соединения на разрыв увеличивается за счет попадания металла стенок в кольцевую вы-

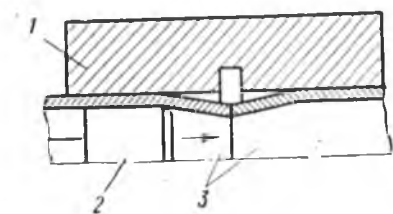


Рис. 1.52. Схема бесфланцевого соединения круглых волноводов: 1 — муфта; 2 — развальцовочный инструмент; 3 — волноводы

точку муфты. Соединение получается герметичным, механически прочным и выдерживает усилие на разрыв 6300—8200 кг, в то время как фланцевые соединения обеспечивают механическую прочность 1800—4000 кг. Это особенно важно при прокладывании волноводов в открытом грунте и изменении температуры окружающей среды. В электрическом отношении

область стыка практически не отличается от других участков волновода. Стоимость его в 7—8 раз ниже стоимости фланцевого соединения со сходными электрическими характеристиками.

Нанесение гальванических покрытий на поверхность прямолинейного волновода круглого поперечного сечения ведется по общей методике (см. § 2.7). Специфична последующая отделка токонесущих поверхностей. Для повышения чистоты поверхности волноводов лучше использовать электролитическое полирование, после которого она на 2—3 класса превышает исходную чистоту. При электрополировании применяют внутренние аноды, выполняемые в виде прутков и центрируемые в волноводной трубе с помощью специальных оправок. От точности центровки зависит стабильность чистоты токонесущей поверхности.

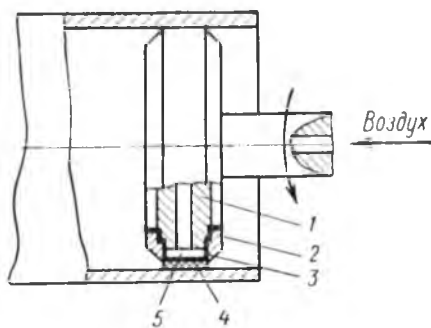


Рис. 1.53. Головка для кругового полирования

При механических способах повышения чистоты, чтобы не образовались продольные риски на стенках волновода, используют круговое полирование. Головка для кругового полирования труб (рис. 1.53) состоит из оправки 1, двух крепежных колец 2, резиновой оболочки 3 и фетрового кольца 4.

Головка вводится в волновод, затем давление в полости 5 поднимается до 0,3—0,5 избыточной атмосферы.

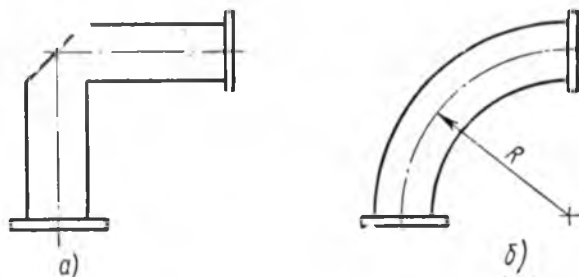


Рис. 1.54. Изогнутые волноводы:
а — угловой изгиб; б — плавный изгиб

Фетровое кольцо равномерно прижимается резиновой оболочкой по всему периметру к внутренней поверхности волноводной трубы. Головке сообщается вращение (от 100 до 300 об/мин) вручную или автоматически. При полировании можно использовать пасты. Для извлечения головки давление в полости 5 снижается до атмосферного; с помощью такого устройства можно получить чистоту внутренней поверхности в пределах 10—11-го класса.

Конструкции изогнутых волноводов круглого поперечного сечения представлены на рис. 1.54, а и б. Основной технологической задачей при выполнении плавных волноводных изгибов (рис. 1.54, б) является обеспечение стабильности размеров поперечного сечения в области изгиба и постоянства радиуса изгиба.

В круглых волноводных трубах малой протяженности гибку производят с заполнением полости заготовки. Хорошие результаты дает гибка в штампах с заполнением волноводной трубы стальными шариками и последующей калибровкой канала проталкиванием шариков сквозь изогнутую волноводную трубу. Заполнение ша-

риками применяется для гибки волноводных труб с внутренним диаметром не более 15 мм. Приспособление аналогично рассмотренному для прямоугольных волноводов (см. рис. 1.17). Отличие состоит в том, что пуансон и матрица имеют углубления, соответствующие внешнему диаметру заготовки.

Для волноводных труб большой протяженности применяется гибка прокаткой между двумя роликами. Предварительно отожженная заготовка закрепляется в приспособлении (рис. 1.55, а). Для предотвращения дефор-

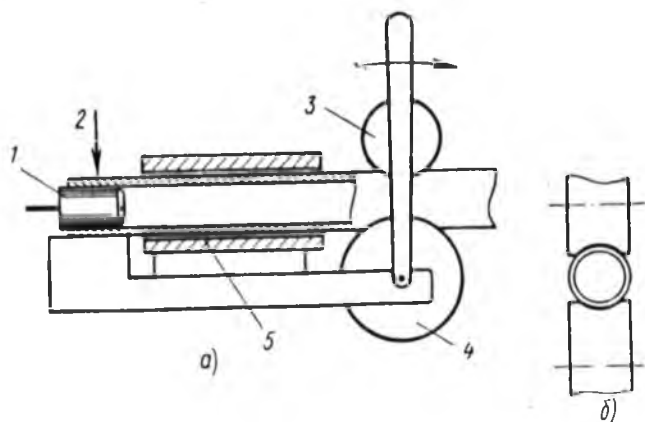


Рис. 1.55. Приспособление для гибки волноводов прокаткой между роликами:

а — схема работы приспособления; б — конфигурация роликов

маций ее конца при закреплении зажимом 2, в трубу вводится сухарь 1. Область изгиба охватывается роликами 3 и 4. Труба 5 фиксирует положение заготовки. Заготовка изгибается на требуемый угол качением ролика 3 по ролику 4. Радиус гибки определяется радиусом ролика 4. Конфигурация роликов обеспечивает постоянство внешнего диаметра заготовки в зоне гибки (рис. 1.55, б), поэтому для обеспечения малого разброса диаметра полости волновода в области изгиба в качестве заготовок используют трубы, откалиброванные по толщине стенки. В этом случае технологический процесс гибки следующий (промежуточные отжиги и промывки заготовки не указаны):

1) калибровка заготовки волноводной трубы;

- 2) блестящее серебрение;
- 3) электрополирование токонесущей поверхности;
- 4) гибка.

Угловые изгибы круглых волноводов изготавливаются пайкой. Торцы заготовок предварительно обрабатываются на фрезерном станке. Металлическое «зеркало» получают штамповкой. Его токонесущая поверхность обрабатывается до 10-го класса чистоты.

Допустимая неплоскостность составляет обычно 0,01—0,02 мм. С торцов заготовок труб удаляются заусенцы, после чего они притираются, затем детали изгиба собираются в оправку, которая фиксирует их взаимное расположение.

При сборке необходима правильная стыковка труб. Для этого они до сборки с «зеркалом» выставляются по плоскости I—I (рис. 1.56) с помощью подвижной плиты 1 и зажимаются прижимами 2. Во избежание деформации трубы при зажиме внутренние поверхности прижимов покрыты асбестом. Втулки 3 дают направление заготовкам. Зеркало крепится прижимом 4. Пайка ведется твердыми припоями.

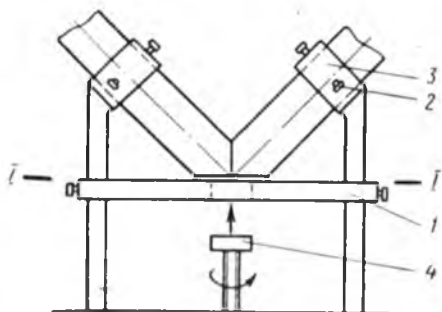


Рис. 1.56. Приспособление для пайки угловых изгибов

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ОТДЕЛКИ КОРПУСОВ ВОЛНОВОДНЫХ УСТРОЙСТВ

В зависимости от конструкции корпуса волноводных устройств могут быть сборными или цельными. Для их изготовления применяются следующие методы:

1) пайка и сварка с использованием в качестве исходных заготовок предварительно обработанных волноводных труб;

2) точное литье;

3) холодное выдавливание;

4) наращивание металла;

5) комбинированные способы формообразования.

Изготовление корпусов волноводных устройств этими методами имеет некоторые особенности, которые будут рассмотрены далее.

§ 2.1. ИЗГОТОВЛЕНИЕ КОРПУСОВ ПАЙКОЙ И СВАРКОЙ

В качестве заготовок для корпусов волноводных устройств, изготавливаемых пайкой и сваркой, используются предварительно обработанные волноводные трубы. Технологический процесс изготовления корпусов начинается с обработки волноводных труб (гл. 1).

В зависимости от материала труб выбирают способы, режимы пайки и составы применяемых припоев. Для сборочных единиц из *латунных* волноводных труб пайку ведут с использованием твердых припоев типа ПСр. Они имеют высокую механическую прочность, низкое удельное сопротивление, устойчивы к воздействию окружающей среды. Прочность соединения латунных деталей при

пайке серебряным припоем достаточно высока. Для латуни Л62, паяной припоем ПСр45, предел прочности при соединении встык составляет 28—34 кг/мм², при пайке внахлестку — 17—33 кг/мм².

В табл. 2.1. приведены составы наиболее употребляемых для пайки латунных волноводных сборочных единиц серебряных припоев и их характеристики.

На механическую прочность паяного соединения влияет зазор между паяемыми деталями, величина которого определяет толщину слоя припоя в шве. Зазор должен легко заполняться припоем и удерживать его благодаря капиллярному натяжению. Оптимальный размер зазора зависит от свойств припоя и состояния поверхности соединяемых деталей. При отклонении размеров зазора от оптимальной величины прочность паяных соединений уменьшается. На рис. 2.1 дана кривая, характеризующая зависимость механической прочности паяного соединения латунных деталей от величины зазора при их пайке серебряными припоями. При этом в качестве флюса используют буру или смесь 80—90% буры с 10—20% хлористого цинка. После пайки флюс удаляют, промывая сборочную единицу в горячей воде волосяными щетками.

Мягкие припои редко используются для пайки латун-

Таблица 2.1

Марка	Состав, %			Примеси не более, %		Удельный вес, г/см ³	Температура, °С		Предел прочности, кг/мм ²	Р припоя Р _{мед}
	Cu	Ag	Zn	Рb	Всего		Солидус	Ликвидус		
ПСр10	50 ± 1	10 ± 0,3	Остальное	0,5	1	8,6	815	850	—	6,5
ПСр12	36 ± 1	12 ± 0,3		0,5	1	8,5	750	800	18,5	11,5
ПСр25	40 ± 1	25 ± 0,3		0,5	1	8,9	745	775	28	6,9
ПСр45	30 ± 0,5	45 ± 0,3		0,3	0,5	9,3	670	725	30	9,7
ПСр65	20 ± 0,5	65 ± 0,5		0,3	0,5	9,6	685	720	30—35	8,6
ПСр70	26 ± 0,5	70 ± 0,5		0,3	0,5	9,8	730	755	30—35	4,2

ных волноводных сборочных единиц из-за низкой устойчивости их к воздействию окружающей среды, низкой механической прочности, низкого предела усталости при статических нагрузках и отрицательных температурах. Наиболее часто применяются мягкие припой вместе с твердыми при ступенчатой пайке волноводной сборочной единицы. Зона пайки нагревается горелкой,

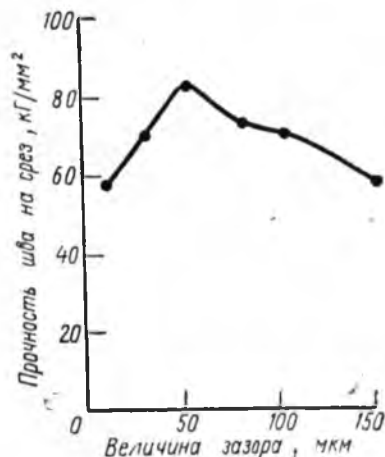


Рис. 2.1. Зависимость механической прочности паяного соединения латунных деталей при их пайке серебряными припоями от величины зазора

в печах, индукционным способом или в жидких средах. Припой вводится в зону пайки после ее нагрева или предварительно укладывается на место пайки.

Пайка горелкой ведет к короблению волноводной сборочной единицы и может быть рекомендована только для мелкосерийного производства. Она требует дополнительной рихтовки, припиловки и зачистки, имеет низкую производительность и невысокое качество шва. При пайке горелкой волноводная сборочная единица со-

бирается на фиксирующем приспособлении, скрепляется в отдельных точках сваркой, затем снимается с приспособления и пропаявается.

Индукционная пайка используется в основном для соединения волноводной трубы с фланцем.

Пайка в печах с защитно-восстановительной атмосферой позволяет уменьшить деформацию спаиваемых деталей и паять сразу несколько швов. Процесс ведется в такой последовательности. Отожженные и тщательно обезжиренные детали волноводной сборочной единицы собираются на оправках, их взаимно фиксируют приспособлениями из нержавеющей стали X18H9T, чтобы избежать припаивания приспособлений к деталям волноводной сборочной единицы. Припой накладывается на

места пайки в виде проволоки диаметром 0,3—1,2 мм или фольги толщиной 0,05—0,1 мм, после чего сборка помещается в печь, нагретую до температуры 790—800° С, которую затем поднимают до рабочей. Время выдержки в печи зависит от размеров и веса сборочной единицы и приспособления.

Если вес сборочной единицы и приспособления не превышает 1 кг, то время выдержки составляет 7 ÷ 12 мин; при весе — 1—3 кг время выдержки 12 ÷ 20 мин. Остывание сборочной единицы до 100÷150° С ведется в защитно-восстановительной среде. Недостатками способа являются высокая стоимость оборудования и относительно низкая производительность.

При пайке латунных волноводных сборочных единиц в расплаве солей (в соляных ваннах) сборочная единица подготавливается так же, как и при пайке в печах с защитно-восстановительной атмосферой. Фиксирующее приспособление с закрепленными на нем деталями тщательно просушивается и помещается на 4—6 мин в расплав солей, который выполняет функции активного флюса, защитной среды и теплоносителя. В табл. 2.2 приведены составы различных ванн и их рабочие температуры.

Таблица 2.2

Химический состав, %				Температура, °С	
натрий хлористый	кальций хлористый	барий хлористый	калий хлористый	плавления	рабочая максимальная
27,5	72,5	—	—	500	870
50	50	—	—	505	870
21,0	48,0	31,0	—	435	850
35,0	25,0	—	40,0	552	870
37,0	—	22,0	41,0	552	870
—	50	50	—	595	850

Состав солей выбирается в зависимости от температуры плавления применяемого припоя. Обычно режим пайки задается на 80—100° С выше температуры плавления припоя. Для улучшения пайки детали предварительно нагревают до 300—350° С. Хорошие результаты дает предварительное серебрение мест, подлежащих пайке. Высокое качество пайки достигается при использовании припоев ПСр40-КН и ПСр48 (табл. 2.2).

Преимущество этого способа в том, что он не требует дополнительного оборудования для создания восстановительной или нейтральной среды. Его достоинства:

- 1) возможность пайки сложных сборочных единиц при близком расположении швов;
- 2) высокая производительность;
- 3) точность регулировки температуры ($\pm 5^\circ \text{C}$) и ее постоянство.

К недостаткам относятся:

- 1) относительно низкий к. п. д. ванны;
- 2) опасность выброса в случае погружения влажных сборочных единиц;
- 3) необходимость работы под вытяжкой.

Способ пайки выбирают с учетом масштаба производства волноводных сборочных единиц, степени его оснащенности современным оборудованием, а также особенностей конструкции волноводных корпусов, подлежащих пайке.

Волноводные сборочные единицы из *алюминия* и его сплавов получают как сваркой, так и пайкой.

При этом трудность связана с природой окисной пленки, образующейся на поверхности деталей. Эта пленка имеет очень высокую температуру плавления (выше 2000°C) и значительную толщину, в десятки раз превышающую толщину пленки на других металлах.

Оксид алюминия (Al_2O_3) образуется на поверхности в виде плотной пленки, которая препятствует сплавлению соединяемых кромок металла.

При обычной температуре удаление окисной пленки сопровождается быстрым ее восстановлением, при повышении — скорость образования пленки увеличивается в десятки раз.

Способы удаления окисной пленки — механический, химический, электролитический, кавитационный и т. д. Качество соединений зависит от того, как подготовлена поверхность под сварку и пайку.

Для получения качественной структуры сварного шва в алюминиевых сплавах необходимо:

защитить от влияния атмосферы и ограничить перегрев жидкого металла, чтобы избежать повышенного поглощения газов;

максимально сократить время пребывания сварочной ванны в жидком состоянии;

обеспечить быстрый переход из жидкого состояния в твердое для получения благоприятной дендритной структуры и малых местных напряжений.

Все это можно обеспечить, используя сосредоточенные источники тепла большой интенсивности (например, аргонодуговая сварка), позволяющие вести сварку с повышенной скоростью.

При подготовке волноводов под аргонодуговую сварку все детали и присадочная проволока должны быть обезжирены в бензине или ацетоне. Снятие окисной пленки выполняется механическим или химическим способом. Механическую зачистку производят стальной щеткой, шабером или напильником. При химической очистке детали и присадка подвергаются травлению в 5—8%-ном растворе едкого натра при 50—60°С в течение 15—20 сек, затем промывают в горячей проточной воде и осветляют в 30%-ном растворе азотной кислоты.

После осветления детали и присадочную проволоку промывают в холодной, а затем в горячей проточной воде 0,5—1 мин и сушат при температуре 100—120°С.

Подготовленные детали собирают в сборочные единицы на специальных приспособлениях. Зазоры между свариваемыми кромками не должны превышать 0,1—0,15 от меньшей толщины свариваемых деталей.

Во избежание прожогов и вздутий на внутренних поверхностях волноводных труб, сварку выполняют на стальных оправках. Фиксируют соединяемые волноводные трубы и детали сборочных единиц друг относительно друга.

Для защиты сварочной ванны применяется аргон состава «А» (ГОСТ 10157—62). Его расход 4—5 литров в минуту. Чистота газа является одним из основных условий качественной сварки. Примесей допускается не более: кислорода — 0,03—0,05%, азота — 0,2—0,25%.

Наличие влаги в аргоне даже в небольшом количестве делает сварку невозможной. Дуга становится неустойчивой, происходит сильное разбрызгивание металла, шов получается пористый и грязный, ванна покрывается черным налетом. Сварку ведут неплавящимся электродом из латунированного вольфрама марки ВЛ-10 (ТУ 24-5—62) диаметром 1,2—2 мм.

Аргонодуговую сварку волноводных сборочных единиц выполняют с максимальной скоростью, не допуская перегрева металла шва и кипения ванны, иначе могут

образоваться трещины в шве и околосшовной зоне. Если количество сварных швов велико, то вначале накладывают длинные швы большого сечения, затем короткие, меньшего сечения; при сварке близко расположенных швов второй шов выполняют после того, как остынет первый; выбирая режимы сварки, необходимо учитывать, что с увеличением тока и уменьшением скорости возрастает площадь проплавления, а с увеличением длины дуги и диаметра электрода при неизменной силе тока глубина проплавления уменьшается.

Высокое качество сварного соединения обеспечивают, изготавливая детали волноводных сборочных единиц из однородных сплавов. Допускается комбинация технически чистого алюминия со сплавами АМц и в меньшей степени АМг. Дюралюминий не применяют, так как при этом в сварном шве могут быть непровары, поры и трещины. В качестве присадочного материала используется либо материал того же состава, что и свариваемые металлы, либо технически чистый алюминий.

Последовательность операций при технологическом процессе аргонодуговой сварки приведена в табл. 2.3.

Для изготовления волноводных сборочных единиц из алюминия используют пайку.

Припой с большим количеством алюминия и легированные для понижения температуры плавления кремнием, медью, цинком и т. д. (табл. 2.4) позволяют производить флюсовую пайку алюминия, малолегированного алюминиевого сплава АМц и частично АМг различными способами — горелкой, погружением в расплав солей (табл. 2.5), токами высокой частоты и в печах.

С понижением температуры плавления алюминиевых припоев можно паять без пережога сплавы Д16, В95. Припои этой группы отличаются малым удлинением, высокой твердостью и достаточной прочностью.

Флюсы, применяемые при пайке алюминия и его сплавов, должны обеспечивать очистку поверхностей деталей и припоя от окислов и загрязнений, предохранять нагретые поверхности от нового окисления, улучшать смачивание расплавленным припоем соединяемых поверхностей и затекание припоя в зазоры между ними.

Флюс для пайки алюминиевых волноводных сборочных единиц должен отвечать следующим требованиям.

1. Активно очищать поверхности паяемых деталей от окислов и других загрязнений раскислением или раство-

Таблица 2.3

Операции	Оборудование	Применяемые материалы	Режим работы	
			t, °C	Время выдержки, сек
Обезжиривание органическими растворителями	Стальной противень	Бензин Б-70 или ацетон		
Сушка на воздухе				
Травление в щелочи	Ванна стальная с подогревом и вентиляционным отсосом	Едкий натр (50—80 г/л)	50—60	15—20
Промывка в горячей воде	Ванна стальная		70—80	5—10
Осветление в азотной кислоте	Ванна винипластовая с вентиляцией	Азотная кислота с удельным весом 1,4 (30%-ный раствор)	18—25	10—15
Промывка в горячей воде	То же		70—80	30—60
Сушка	Калорифер с вентилятором		100—120	
Сборка	Специальные приспособления, прижимы и струбицы			
Аргонодуговая сварка	Установка переменного тока для сварки в защитной среде	Электрод (1,2—2 мм) Присадочная проволока (2—2,5 мм)	Сила тока 75—90a	

Таблица 2.4

Марка припоя для пайки алюминия	Температура плавления, °C	Химический состав %				
		Al	Cu	Si	Zn	Mn
П590А	590	89,0	10,0	1,0	—	—
П575А	575	80,0	—	—	20,0	—
П550А	550	65,5	27,0	6,0	—	1,5
З4А	525	66,0	28,0	6,0	—	—
П480А	480	20,0	15,0	—	64,4	0,6
П425А	425	20,0	15,0	—	65,0	—

Таблица 2.5

Температура, °С			Состав солей для пайки алюминия в соляных ваннах, %					
плавле- ния	загвер- твления	рабочая	NaCl	KCl	LiCl	CdCl ₂	BaCl ₂	эвтектика KFAIF ₂
520	560	610	33 ± 1	30 ± 1	26 ± 1	—	—	11 ± 1
380	450	560	—	51 ± 1	41 ± 1	—	—	8 ± 1
435	480	610	19 ± 1	—	—	43 ± 1	28 ± 1	10 ± 1
552	570	620	34 ± 1	37 ± 1	—	—	20 ± 1	9 ± 1

Примечание. Эвтектическое соединение KFAIF₂ содержит 54% Al³⁺ и 46% KF.

рением их с образованием более легкоплавких соединений.

2. Иметь температуру плавления и начало флюсующей активности несколько ниже температуры плавления припоя, а температуру потери флюсующей активности значительно выше температуры процесса пайки.

3. Обладать при пайке жидкотекучестью настолько, чтобы полностью заполнить зазоры паяемых соединений и обеспечить образование защитных слоев на поверхности деталей в местах пайки, достаточных для предохранения нагретого металла и расплавленного припоя от окисления.

4. Повышать поверхностную активность расплавленного припоя для лучшей смачиваемости им поверхности основного металла и затекания в зазоры паяемых соединений.

Флюсы для пайки алюминия и его сплавов представляют смеси хлоридов и фторидов щелочных металлов. В качестве основных добавок в них вводится хлористый цинк и другие хлориды тяжелых металлов (табл. 2.6).

Таблица 2.6

Марка флюса	Темпе- ратура плав- ления, °С	Химический состав, %				
		KCl	LiCl	NaF	ZnCl ₂	CdCl ₂
34А	420	50	32	10	8	—
Ф380А	380	47	38	5	10	—
Ф370А	370	47	38	5	—	1

С флюсами, указанными в таблице, можно паять детали, изготовленные из алюминия и его сплавов АМц, АМг, Д1, Д16, В95, АЛ2, АЛ9, АЛ11 в любых сочетаниях.

Подготовка к пайке включает очистку от загрязнений, красок, масел, окисной пленки, а также сборку и фиксацию деталей под пайку.

Вначале детали подвергают обезжириванию в органических растворителях для удаления с их поверхности жировых и масляных веществ, так как при пайке они обугливаются и препятствуют растеканию припоя по поверхности металла. Последующим травлением удаляют с поверхности деталей окислы металла. Это повышает действие паяльного флюса, взаимодействие припоя с основным металлом делается более полным и повышается качество паяных соединений.

Детали должны поступать на пайку сразу же после травления.

Подготовленные детали собираются в сборочные единицы; при этом используют кернение для крепления фланцев на волноводных трубах или специальные приспособления. Чтобы при пайке не происходило затекание флюса и припоя в полость волноводов, труба должна выступать с наружной стороны фланца не менее чем на 2 мм, а зазор между паяемыми поверхностями должен быть не менее 0,08—0,12 мм для лучшей растекаемости припоя (рис. 2.2). Пайку сборочных единиц выполняют на графитовых оправках. Детали волноводов нагревают до 450—500°С, затем шов профлюсовывают и детали нагреваются до 550—600°С, после этого с одной стороны подается припой с таким условием, чтобы он пришел на другую сторону шва и вытеснил весь флюс из паяе-

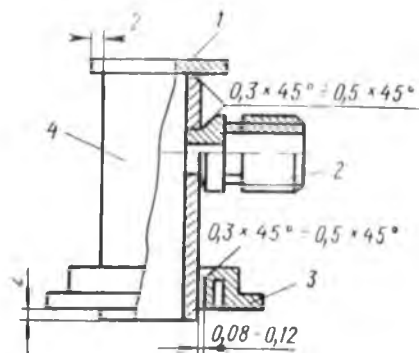


Рис. 2.2. Технологические припуски, фаски и зазоры, необходимые при выполнении паяных соединений:

1 — пластина; 2 — втулка; 3 — фланец; 4 — волноводная труба

мого соединения. Затем при необходимости можно добавить припой с противоположной стороны.

Остатки кислотных флюсов гигроскопичны и активны в коррозионном отношении, поэтому их удаляют, тщательно промывая сборочные единицы в горячей проточной воде, а затем в холодной, протирая швы жесткими волосяными щетками. Отмывку производят не позднее чем через час после пайки.

Качество отмывки проверяют нанесением 2%-ного раствора AgNO_3 на швы. При появлении на шве белого налета хлористого серебра отмывку повторяют.

Типовой технологический процесс пайки приведен в табл. 2.7.

К недостаткам паяных и сварных соединений алюминия относятся низкая коррозионная стойкость металла швов по сравнению с основным металлом и необходимость защиты швов лаком перед нанесением покрытий, так как паяные швы в процессе нанесения химических и гальванических покрытий растравливаются, а также необходимость механической обработки сварных швов (удаление проплава), наличие непроваров или проплавов с противоположной стороны шва. Непровар сварного шва может быть очагом коррозии.

Комбинированные соединения лишены недостатков сварных и паяных соединений. В этом случае вначале производят аргонодуговую сварку без проплава шва. Затем шов пропаивают с противоположной стороны твердым припоем, состоящим из 70% алюминия и 30% цинка. На комбинированные соединения могут наноситься гальванические и химические покрытия. Они удовлетворяют требованиям прочности и герметичности конструкции. Иногда форма деталей и их взаимное расположение не позволяют вести пайку обратной стороны шва. Кроме того, из-за высокой температуры плавления припоя нельзя применять для соединения тонкостенных деталей волноводных сборочных единиц. В этом случае вначале ведется пайка шва, а затем по паяному шву осуществляют аргонодуговую сварку.

Возможность аргонодуговой сварки паяных соединений без полного расплавления металла паяного шва вызвана тем, что в процессе пайки химический состав шва изменяется, это ведет к увеличению температуры плавления по сравнению с температурой плавления припоя. Так, в результате пайки припоем 34А, пред-

Таблица 2.7

Операции	Оборудование	Применяемые материалы	Режим работы	
			Температура, °С	Время выдержки, сек
Обезжиривание органическим раствором	Стальной противень	Бензин Б-70 или ацетон		
Сушка на воздухе				
Травление в щелочи	Ванна стальная с подогревом и вентиляционным отсосом	Едкий натр (50—80 г/л)	50—60	15—20
Промывка в горячей воде	Ванна стальная		70—80	5—10
Осветление в азотной кислоте	Ванна винипластовая с вентиляцией	Азотная кислота с удельным весом 1,4 (30%-ный раствор)	18—25	10—15
Промывка в холодной воде	Ванна стальная		18—25	15—20
Промывка в горячей воде	То же		70—80	30—60
Сушка	Калорифер с вентилятором		100—120	
Контроль Сборка	Стол Специальные приспособления, прижимы, струбцины, керн			
Пайка		Припой 34А, флюс 34А или Ф370А (пруток припой $\varnothing 2-2,5$ мм)	550—570	
Промывка в горячей воде с протиркой щетками	Ванна стальная, щетки жесткие		70—80	8—10
Промывка в холодной воде	Ванна стальная	Азотнокислое серебро (2%-ный раствор)		
Контроль				

ставляющим собой тройную эвтектику системы Al—Cu—Si, которая состоит из трех фаз (твердого раствора на основе алюминия, Al_2Cu и кремния), происходит рост зерен твердого раствора алюминия и диффузия кремния и меди в основной металл. При этом темпера-

тура распая паяного шва возрастает на 50—100°С по сравнению с температурой плавления припоя. Глубина проплавления паяного шва при его аргонодуговой сварке составляет до 30% от толщины стенки трубы. При увеличении глубины возможны проплавы шва. В качестве присадочного металла при аргонодуговой сварке используется металл марки СвАК5 в виде проволоки. Режимы сварки паяных волноводных сборочных единиц с предварительной пайкой и без нее различны, так как в этом случае не производится проплавление основного металла на всю его толщину. Ориентировочный режим сварки паяных соединений волноводных труб с размерами 23×10×1,4 мм следующий: диаметр неплавящегося электрода 1,2—1,6 мм, сила тока 50—60 а (на 20—25% ниже, чем при сварке без предварительной пайки), диаметр присадочной проволоки 1,4 мм, расход аргона 5—6 л/мин, напряжение на дуге 11—15 в, длина дуги 1,5—2,5 мм.

При пайке волноводных сборочных единиц, выполненных из *магния* и его сплавов, встречаются трудности, связанные с тем, что на поверхности металла находится плотная и тугоплавкая окисная пленка. Кроме того, наличие в составе большинства магнитных сплавов низкотемпературных эвтектик Mg—Al, Mg—Zn и Al—Zn усложняет выбор припоев для получения надежных паяных соединений. При нагреве до температуры 340—360°С эвтектики начинают плавиться и, взаимодействуя с компонентами припоя, вызывают интенсивное растворение основного металла на значительную глубину. Выплавляя низкотемпературные эвтектики, можно производить пайку без припоев и флюсов. Так, при нагреве до температуры 380°С магниевый сплав МА-2 сплавляется с АОО. Однако полученные таким способом паяные швы непрочны и при незначительной ударной нагрузке разрушаются. Их повышенная хрупкость объясняется образованием интерметаллического соединения Mg₄Al₃. Припои, используемые для получения качественных паяных соединений магния и его сплавов, должны иметь:

1) температуру плавления ниже температуры конца кристаллизации магниевых сплавов, подвергаемых пайке, это предотвращает выплавление низкотемпературных эвтектик и уменьшает опасность загорания основного металла при пайке;

2) достаточную жидкотекучесть, пластичность и способность растворять основной металл деталей; глубина диффузионного слоя при этом не должна превышать 0,2 мм;

3) высокую коррозионную стойкость (не ниже стойкости основного металла);

4) в своем составе только такие элементы, контакт которых с магнием допустим.

Перечисленным требованиям отвечают припой И430Мг и И1330Мг. Составы припоев и их характеристики приведены в табл. 2.8.

Таблица 2.8

Температура плавления, °С	Предел прочности, кг/мм ²	Химический состав			Припой, рекомендуемые для пайки паром
		Al	Zn	Mg	
430	13—15	0,75—1,0	13—15	Остальные	МА-1/МА-1
380	10—12	2,0—2,5	23—25	То же	МА-8/МА-8

При температуре 300°С магний непосредственно соединяется с азотом воздуха. Получающаяся при взаимодействии с влагой гидроокись препятствует пайке. Поэтому флюсы для пайки магния не должны содержать влаги, быстро растворять пленку окиси магния и превращать ее в шлак, удельный вес которого должен быть меньше удельного веса расплавленного припоя.

Флюсы, отвечающие этим требованиям, приведены в табл. 2.9.

Таблица 2.9

№ п.п.	Температура плавления, °С	Химический состав, %						
		KCl	NaCl	LiCl	SiCl ₂	Na ₂ AlF ₆	KF	NaF
1	380	31,5	9,0	49,5	—	2,0	—	8,0
2	380	12,5	10,0	37,0	—	0,5	—	10,0
3	435	35,0	35,0	20,0	5	—	5	—

Флюс 1 дает хорошие результаты, но он дороже, так как содержит большое количество хлористого лития.

Флюс 2 обладает сравнительно высокой текучестью и активностью, обеспечивая хорошее затекание припоев в зазоры.

Флюс 3 отличается повышенной температурой плавления, поэтому применяется редко. Хранить все флюсы надо в герметически закрытой таре, так как они гигроскопичны.

Технологический процесс пайки состоит из подготовки деталей, их сборки, спайки, удаления остатков флюса.

Детали, поступающие на пайку, тщательно промываются. Окисная пленка удаляется в растворе хромового ангидрида. Места пайки зачищаются механически.

Пайка выполняется не позже чем через 2—4 ч после зачистки. Сразу же после пайки тщательно отмывают остатки флюса. Для этого волноводная сборочная единица на 40—60 мин помещается в кипящий 2—3%-ный раствор углекислой соды, затем промывается в холодной воде с добавкой 0,5% (по весу) хромпика. После механической обработки для повышения коррозионной стойкости детали оксидируются.

Волноводные сборочные единицы на основе титановых волноводных труб выполняются пайкой, трудность которой состоит в том, что большое число металлов образует с титаном хрупкие интерметаллические соединения. Это затрудняет выбор припоя.

Пайку титановых волноводных сборочных единиц ведут припоем ПСрМцМн-86,8 в среде аргона марки А в режиме: температура пайки 1000—1060°С, время выдержки 5—10 мин. В результате образуется соединение с пределом прочности на срез 20—25 кг/мм². Недостаток этого припоя — пониженная пластичность паяных соединений, что иногда приводит к разрушению узлов при рихтовке и механической обработке. Кроме того, соединения, паянные припоем ПСрМцМн, плохо покрываются гальваническими осадками меди, никеля и серебра. Для получения качественного покрытия эту операцию повторяют несколько раз, снимая ранее наложенный слой гальванического осадка. Это повышает трудоемкость изготовления и может быть причиной разрушения припоя.

Лучшие механические характеристики и более надежную покрываемость места спая дает применение припоя следующего состава (%):

медь	49—51
железо	1—3
кремний	0,7—1
титан —	остальное

В этом случае паяные швы образуются на основе титана, что обеспечивает сближение свойств соединений и основного металла. Припой изготавливают в виде порошка. В качестве связки используют смесь поливинилового спирта с дистиллированной водой: 82—84 см³ дистиллированной воды смешивают с 16—18 г поливинилового спирта (ПВС-1 или ПВС-5) при 80°С.

Пасту, содержащую 50% припоя и 50% связки, наносят на место спая. Пайку ведут в аргоне марки А при 990—1010°С. Время пайки можно определить по формуле

$$t \geq \frac{2,3h^2}{\pi^2 D},$$

где t — время, сек; h — величина зазора, см; D — коэффициент диффузии, см²/сек (при 1000°С = 10⁻⁵ см²/сек).

Зазор между паяемыми деталями не должен превышать 0,06 мм. Пайке подвергают титановые детали с толщиной стенки не менее 0,8—1 мм.

При некачественной пайке этот припой для подпайки не используют, так как происходит интенсивное увеличение хрупкости титана в области шва. В результате при механической обработке могут возникнуть трещины. Подпайку ведут более легкоплавким припоем ПСр-72 в аргоне марки А при 820—840°С и времени выдержки 1—2 мин.

§ 2.2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ КОРПУСОВ ТОЧНЫМ ЛИТЬЕМ

Волноводные корпуса, изготавливаемые точным литьем, имеют каналы прямоугольного, эллиптического или круглого сечения и сложную конфигурацию. Толщина стенок литых волноводных корпусов лежит в пределах 1,5—2,5 мм. Радиус закругления в углах канала прямоугольного поперечного сечения 0,2—0,3 мм. Литьем получают как латунные волноводные корпуса (ЛС59-1Л), так и корпуса из сплавов алюминия (АЛ9, АЛ2). Меха-

Таблица 2.10

Марка сплава	ГОСТ или ТУ	Предел прочности при растяжении, $KI/мм^2$	Относительное удлинение, %	Твердость по Бринеллю
АЛ9	ГОСТ 2685—63	16	2	50
АЛ2	ГОСТ 2685—63	15	4	50
ЛС59-1Л	АМТУ1354—55	25	15	60

нические свойства отливок волноводных корпусов приведены в табл. 2.10.

Точность размеров волноводных корпусов, полученных литьем, соответствует требованиям 4—6-го классов. Чистота токонесущих поверхностей волноводных каналов, полученных литьем, лежит в пределах 5—6-го классов шероховатости. При изготовлении волноводных корпусов точным литьем по выплавляемым моделям в состав формы входит кварцевый песок, который при нагреве расплавленным металлом переходит из α модификации в β модификацию, претерпевая объемные изменения. Особенно это влияет на плоские поверхности волноводного корпуса: они искажаются — становятся вогнутыми. Для того чтобы избежать этого, в конструкции волноводных корпусов необходимо предусмотреть ребра жесткости, расположенные в направлении, перпендикулярном большей оси плоскости. Если конструкция не предусматривает ребер жесткости, то их следует ввести на этапе изготовления с последующим удалением.

Схема технологического процесса изготовления корпусов волноводных устройств точным литьем по выплавляемым моделям показана на рис. 2.3.

Для изготовления моделей отливаемых волноводных корпусов применяется парафиново-стеариновая смесь в соотношении 1 $\times$ 1. Так как к точности и стабильности размеров полости волновода предъявляются высокие требования, применять смесь, бывшую в употреблении, не следует (даже в качестве добавок к свежему составу). Возврат можно использовать только для изготовления литниковой системы. Смесь готовят следующим образом: раздробленный и дозированный по весу стеарин и парафин расплавляют в ванне, смесь

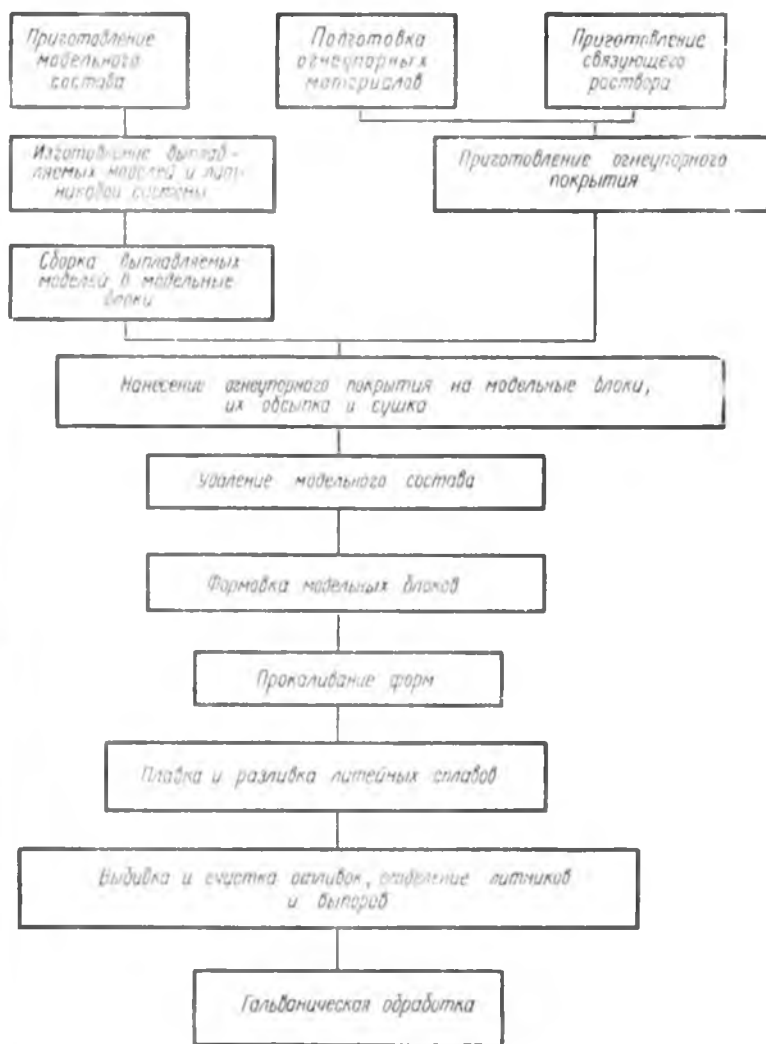


Рис. 2.3. Схема изготовления корпусов волноводных устройств литьем по выплавляемым моделям

тщательно перемешивается и фильтруется, охлаждается до пастообразного состояния ($42-43^{\circ}\text{C}$) при непрерывном перемешивании.

Смесь путем шприцевания вводится в полость пресс-формы и выдерживается в металлической пресс-форме 2—2,5 мин и 3—5 мин — в гипсовой. После охлаждения пресс-формы до $18-20^{\circ}\text{C}$ модель извлекается из нее. Размеры рабочих поверхностей пресс-формы определяются с учетом усадки, которая составляет 0,8—1,0% на станки толщиной 1,5—2,5 мм и 1,5% на волноводные фланцы. Исправление дефектов модели на волноводном канале не допускается. Модели с такими дефектами бракуют. Для выявления трещин и крупных воздушных раковин их рассматривают на свет, затем собирают в блоки на общем стояке (стержне).

Поверхность модельного блока покрывается огнеупорным покрытием. Для первого слоя оно должно быть плотнее, чем для последующих. Плотность огнеупорного состава слоев: 1-го — 1,68—1,69; 2-го — 1,65—1,67; 3-го — 1,62—1,64; 4-го — 1,6—1,61.

Плотность слоев проверяется ареометром при замешивании огнеупорного покрытия.

Огнеупорное покрытие наносят на модельные блоки литых волноводных корпусов, погружая их в огнеупорный состав с последующим высушиванием. Волноводные модели с большой поверхностью покрывают 4—5 слоями огнеупорного покрытия.

Модельный состав из высушенной модельной оболочки удаляют через литниковую систему горячей водой, подкисленной соляной кислотой (концентрация 1—3%), при $+80^{\circ}\text{C}$. Время выплавки 10—15 мин. После этого оболочки просушивают и формуют в опоках. При формовке оболочка помещается в опоку и пространство между ее стенками и оболочкой засыпается наполнителем. Размеры опоки выбирают с таким расчетом, чтобы максимальная толщина слоя не превышала 15—20 мм. Готовую форму прокаливают (алюминиевые сплавы до $150-350^{\circ}\text{C}$, латуни до $600-700^{\circ}\text{C}$) и в нее заливается расплавленный металл (алюминиевые сплавы — $690-740^{\circ}\text{C}$, латуни — $950-1050^{\circ}\text{C}$). После остывания отливки огнеупорный материал удаляется и волноводные корпуса отделяют от стояка.

Волноводные корпуса со сложным криволинейным профилем каналов целесообразно получать литьем по

выплавляемым моделям с применением гипсовых или карбамидных стержней. Стержень устанавливают в пресс-форму и запрессовывают модельным составом.

Гипсовые стержни изготовляют из смеси следующего состава:

гипс высокопрочный . . .	50%
песок кварцевый . . .	40%
антофиллит-асбест . . .	10%
вода	35—40% от веса сухой смеси
известь негашеная	
кальциевая	2—5% от веса воды

Приготавливая исходную смесь, компоненты размельчают и вводят в заранее готовый раствор извести в воде сухие компоненты каждый отдельно в указанном порядке при непрерывном перемешивании.

Гипсовые стержни формуются в стержневом ящике. При проектировании стержневых ящиков необходимо учитывать, что объем смеси для изготовления гипсовых стержней при отвердевании увеличивается, а при прокаливании уменьшается. Эти объемные изменения связаны с природой гипса. Порошкообразный гипс полугидрат ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), разведенный водой, переходит в дигидрат ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), а при прокаливании — в безводную соль (CaSO_4). Суммарная усадка составляет 1—2%. Стержневые ящики изготовляют из дюралюминия или стали. Рабочие размеры полости ящика выполняются по 3-му классу точности, чистота поверхности не ниже 8—9-го класса шероховатости.

Перед заполнением стержневого ящика гипсовой смесью его рабочая поверхность покрывается тонким слоем разделительной смазки (30% стеарина и 70% керосина) для облегчения удаления гипсовых стержней. Гипсовая смесь вводится в рабочую полость стержневого ящика шприцеванием. После 10—20 мин выдержки стержень извлекают, просушивают и устанавливают в пресс-форму. Дальнейший процесс получения литого волноводного корпуса ведется по схеме (рис. 2.3).

Удаление гипсовых стержней из полости готовых корпусов — наиболее трудоемкая операция. Для удаления стержней отливки кипятят в воде в течение 3—5 ч, потом легким постукиванием деревянного молотка о торцы отливок гипс выколачивается из канала.

Сложность удаления гипса из канала отливки волноводного корпуса обусловила применение при производстве волноводных корпусов с криволинейными каналами *карбомидных стержней*.

Карбомидные стержни изготавливают из технической мочевины (97%) и борной кислоты (3%). Смесь расплавляется при непрерывном перемешивании. Расплавы нагревают до 120—135°С и заливают в стержневой ящик, нагретый до 30—40°С. После образования затвердевшей корочки толщиной 3—5 мм жидкую часть мочевины сливают и стержни извлекают из ящика. Затем их устанавливают в охлажденную до 5—10°С пресс-форму, которая заливается парафино-стеариновой смесью. Карбомидный стержень удаляется из модели промывкой в проточной воде. Дальнейший процесс не отличается от рассмотренного ранее (см. рис. 2.3).

Отливки волноводных корпусов обязательно должны пройти отжиг для снятия внутренних напряжений, возникших при затвердевании металла, который ведется в защитно-восстановительной атмосфере.

Один из существенных недостатков точного литья по выплавляемым моделям — пористость. Для ее ликвидации возможна вакуумная пропитка отливок лаком КФ-95 ГОСТ 8018—56. Это обеспечивает высокую герметичность литых волноводных корпусов.

Волноводные корпуса изготавливают литьем под давлением. Этим методом можно изготовить сложные волноводные детали, например уголковые изгибы, тройники, двойные тройники. Наиболее перспективно использование литья под давлением для изготовления волноводов дециметрового диапазона, что связано с их относительно большими геометрическими размерами. В табл. 2.11 приведена сравнительная характеристика методов изготовления волноводного тройника и уголкового изгиба дециметрового диапазона.

Изучение токонесущих поверхностей волноводных корпусов, полученных литьем под давлением, показало, что может быть достигнута чистота, соответствующая требованиям 7—10-го класса. Однако необходимо учитывать возможность образования специфических дефектов — следов поверхностного слоя (так называемого «мороза»), образующихся при течении металла по стенкам холодной формы или при турбулентном течении металла. Это при общей высокой чистоте поверхности при-

Таблица 2.11

Наименование узла	Трудоемкость, ч			Технологиче- ский цикл, ч			Трудоемкость изготовления оснастки, ч		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Тройник	12	10	4	38	77	11	500	5600	3000
Угловой изгиб	10	8	2	30	77	8	400	4000	2000

Наименование узла	Достигаемая точность			Чистота токоисущей поверхности		
	1	2	3	1	2	3
Тройник	±0,1—±0,05	±0,05	±0,05	6	7	6
Угловой изгиб	±0,1—±0,05	±0,05	±0,05	6	7	6

Примечание. 1 — пачка; 2 — гальванопластика; 3 — литье под давлением.

водит к образованию на отливке отдельных участков с пониженной чистотой.

Для уменьшения в литых волноводах количества пор и раковин применяется литье под давлением с вакуумированием сплава и полости литейной формы.

§ 2.3. ИЗГОТОВЛЕНИЕ КОРПУСОВ ХОЛОДНЫМ ВЫДАВЛИВАНИЕМ

Сущность метода холодного выдавливания заключается в том, что под действием усилия, приложенного к инструменту, в заготовке возникает напряженное состояние, в результате которого деформируемый металл, доведенный до высокой пластичности, интенсивно течет в незамкнутую полость штампа.

В этот метод входят два способа выдавливания: а) прямое и б) обратное. При прямом выдавливании направление истечения металла заготовки совпадает с направлением перемещения пуансона, при обратном — противоположно ему.

В производстве деталей волноводов широко распространено обратное выдавливание, позволяющее получать детали с более сложной конфигурацией полостей. Оно применяется для изготовления деталей волноводов, имеющих прямоугольные, Н и П-образное поперечные сечения канала.

Методом холодного выдавливания изготавливают дета-

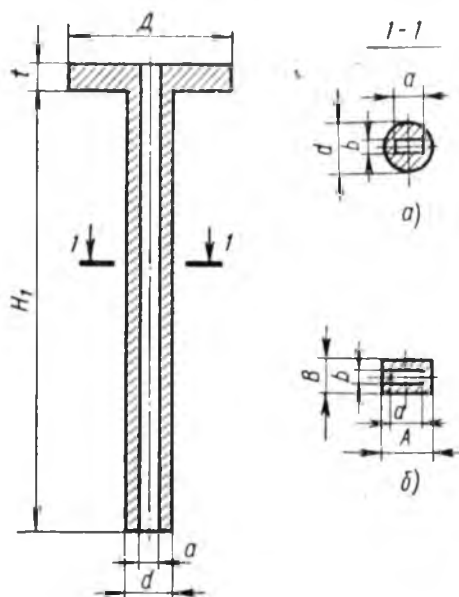


Рис. 2.4. Деталь волноводного корпуса, изготовленная методом холодного выдавливания

ли волноводов в серийном и крупносерийном производстве. Этот цикл длится не более 1,5 мин, после чего детали механически обрабатывают. Холодное выдавливание обеспечивает:

1) идентичность деталей волноводов, так как их конфигурация формируется одним инструментом;

2) высокую чистоту поверхностей (9—10 класс по ГОСТ 2789—59).

При больших партиях выпускаемых деталей волноводов наиболее перспективен метод холодного выдавливания.

При повторяющейся номенклатуре он экономичен и для изготовления небольших партий.

На рис. 2.4, а, б показана изготовленная методом холодного выдавливания волноводная труба с одним фланцем. Для такой конфигурации заготовку можно выбрать так, чтобы отходы при последующей обработке были минимальны. Также частично устраняется возможность деформации канала волновода в процессе сборки с фланцами.

Выбор диаметра и толщины фланца зависит от нормалей. Поскольку диаметр исходной заготовки обычно

выбирают равным диаметру фланца, то для получения детали той или иной конфигурации методом холодного выдавливания необходимо предварительно рассчитать один из важнейших параметров — степень деформации φ , величина которого зависит от формы и размеров сечения волновода. Значение степени деформации, которая характеризует протекание процесса холодного выдавливания, влияет на величину и плотность зерен металла детали волновода, характер течения металла и качество изготавливаемых деталей. Она определяется в зависимости от соотношения площадей исходной заготовки F_0 и поперечного сечения выдавливаемой детали F :

$$\varphi = \frac{F_0 - F}{F_0} \cdot 100.$$

Для алюминия, меди и серебра степень деформации φ не должна превышать 95%, для латуней Л62 и Л96 — 70 и 90% соответственно. Уменьшить степень деформации можно изменением формы поперечного сечения деталей волноводов — заменой внешнего прямоугольного контура круговым (см. рис. 2.4) или увеличением толщины стенок.

При холодном выдавливании деталей волноводов в качестве исходной используются заготовки цилиндрической формы.

Размеры исходной заготовки определяют по объему изготавливаемой детали. Поскольку диаметр заготовки зависит от размеров фланца, то объем детали определит высоту заготовки (объемы заготовки и детали равны).

В качестве материала заготовки используются медь или алюминий. Оба металла в отожженном состоянии (табл. 2.12) обладают высокой пластичностью и малым удельным сопротивлением.

Таблица 2.12

Материал заготовки	Марка	$\sigma_{0.2}$, кг/мм ²	$\sigma_{0.5}$, кг/мм ²	δ , %	H_b
Медь	M1	21—23	9,2	47,5	35
Алюминий	A00	8,9—9,1	4,3	38	20

В исходной цилиндрической заготовке должно быть получено центрально расположенное отверстие, форма и

размеры которого соответствуют форме и размерам канала волновода изготавливаемой детали. Заготовку получают вырубкой.

Конструктивная особенность вырубного штампа заключается в том, что на режущей кромке матрицы имеется скос под углом 45° на глубину 1 мм при вырубке заготовок толщиной не более 15 мм и на глубину 2 мм при вырубке заготовок толщиной от 15 до 20 мм. Кроме того, заготовка вырубается при уменьшенных зазорах между пуансоном и матрицей, равных 0,05 мм при вырубке заготовок толщиной от 10 мм и 0,1 мм — от 10 до 20 мм. Вырубной штамп такой конструкции позволяет получить боковую поверхность вырубаемой заготовки высокой чистоты.

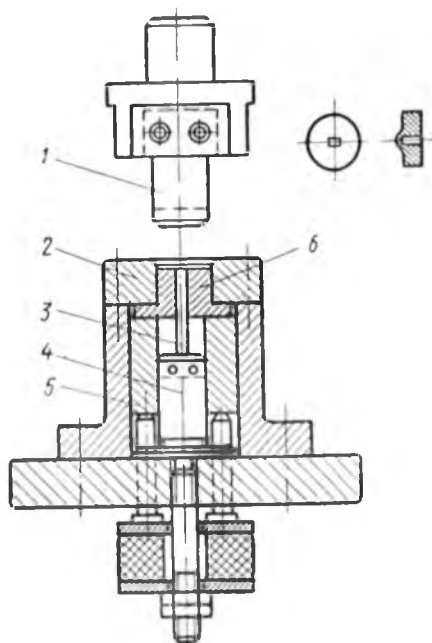


Рис. 2.5. Штамп для прокалывания отверстия в заготовке

Особое внимание следует обращать на обеспечение высокой точности и чистоты стенок центрального отверстия, так как это определяет точность и чистоту поверхности канала волновода изготавливаемой детали. Для получения центральных отверстий используется прокалывание заготовки в специальном штампе (рис. 2.5).

При этом в отличие от пробивки процесс не заканчивается отделением отхода от заготовки. На противоположной стороне заготовки образуется наплыв избыточного металла, который снимается последующим чистовым фрезерованием. При прокалывании отверстия заготовка помещается в шаблон 2, который одновременно

служит направлением для направляющей 6 прокладываемого пуансона 3, закрепленного в пуансонодержателе 4. При опускании ползуна пресса верхний пуансон 1 через заготовку передает давление на направляющую 6, утапливая ее вместе с заготовкой внутрь штампа, втулка 5 опускается, сжимая выталкиватель штампа. Одновременно пуансон 3 прокалывает отверстие в заготовке, причем избыточный металл поступает в прорезь, выполненную в торце пуансона 1. При обратном ходе ползуна этот пуансон поднимается, а выталкиватель возвращает в исходное положение всю подвижную систему нижней части штампа, а одновременно и заготовку.

Операция прокалывания центрального отверстия ведется с обильной смазкой заготовки и рабочей части штампа машинным маслом. При конструировании штампа и его изготовлении следует обратить внимание на обеспечение соосности прокалывающего пуансона 3 и контура отверстия в шаблоне 2.

Для снятия внутренних напряжений после прокалывания производится термообработка. Медные заготовки отжигаются либо в защитной, либо в нейтральной среде, алюминиевые — на воздухе.

Получение деталей волновода холодным выдавливанием ведется по схеме обратного выдавливания. Это упрощает конструкцию штампа и облегчает удаление деталей из него после выдавливания. Схема обратного выдавливания детали волновода с прямолинейным каналом дана на рис. 2.6. Предварительно смазанная исходная заготовка укладывается в полость А разъемной матрицы 1, состоящей из двух частей, таким образом, что формующий вкладыш 2 входит в центральное отверстие заготовки. При опускании ползуна пресса пуансон-

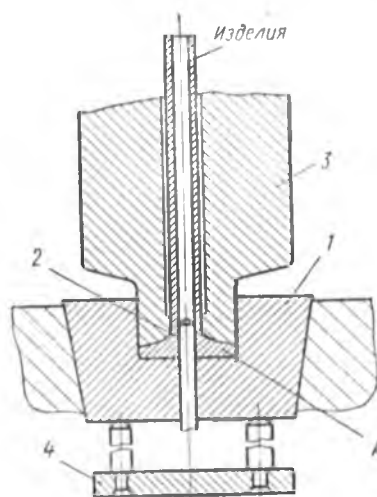


Рис. 2.6. Схема процесса обратного выдавливания деталей волновода с прямолинейным каналом

матрица 3 выдавливает деталь, при этом полость ее формируется вкладышем 2.

По окончании процесса выдавливания (момент окончания фиксируется упорами) и подъеме пуансона 3 деталь волновода остается в матрице из-за значительного сцепления стенок канала с формирующим вкладышем 2. Включением нижнего выталкивателя 4 разъемная мат-

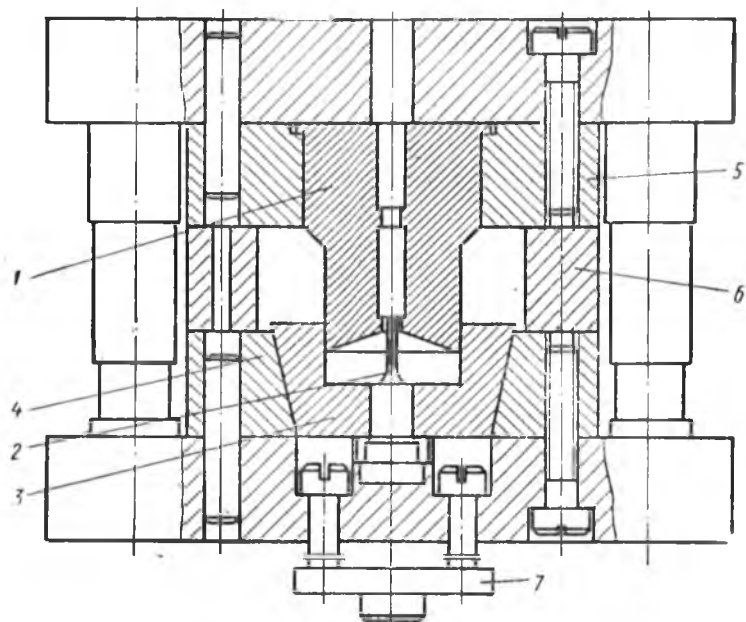


Рис. 2.7. Штмп для холодного выдавливания деталей волновода

рица 1 поднимается и одновременно готовое изделие снимается с формирующего вкладыша 2.

Штмп для холодного выдавливания деталей волноводов с прямолинейным каналом показан на рис. 2.7. Блок штмпа состоит из массивных верхней и нижней плит, двух направляющих колонок и втулок. В пакет штмпа входят постоянные детали (нижняя 4 и верхняя 5 обоймы) и сменные (пуансон-матрица 1; формирующий вкладыш 2, матрица 3 и упоры 6). В процессе работы детали выталкивателя 7 соединяются с нижним выталкивателем гидравлического 100-тонного пресса.

В связи с необходимостью получения заготовок, к точности размеров и чистоте внутренней поверхности которых предъявляются жесткие требования, а также вследствие возникновения высоких рабочих давлений, особое внимание необходимо уделить разработке конструкции и изготовлению рабочих элементов и штампа в целом.

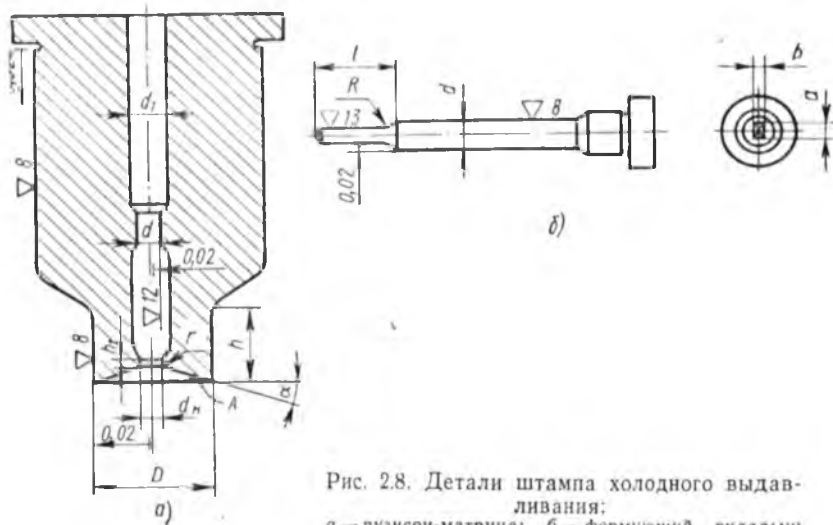


Рис. 2.8. Детали штампа холодного выдавливания:
а — пуансон-матрица; б — формующий вкладыш

Основными рабочими элементами штампа являются пуансон-матрица (рис. 2.8, а) и формующий вкладыш (рис. 2.8, б). Пуансон-матрица передает рабочее усилие прессы на заготовку, непосредственно участвуя в деформации заготовки. Поскольку истечение металла происходит в полость пуансона-матрицы, входное отверстие должно быть выполнено строго концентрично конусной поверхности с основанием D . То же относится к направляющей шейке, предназначенной для предупреждения искривления волноводной части в процессе выдавливания. Диаметр направляющей шейки d на $0,02 + 0,03$ мм больше диаметра d_n формующего пояска. Высоту пояска h_1 можно принять равной 1,5—2 мм.

Поверхности конуса A и формующего пояска B должны обрабатываться особенно тщательно, это облегчает истечение металла при выдавливании.

Пуансон-матрица, воспринимающая осевое усилие, равное рабочему, изготавливается из высоколегированных сталей марок ХВГ или Х12М. Термообработка, включающая закалку и отпуск, должна обеспечить твердость HRC 56—58.

Формующий вкладыш (рис. 2.8, б) обеспечивает формирование полости волновода, поэтому к нему также предъявляются жесткие требования.

Особое внимание следует уделить центричности расположения формующей части вкладыша и отделке ее поверхности на длине l . Значительные радиальные усилия на поверхности формующей части вкладыша приводят к тому, что оптимальную длину l можно выбрать окончательно только после проведения поверочных расчетов на прочность. Для увеличения прочности формующей части выполняется плавный переход с радиусом $R=3\div 4$ мм к цилиндрической части. В связи с этим необходимо предусмотреть припуск по толщине фланца для последующего удаления его части с конусным отверстием.

Формующий вкладыш можно изготовить из сталей марок ХВГ; Х12М с последующей термообработкой до твердости HRC 56—58.

Получение деталей волноводов методом холодного выдавливания осложняется не только большим значением величин относительных деформаций, но и необходимостью получения изделий с отношением высоты к диаметру порядка 20 и более. Это способствует возрастанию рабочих давлений и тем самым росту нагрузки на рабочие детали штампа. Для уменьшения растягивающих усилий, действующих на формующую часть вкладыша, заготовку, рабочие части пуансона-матрицы и вкладыша смазывают, используя животные жиры.

Методом холодного выдавливания получают детали волноводов не только прямолинейные, но и с криволинейным каналом. При этом истечение металла происходит в криволинейный канал пуансона-матрицы (рис. 2.9), которая делается разъемной для облегчения извлечения детали.

Процесс характеризуется тем, что по его окончании пуансон-матрица вместе с изогнутым волноводом остается в нижней части штампа. Нижний толкатель 4 поднимает разъемную матрицу 1, формующий вкладыш 2 выходит из канала заготовки 5, после чего осуществляется

разъем матрицы 1, пуансона-матрицы 3 и изделие удаляется.

Этот метод применяется только для серийного производства, в связи с нерентабельностью изготовления малых партий волноводов из-за высокой стоимости инструментально-штамповой оснастки.

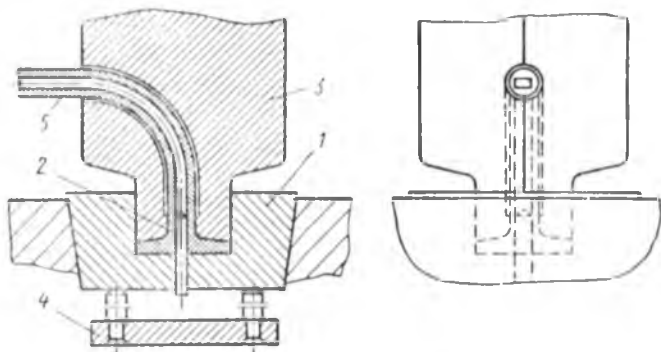


Рис. 2.9. Схема процесса обратного выдавливания волноводных деталей с криволинейным каналом

При больших партиях он обеспечивает рост производительности труда, снижение трудоемкости изделий, уменьшение необходимой оснастки и инструмента.

§ 2.4. ИЗГОТОВЛЕНИЕ КОРПУСОВ НАРАЩИВАНИЕМ МЕТАЛЛА

Метод гальванопластики или изготовления корпусов применяется недавно. Сущность его заключается в электролитическом осаждении слоя металла на оправку, которая по окончании процесса удаляется из готовой детали.

Метод может быть осуществлен двумя способами: а) наращиванием корпусов на неразрушаемых (возвратных) формах; б) на разрушаемых (невозвратных) формах.

К материалу неразрушаемых форм предъявляются следующие требования: а) высокая коррозионная стойкость; б) хорошая обрабатываемость; в) малая сила сцепления с гальваническим осадком; г) износостой-

чивость при многократных съемах изделия; д) низкая себестоимость.

Неразрушаемые формы изготавливаются как из неметаллических материалов (стекло, пластмассы, кварц, поливинилхлорид), так и из металлов (хромоникелевые стали марок X18H9T и X18H9, хромистые нержавеющие стали 4X13, 1X13, 2X13, 3X13, ЭИ-474, стали 10, 45, У7, У8, 9ХС, титановые сплавы, например ИМП-1, сплавы типа инвар и т. д.). Так как поверхности формы должны точно воспроизводить внутреннюю поверхность изготавливаемых волноводных корпусов, то при изготовлении формы необходимо обеспечить точность размеров в пределах 2-го класса и чистоту поверхности не ниже $\nabla 10$.

При конструировании форм нужно учитывать низкое качество гальванического осадка на ребрах формы. Причиной низкой плотности осадка на углах является то, что при точном прямом углу, напряженность электрического поля в его вершине равна нулю. Следует заметить прямой угол на угол с малым радиусом скругления. Таким путем можно избежать расслоения без применения последующей пропайки волноводных корпусов по граням. Скругления незначительно влияют на электрические параметры полученного устройства. Особенно, если отношение длины волны к радиусу закругления велико.

Практика показала, что хорошее качество осадка в углах волноводных корпусов будет получено при величине радиуса закругления, приблизительно равной толщине наращиваемой стенки.

При разработке конструкции формы кроме указанных требований необходимо учитывать и рентабельность технологического процесса.

В зависимости от конфигурации корпуса используют неразъемные и разъемные (состоящие из нескольких частей) неразрушаемые формы.

Неразъемные применяются в том случае, если их можно удалить за счет конусности или постоянства поперечного сечения по всей длине волноводного корпуса.

Разъемные формы необходимы, если наращенный волноводный корпус нельзя снять сразу со всей оправки.

Неразрушаемые формы применяются в тех случаях, когда конфигурация волноводного корпуса позволяет удалить оправку целиком или по частям без нарушения

формы и размеров снятого узла и формы. Примером использования неразъемных форм является изготовление волноводного плавного изгиба (рис. 2.10; 2.11; и 2.12), а разъемных — изготовление методом гальванического наращивания двойных тройников (рис. 2.13). Сложность изготовления разъемных форм заключается в том, что надо обеспечить с большой точностью взаимную перпендикулярность и правильную ориентацию всех деталей формы.

Разъемные формы собираются в приспособлении, которое должно быть простым, надежным в эксплуатации и обеспечивать крепление деталей форм, а также контакт между токопроводящими деталями приспособления и формы.

В приспособлении необходимо предусмотреть элементы, предохраняющие нерабочие части формы от воздействия электролита, для облегчения последующего удаления частей формы из наращенного волноводного корпу-

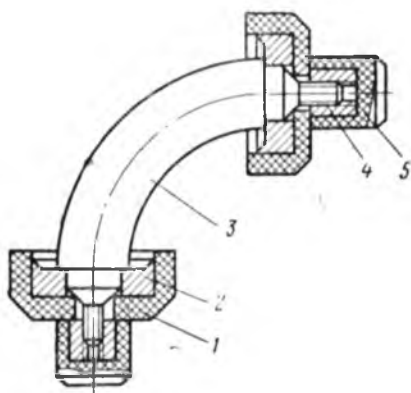


Рис. 2.10. Неразъемная форма для наращивания плавного волноводного изгиба:

1 — обойма фланца; 2 — фланец; 3 — форма; 4 — гайка; 5 — обойма гайки

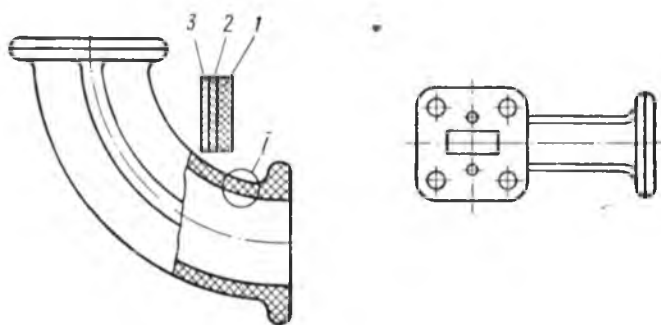


Рис. 2.11. Плавный волноводный изгиб:

1 — пресс-материал ЛГ-4В; 2 — медное покрытие; 3 — серебряное покрытие

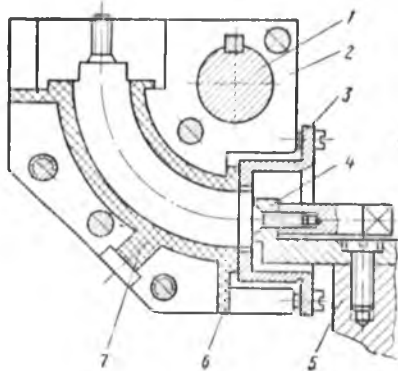


Рис. 2.12. Приспособление для извлечения формы из плавного волноводного изгиба:

1 — вал приспособления; 2 — полу-
формы; 3 — упорный винт; 4 — дер-
жатель формы; 5 — основание; 6 —
выпор; 7 — литник

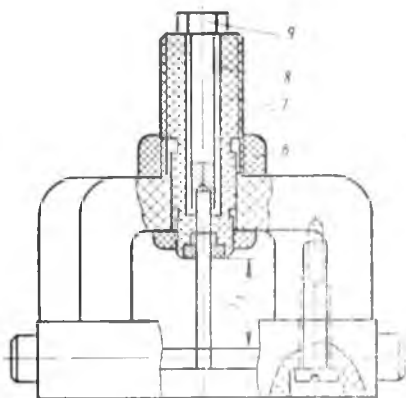
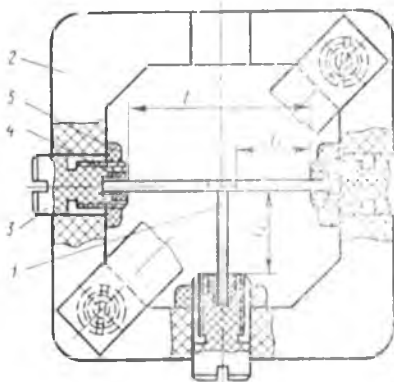


Рис. 2.13. Оправка для наращи-
вания двойного волноводного
тройника и приспособление для
ее закрепления



са. Для этого применяют колпачки из винипласта или фторопласта. Щели между формой и колпачками заливаются лаком, изготовленным на основе сухой смолы ПХВ, растворенной в смеси ацетона и толуола с добавкой метиловой синьки.

Рассмотрим в качестве примера приспособление, в котором крепятся оправки для наращивания двойного волноводного тройника (рис. 2.13). Основой приспособления является жесткий корпус 2, детали которого изготовляются из текстолита. Эта конструкция позволяет надежно закрепить форму для наращивания, состоящую из трех частей, предварительно тщательно взаимно подогнанных. Детали формы крепятся друг относительно друга с помощью штифтов. Положение формы относительно центра регулируется перемещением эбонитовых винтов 3, 7 и с помощью гаек 6. Контактный узел приспособления состоит из втулки 8, положение которой при сборке приспособления регулируется гайками 5 и 6, латунного контакта 9, являющегося промежуточным звеном между токоподводящей шиной (условно не показана) и оправкой 1. Токоподводящая шина навертывается на резьбу втулки 8 до плотного и надежного соприкосновения с головкой контакта. Для предотвращения попадания электролита в выточки гаек 3 и 7 и предохранения торцов оправки от наращивания медью в эти выточки запрессованы фторопластовые шайбы 4. Они упруги и имеют высокую стойкость к различным агрессивным электролитам, плотно облегают концы оправки, одновременно определяя габаритные размеры наращиваемой заготовки.

После установки в приспособление и обезжиривания формы в этиловом спирте производится операция наращивания. Наносимый гальванический осадок должен быть плотным, однородным на всей поверхности формы, мелкокристаллическим, механически прочным и обладать малым электрическим сопротивлением.

Для получения токонесущей поверхности волновода на оправку гальванически наращивается серебро, которое затем покрывается медью. Наращивание меди производится в колодцевых ваннах с перемешиванием и непрерывной фильтрацией электролитов при вращении катодной и анодной штанг со скоростью 10 об/мин.

В табл. 2.13 приведены составы часто применяемых электролитов меднения и режимы их осаждения.

Таблица 2.13

Состав ванны	Концентрация, г/л	Режим наращивания	
		Плотность тока, а/д.м. ²	Температура, °С
Пирофосфатный электролит Медь металлическая (в виде $\text{Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7$) $\text{K}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ Лимонная кислота NH_3 PH	40 404 10 3 8	1,5—2	60 ± 1
Этилдиаминный электролит $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ Этилендиамин $(\text{NH}_3)_2\text{SO}_4$ PH	250 125 60 8,5	2	20 ± 1
Сернокислый электролит $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ H_2SO_4	250 50	1,5—2	20 ± 1

В табл. 2.14 приведены физико-механические свойства осадков, полученных из данных электролитов.

Таблица 2.14

Электролит	$\sigma_{\text{из}}, \text{кг/мм}^2$	$\sigma_{0,05}, \text{кг/мм}^2$	$\delta, \%$	$H_{\text{в}}, \text{кг/мм}^2$	$E, \text{кг/мм}^2$	$\alpha_1, \text{град}^{-1}$
Пирофосфатный	28—36	18	3—6	75—95	$9,4 \cdot 10^5$ $1,16 \cdot 10^6$	—
Этилдиаминный	20—25	13	3—7	55—75	$1,08 \cdot 10^6$	$13,8 \cdot 10^{-6}$
Сернокислый	14—22	11	2—6	52—70	$1,29 \cdot 10^6$	—
Техническая медь (мягкая)	24	2—2	50	35	$1,23 \cdot 10^6$	$16,2 \cdot 10^{-6}$ $16,7 \cdot 10^{-6}$

Наиболее часто применяется пирофосфатный электролит. В последнее время его вытесняет кремнефтористый электролит, позволяющий вести наращивание волноводных корпусов при повышенных плотностях тока, что значительно снижает время наращивания (в 6—7 раз по сравнению с сернокислым электролитом).

Электролит состоит из кремнефтористоводородных меди CuSiF_6 — 280—300 г/л и кислоты H_2SiF_6 — 10—12 г/л.

Температура электролита не должна превышать 20—25°С, ее повышение увеличивает количество кристаллов в осадке, вызывает дендритообразование и усиливает гидролиз кремнефтористоводородной кислоты с выделением коллоидной кремниевой кислоты.

Для предотвращения дендритообразования начальная плотность тока должна составлять не более 2 а/дм² в течение первых четырех часов. Затем постепенно повышают плотность тока до 10—12 а/дм². Для того чтобы избежать повышения температуры при работе с большой плотностью тока, ванна должна быть оборудована холодильной установкой. Обычно это змеевик с проточной холодной водой.

Время наращивания зависит от требуемой толщины. Для 2—4 миллиметрового покрытия оно лежит в пределах 25—40 ч. Аноды навешиваются в бязевых чехлах. Соотношение катодной и анодной поверхности 1:3. Оправки должны загружаться на электролиз под током.

Перед повторным навешиванием оправки производят ее травление в течение 3 сек в азотной кислоте с последующей промывкой в холодной воде, которое необходимо для удаления пленки окислов с поверхности осадка.

Удаление неразрушаемых оправок из наращенного волноводного корпуса производится одним из следующих способов.

Если оправка изготовлена из нержавеющей стали или титановых сплавов, в результате плохого сцепления покрытия с этими металлами производится поверхностное отделение. При этом снятие волноводных корпусов с форм осуществляется на ручном приспособлении или гидравлическом прессе (рис. 2.12, 2.14) не позднее, чем через 24 ч после наращивания.

Если форма разъемная, то ее отделяют по частям, в зависимости от конструкции. При извлечении форм используются приспособления, чтобы обеспечить направление движения формы.

Когда оправка изготовлена из инвара, а волноводный корпус — из меди или серебра, разница коэффициентов теплового расширения формы и осадка достаточно велика, что позволяет при нагревании корпуса удалить фор-

му с малыми усилиями и без деформаций. Нагревание применяется и для удаления форм из нержавеющей стали. Для миллиметрового диапазона волновые корпуса настолько малы, что использование разницы коэффициентов теплового расширения малоэффективно.

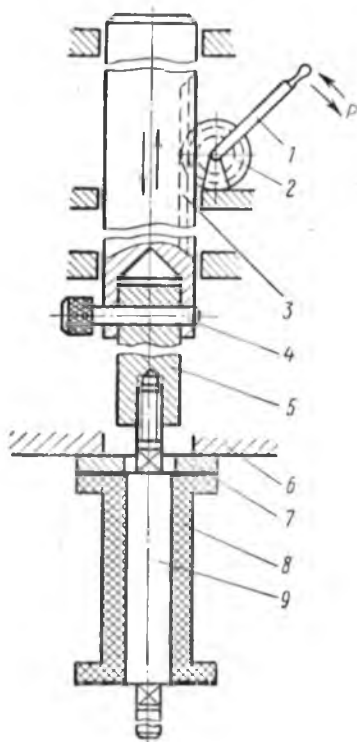


Рис. 2.14. Схема приспособления для извлечения прямолинейных форм:

1 — рукоятка; 2 — шестерня; 3 — подвижная рейка; 4 — штифт; 5 — гайка; 6 — упорная плита; 7 — упорная пластина; 8 — корпус волновода; 9 — форма

Для облегчения удаления форм из волноводов малого сечения используется напыление первоначального слоя металла на форму с последующим гальваническим серебрением и меднением. Для этого обезжиренные в бензине формы обрабатывают в ацетоне ультразвуком в течение 10—15 мин при частоте 20 кГц, после чего покрывают серебром в течение 10—15 мин катодным распылением, которое производится в атмосфере аргона при давлении 10^{-2} мм рт. ст., напряжении 1500 в и плотности тока $0,2$ ма/см². Расстояние между электродами устанавливается равным 10 см. Толщина напыляемого слоя лежит в пределах 0,15—0,20 мкм.

После напыления толщина слоя серебра увеличивается до 3—5 мкм в цинковом электролите, затем производится меднение.

Напыление первоначального слоя серебра на форму позволяет облегчить удаление формы из волноводного корпуса ввиду малой адгезии

покрытия к металлу формы и получить высокое качество токонесущей поверхности.

С помощью возвратных форм можно получить волноводные корпуса по 2-му классу точности. Основной при-

чиной их неточности (помимо неточности формы) является сжатие корпуса в момент извлечения оправки. Чистота токонесущей поверхности корпуса несколько ниже чистоты поверхности формы за счет появления микрошероховатостей в процессе извлечения (примерно на один класс).

Там, где геометрия изготавливаемых волноводных корпусов не допускает изъятия оправок, применяются разрушаемые (невозвратные) формы. Они изготавливаются в основном из алюминия марок АО и АОО и его сплавов (например, Д16, Д7) или церробенда. Удаление их производится вытравливанием или выплавлением. Если для изготовления формы используются алюминиевые сплавы, то для их растворения используют щелочи (например, NaOH).

При изготовлении волноводов миллиметрового диапазона скорость травления мала (вследствие малой поверхности взаимодействия и трудности удаления отходов растворения), а время на выполнение процесса велико. Длительная выдержка токонесущей поверхности в щелочи приводит к образованию на ней раковин, что вызывает ухудшение электрических параметров волноводного корпуса и его брак. Так, при концентрации едкого натра 150—200 г/л и температуре раствора 90—100°С растворивание канала волновода составляет 0,14 мм/ч при длительности процесса 15—20 ч.

Уменьшение растворивания достигается использованием пустотелых оправок. При этом процесс травления идет относительно равномерно. Скорость растворения оправки можно увеличить повышением температуры щелочи до 150—250°С. Применение для форм сплавов алюминия, содержащих медь, ускоряет процесс растворения.

При использовании для изготовления разрушаемых форм сплавов, имеющих низкую температуру плавления, точность размеров и чистота токонесущей поверхности волноводных корпусов ниже, чем у корпусов, полученных на формах из алюминиевых сплавов.

Применение невозвратных форм из легкоплавких сплавов затруднительно из-за сложности полного удаления сплава из полученного волноводного корпуса.

В качестве материала для невозвратной формы используют воск. Для того чтобы поверхность восковой формы была токопроводящей, ее покрывают тонким слоем химически осажденного серебра.

Качество волноводного корпуса, изготовленного электролитическим наращиванием, зависит от точности модели и плотности тока при осаждении: чем ниже плотность тока, тем плотнее осадок и меньше внутренние напряжения. В зависимости от площади покрываемой поверхности и требуемой толщины осадка процесс осаждения продолжается от нескольких часов до нескольких суток: обеспечивая высокую точность геометрических размеров,

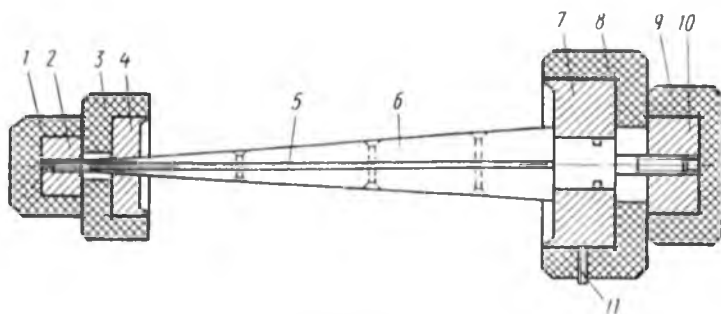


Рис. 2.15. Форма для гальванического наращивания волноводного корпуса:

1, 9 — ободы затяжных гаек (из диэлектрика); 2, 10 — затяжные гайки; 3, 8 — ободы оправок, формирующих фланцы; 4, 7 — оправки, формирующие фланцы; 5, 6 — тело оправки, формирующее канал волновода; 11 — контакт

чистоту токонесущей поверхности. Метод электролитического наращивания позволяет получить волноводные устройства с хорошими электрическими характеристиками. Однако их прочностные характеристики (вибропрочность, прочность на изгиб и т. д.) очень низкие.

Для устранения этого недостатка применяется *последующая заливка* полученных волноводных корпусов эпоксидными смолами или *опрессовывание пресс-материалами*. Процесс заключается в следующем. На форму производят наращивание осадка — вначале серебра, затем меди. Изменяя плотность тока, добиваются, чтобы внешняя поверхность полученного волноводного корпуса была шероховатой. Это необходимо для улучшения сцепления эпоксидной смолы или пресс-материала с осажденным металлом. Затем на поверхность корпуса, полученного электроосаждением, наносят слой БФ-4 и высушивают при комнатной температуре. Он является промежуточным слоем между металлом покрытия и эпок-

сидной смолой или пресс-материалами и необходим для лучшего сцепления между ними.

Обработанный таким образом корпус опрессовывается пресс-материалом в пресс-форме или заливается эпоксидным компаундом. После отверждения диэлектрика изделие извлекают из пресс-формы, удаляют из него форму, на которую производилось гальваническое наращивание, и производят механическую обработку внешней поверхности корпуса (обрубка литника, сверление крепежных отверстий и т. д.).

Для опрессовывания волноводных корпусов широко применяется материал АГ-4В.

Прямым прессованием можно получить жесткие волноводные корпуса, у которых отношение высоты канала к ширине меньшей стенки равно 1—1,5. В этих случаях фланцевая оправка (рис. 2.15) служит опорой. Толщина слоя металла на поверхности формы должна быть не менее 0,8 мм. Наличие дендритов на поверхности осадка может привести к его разрыву в процессе опрессовки.

Для получения волноводов сложной конфигурации или малых сечений используется литьевое прессование в съемных формах при температуре 150—160°С.

Величину посадочного размера A пресс-формы (рис. 2.16) можно найти из выражения

$$A = B - (\delta + 2\Delta - \delta_1) K_1,$$

где B — номинальный размер оправки; δ — допуск на

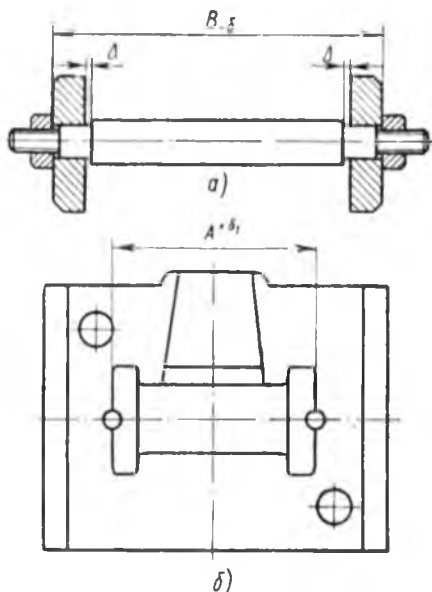


Рис. 2.16. Сопрягаемые размеры формы (а) и пресс-формы (б)

изготовление оправки; Δ — допустимый максимальный зазор между фланцевой оправкой и торцем формы 0,04—0,05 мм, если толщина покрытия меньше 0,15 мм; во избежание прорыва слоя покрытия этот зазор делается равным 0,01—0,02 мм; δ_1 — допуск на изготовление пресс-формы; K_t — коэффициент, учитывающий ТКЛР оправки и формы, значения его даны в табл. 2.15.

Таблица 2.15

Длина, полностью, мм	20—30	30—40	40—50	50 и более
K_t	0,35	0,55	0,75	1

В процессе эксплуатации и при хранении волноводные корпуса, опрессовываемые АГ-4В, имеют тенденцию к некоторому уменьшению размеров. Искусственное старение позволяет стабилизировать эти размеры. Оно осуществляется прогревом корпусов непосредственно после опрессовки в пресс-форме до $130 \pm 5^\circ \text{C}$ в течение 3—5 ч.

Достоинством волноводных корпусов такой конструкции является высокая механическая прочность и виброустойчивость. Недостаток обусловлен высоким ТКЛР пластмассы; это меняет геометрические размеры при изменении температуры, а следовательно, и электрические характеристики волноводных устройств, особенно работающих в миллиметровом диапазоне.

Для заливки волноводных корпусов применяется эпоксидная смола ЭД-6 с отвердителем МТГФА (метилтетрагидрофталевый ангидрид). Лучшая адгезия с эпоксидной смолой получается у поверхностей, покрытых железом. Поэтому после меднения можно покрывать поверхность осадка железом в железосульфатном электролите состава 420 г/л $\text{Fe}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 100 г/л $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ при плотности тока 2—8 а/дм² pH = 2,5—3,0, при комнатной температуре.

Если покрытие железом нецелесообразно из-за условий эксплуатации узла, то медный слой необходимо перед заливкой слегка протравить (в растворе 6,3 г FeCl_3 , 16 мл HNO_3 концентрированной, 200 мл H_2O) в течение 10—30 сек при комнатной температуре. Для заливки

применяется компаунд, состоящий из смолы ЭД-6, отвердителя ПЭПА (полиэтиленполиамины) и пластификатора — дибутилфталата. Корпуса, залитые эпоксидным компаундом с отвердителем МТГФА, необходимо прогреть при 140°C в течение 4 ч, а корпуса, залитые компаундом с отвердителем ПЭПА, после выдержки на воздухе в течение 1 ч необходимо прогреть 1—2 ч при 150°C . Такая термическая обработка улучшает механические свойства компаундов и стабилизирует размеры волновода.

При использовании волноводных корпусов этой конструкции можно изготавливать сложные волноводные устройства с относительно низкими затратами и хорошими электрическими и механическими характеристиками.

Изготовление волноводных корпусов гальваническим методом надо организовать на специализированном участке: специализация будет носить предметный характер, что даст большие преимущества, так как оборудование, применяемое для изготовления корпусов, универсально и может эксплуатироваться с высоким коэффициентом использования. Кроме того, выполнение производственного цикла на одном участке дает возможность непрерывности производственного процесса, уменьшает транспортные расходы, сокращает время изготовления деталей, повышает специализацию при механической обработке и упрощает планирование.

На участке можно изготавливать волноводные корпуса различной конструкции. Но так как длительность их изготовления сравнима, то это позволяет организовать поточные линии. На производственном участке выполняются следующие технологические процессы:

гальванические — серебрение, гальванопластическое наращивание меди в щелочных и кислых электролитах;

механические — сборка и разборка форм, слесарные, сверлильные, токарные и фрезерные работы с окончательной отделкой корпусов после опрессовки;

прочие — пайка мест стыка и линий сращивания перед опрессовкой, опрессовка термореактивными материалами.

Приведем данные для участка с годовой программой 50 000 корпусов. Участок спроектирован из расчета многономенклатурного и мелкосерийного изготовления корпусов:

Общая площадь участка	275 м ²
Производственная площадь	240 м ²
Общее число работающих	37 чел.
производственных рабочих	26 чел.
вспомогательных	6 чел.
ИТР	5 чел.
Металлорезающее оборудование	4 ед.
Гидравлические прессы	7 ед.
Гальванические ванны	17 ед.
Промывочные ванны	13 ед.

Время, необходимое для изготовления корпусов, определяется технологией изготовления и для корпусов различной сложности одинаково при равной толщине осаждаемого слоя металла. Количество выпускаемых деталей пропорционально количеству оправок и числу циклов обрабатываемости оправок. Его можно выразить следующей зависимостью:

$$N = kPnt,$$

где N — заданное количество деталей; n — количество оправок; t — календарная длительность планируемого периода (в месяцах); k — коэффициент, учитывающий неизбежные потери; P — количество съёмов готовых корпусов с одной оправки (в месяц).

Зная задаваемое число деталей и количество имеющихся форм, можно рассчитать необходимое время опережения запуска деталей в производство:

$$t = \frac{N}{kPn}.$$

Практически установлено, что форма выдерживает 300—400 съёмов.

Таблица 2.16

Показатели	Способ изготовления		Соотношение, %
	механический	гальвано-пластический	
Трудоемкость, н/ч	233,1	65,5	28
Количество людей, занятых на участке	121	37	30
Производственная площадь, м ²	800	275	34
Оборудование, ед.	50	41	82

При оснащении производства рекомендуется следующее соотношение количества форм и пресс-форм. За смену на одной пресс-форме можно получить 15—20 волноводных корпусов. Для каждой пресс-формы надо иметь не более 30—40 форм. Если их изготовить большее количество, то они не выработают технического ресурса, так как изделие быстрее снимают с производства, чем изнашивается оправка. Для экономической оценки гальва-

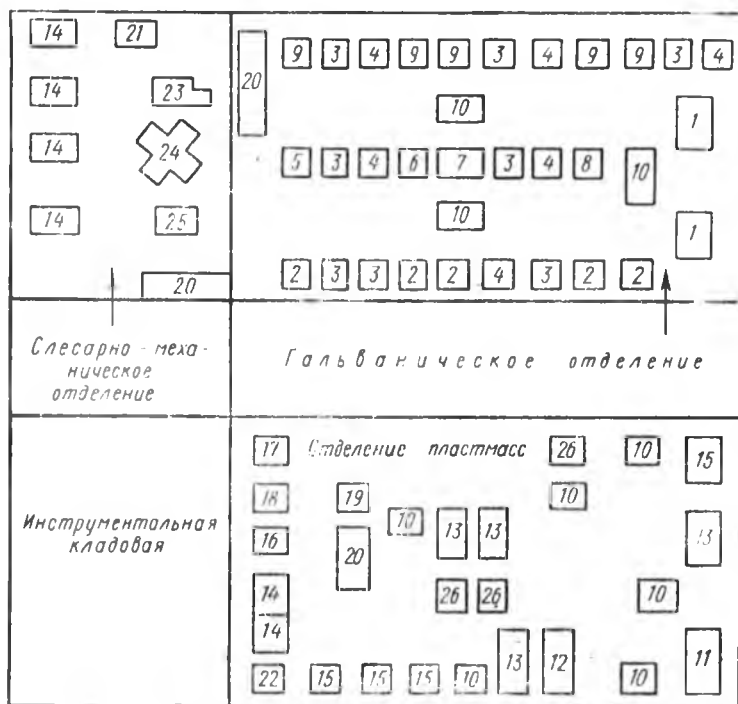


Рис. 2.17. Планировка участка для изготовления волноводных корпусов гальванопластическим методом с последующей опрессовкой:

1 — ванны кислого меднения; 2 — ванна пирофосфатного меднения; 3 — ванна холодной промывки; 4 — ванна горячей промывки; 5 — ванна серебрения; 6 — ванна предварительного меднения; 7 — ванна обезжиривания; 8, 9 — ванна этилендиаминового меднения; 10 — стол; 11, 12, 13 — пресс гидравлический; 14 — верстак слесарный; 15 — вертикально-сверлильный станок; 16 — станок для извлечения форм; 17, 18, 21 — термостаты; 19 — плита притирочная; 20 — стеллаж; 22 — станок для заточки сверл; 23 — токарный станок; 24 — универсально-фрезерный станок; 25 — проверочная плита; 26 — высокочастотная установка

нопластического метода приводится сравнительная табл. 2.16.

На рис. 2.17 дана ориентировочная планировка производственного участка для производства волноводных корпусов.

§ 2.5. КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСОВ СЛОЖНЫХ ВОЛНОВОДНЫХ УСТРОЙСТВ

Комбинированный метод изготовления корпусов волноводных устройств включает несколько способов: а) дополнительных деталей; б) получения разрушаемой формы в полуфабрикате корпуса; в) наращивание на комбинированную форму; г) формообразование корпуса с последующей металлизацией; д) металлизация возвратных форм распылением.

Способ дополнительных деталей применяется, когда невыгодно или невозможно изготовить весь корпус волноводного устройства гальваническим наращиванием, а другие методы не обеспечивают требуемой точности размеров. Примером может быть изготовление направленных отверстий миллиметрового диапазона, когда в общей стенке двух волноводов необходимо выполнить прецизионные отверстия связи наряду с обеспечением высокой точности каналов волноводов при их малых линейных размерах. Тогда отдельные детали волноводного корпуса изготавливаются механически и укрепляются в формах для наращивания. Далее процесс гальванического наращивания ведется обычным путем. Для направленного ответвителя предварительно изготавливается общая стенка. Электроникровым методом в ней получают отверстия связи требуемой точности. Затем эта стенка зажимается между деталями формы, служащими для формования связанных волноводных труб, и сборку загружают в ванну для гальванической металлизации. При необходимости поверхность деталей, вводимых дополнительно, можно легко обработать с высокой чистотой и покрыть серебром (рис. 2.18).

Способ получения разрушаемой формы в полуфабрикате корпуса применяется для производства плоских корпусов, таких, как гибридные кольца, разветвители и т. д., и состоит в следующем. На стальной плите из

латунной серебряной ленты выполняются вертикальные стенки корпуса. Их геометрия фиксируется оправками и прокладками. Нижний торец ленты должен плотно прилегать к поверхности плиты. Необходимо предусмотреть устройства, для натяжения ленты. Затем часть сборки, которая будет внутренней полостью волноводного корпуса, заливается парафином. Перед заливкой приспособление вместе с навитой лентой тщательно обезжиривается и нагревается до $60-70^{\circ}\text{C}$. Фиксирующие оправ-

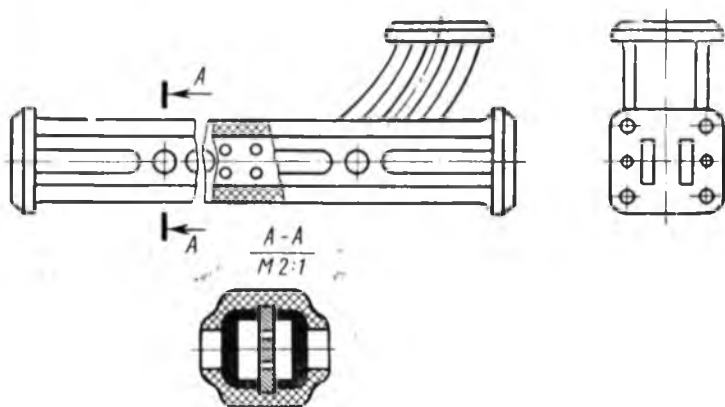


Рис. 2.18. Конструкция волноводного направленного ответвителя, полученного комбинированным методом

ки извлекаются после затвердевания парафина. Образовавшиеся полости заливаются дополнительно. После окончания заливки парафин снимается на глубину $1 \pm \pm 0,05 \text{ мм}$ от торца ленты специальным резцом при его базировке на торцах ленты.

В результате такой обработки поверхность парафина получается ровной и блестящей. Стружка удаляется холодным сжатым воздухом. На поверхность парафина наносится слой химически осажденного серебра, затем гальваническим путем осаждается серебро и медь. Толщина осадка составляет 1 мм . Для выплавления парафина волноводный корпус помещается в кипящую воду. Окончательная промывка ведется бензином, подогретым до температуры $40-50^{\circ}\text{C}$.

В практике применяется *наращивание* волноводных корпусов *на комбинированные формы*. Они применяются в том случае, если конфигурация волноводного корпуса не позволяет применить извлекаемые формы, а объем его полости слишком велик для использования растворимых форм.

Комбинированные формы изготавливаются из нескольких частей. Детали формы, которые после нанесения осадка растворяются, выполняют из алюминия, извлекаемые детали — из нержавеющей стали. Применение комбинированных форм позволяет снизить длительность цикла вытравливания и уменьшить стоимость корпуса за счет многократного использования деталей оправок. Примером использования комбинированных форм может служить изготовление гибридного кольца. Конфигурация его такая, что можно извлечь детали формы, оформляющие плечи кольца. Полость оформляется растворимой частью формы.

При способе *формообразования корпуса с последующей металлизацией* корпус волноводного устройства изготавливается из диэлектрика. В качестве конструкционного материала используют пластмассу (АГ-4) и керамику. Корпус волноводного устройства выполняется методами, характерными для данного материала. Затем осуществляют химическое меднение его поверхности, гальваническое меднение или серебрение.

Химическое меднение поверхности пластмасс будет рассмотрено в § 5.1. Рассмотрим процесс металлизации керамики. Металлизация вжиганием серебряных паст при производстве волноводных корпусов не рекомендуется, так как она трудоемка, требует специального оборудования и связана с большим расходом серебра при металлизации больших поверхностей.

Учитывая, что керамические волноводные корпуса производят малыми партиями, для металлизации целесообразно использовать химическое меднение токонесущих поверхностей. В этом случае предварительно проводят сенсibilлизацию поверхности керамики в растворе:

олово двухлористое	1 г
кислота соляная	4 мл
вода	96 мл
рН раствора 1,2, время вы-	
держки	2 мин.

Металлизация производится из следующего раствора:

раствор А	
медь углекислая	40 г
вода	1000 мл
раствор Б	
калий — натрий винный окислитель	80 г
натрий едкий	35 г
вода	1000 мл

Перед началом работы растворы смешивают в соотношении 1: 1. В смесь, нагретую до 40° С, вводят формалин из расчета 20 мл/л. Прочность сцепления осадков химически восстановленной меди с поверхностью керамики — 3—10 кг/см².

Кроме химического меднения поверхности керамики можно использовать ее химическое никелирование. При этом прочность сцепления осадка металла с поверхностью керамики возрастает в 2—3 раза по сравнению с медью.

После меднения или никелирования следует гальваническое серебрение поверхности корпуса.

Длительность производственного цикла гальванического наращивания волноводных корпусов и низкая производительность обусловили необходимость получения металлических покрытий другим путем, обеспечивающим более высокую производительность при одинаковых эксплуатационных параметрах корпусов. Для этого используют *металлизацию распылением*, при которой расплавленный металл распыляется струей газа (воздуха или аргона) на мелкие частицы, которые с высокой скоростью (100—150 м/сек) ударяются о металлизируемую поверхность и, сцепляясь с ней, образуют слой покрытия. Оно наносится на формы, аналогичные возвратным формам, которые используются при гальваническом наращивании волноводных корпусов. В качестве материала применяют нержавеющую сталь. Перед нанесением покрытия поверхность формы тщательно обезжиривается.

Распылением можно наносить цинк, сплав серебра и кадмия, сплав серебра и олова, латунь, медь, алюминий, никель и его сплавы, а также стали. При производстве волноводных корпусов используются многослойные покрытия. Первым наносится слой сплава серебра и кадмия, обладающий малым удельным сопротивлением. Толщина его составляет 0,25 мм. Затем, чтобы придать корпусу большую механическую прочность, его

покрывают латунью или сталью до требуемой толщины (до 3—5 мм).

Распыление сопровождается изменением структуры металла, его физических свойств и химического состава. Образующий при металлизации слой состоит из сцепленных друг с другом частиц металла, каждая из которых покрыта окисным слоем. Они сцепляются механически, сплавления или сваривания их не происходит. Поэтому покрытия отличаются пористостью, несколько пониженным (на 6—12%) по сравнению с исходным металлом удельным весом и повышенным удельным сопротивлением.

Для покрытий толщиной до 0,1 мм проводимость снижается в 8—10 раз. Для толстых покрытий удельное электрическое сопротивление составляет (в $\text{мком} \cdot \text{см}$): для меди 4,5, для алюминия 10, для латуни Л62 13,8. Для уменьшения удельного сопротивления токонесущих поверхностей предварительно наносят на форму гальваническим методом тонкий (2—3 мкм) слой серебра или создается защитная среда в зоне распыления. При этом частицы металла не окисляются и удельное сопротивление покрытия возрастает не более чем в 0,5—1,5 раза. Разбрызгивание ведется струей аргона или азота. Этот способ более прост и производителен, чем нанесение подслоя серебра гальваническим путем. Применение защитной среды целесообразно лишь на первом этапе нанесения покрытия — при получении слоя толщиной 3—5 мкм . Последующие слои, не являющиеся токонесущими, можно наносить по общей методике.

Полученные распылением покрытия имеют низкую механическую прочность. Сопротивление разрыву для них составляет лишь 25% прочности прокатанного металла. С такими механическими характеристиками не только эксплуатация, но и снятие с форм корпусов невозможно. Увеличение их механической прочности до 60% от номинальной достигается вакуумной пропиткой заготовки эпоксидной смолой. Пропитка ведется до снятия корпуса с оправки. Одновременно с повышением механической прочности она обеспечивает герметичность узла. При выборе пропиточного материала надо учитывать коэффициенты теплового расширения слоя покрытия. В табл. 2.17 приведены значения ТКЛР для покрытий, полученных распылением. После пропитки формы извлекаются с помощью пресса.

Металлизация распылением осуществляется специальными установками, в которых плавление распыляемого металла производится электрической дугой. Наиболее распространены аппараты, у которых металл для распыления применяется в виде проволоки.

Применяются также аппараты, работающие на металлических порошках. Характеристики наиболее распространенных металлизирующих аппаратов, использующих электрическую дугу для расплавления металла, приведены в табл. 2.18.

На рис. 2.19 схематически изображена распыляющая головка. Электрическая дуга образуется между двумя проволоочными электродами, которые под ее воздействием плавятся. Жидкий металл выбрасывается из сопла струей сжатого газа. По мере расплавления

Таблица 2.17

Исходный металл	10% ТКЛР покрытия, град-1
Алюминий	24,0
Латунь Л62	17,5
Бронза	16,5
Медь	14,0
Сталь низкоуглеродистая	12,0

Таблица 2.18

Характеристика	Аппараты			
	Ручные		Стационарные	
	ЛК-У	ЭМ-3А	ЛК-4	ЭМ-6
Вес без шланга, кг . . .	1,7	2,4	20	21
Диаметр применяемой проволоки, мм . . .	1,0—1,6	1—2	1,0—1,8	1,5—2,5
Электрический ток . . .	переменный	переменный	переменный	переменный и постоянный
Рабочее напряжение, в	20—35	20—35	20—35	25—40
Потребная мощность, кв	3—3,5	4—1,5	3—5	до 7
Рабочее давление сжатого газа, кг/см ² . . .	5—6	3,5—6	5—6	4—6
Расход газа, м ³ /мин . . .	1,2	0,8—1,2	1	0,8—0,9
Максимальная скорость подачи проволоки, м/мин . . .	—	2,5	—	4,5
Производительность, кг/ч	2	4	1	10

ния электроды подаются в головку механизмом подачи. Используя электроды, состоящие из отрезков проволоки различного состава, можно получить многослойные покрытия.

Расстояние от сопла до покрываемой поверхности при напылении меди и латуни должно составлять 150—200 мм.

Толщина покрытия регулируется числом проходов аппарата и скоростью его перемещения относительно металлизированной поверхности.

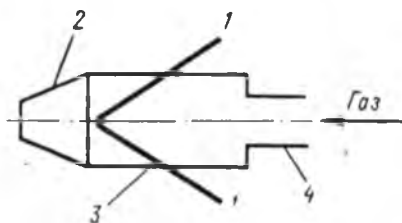


Рис. 2.19. Схема распылительной головки:

1 — проволочные электроды; 2 — керамический мундштук; 3 — корпус головки; 4 — газоподводящая магистраль

Точность размеров полости для волноводных корпусов, полученных методом распыления металла, лежит в пределах 3—4-го класса, а чистота токонесущей поверхности — 5—6-го класса.

Металлизация распылением — способ универсальный, не требующий высокой квалификации, характеризуется высокой производительностью. Так, металлизация волноводного корпуса средней сложности, предназначенного для работы на длине волны 3 см, занимает около 20—30 мин.

При разработке технологического процесса металлизации распылением необходимо учитывать, что процесс надо вести в вытяжном шкафу.

§ 2.6. ВЫБОР МЕТОДА ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСОВ

Вопрос оптимальности выбора метода изготовления корпусов волноводных устройств неразрывно связан с анализом их конструктивного решения. Эта связь обусловлена тем, что метод изготовления во многом определяется конструкцией корпуса волноводного устройства и, наоборот, конкретный метод изготовления накладывает ограничения на конструкцию. Так, если корпус волноводного устройства изготавливают пайкой или сваркой, он обязательно будет сборным; при изготовлении корпу-

са литьем у него появятся литейные радиусы, уклоны, ребра жесткости для обеспечения плоскостности поверхностей, может возрасти толщина стенок. При литье по выплавляемым моделям корпус будет цельным, под давлением — сборным, состоящим из двух половин. Применение гальванопластики или комбинированных методов изготовления предъявляет особые требования к конструкции корпуса волноводного устройства.

Поэтому при конструкторско-технологической разработке необходимо использовать обобщенные критерии, позволяющие анализировать и сравнивать варианты решений для создания конструкции и выбора метода изготовления. Критерием такой оценки может быть техническая эффективность, зависящая от надежности, качества, веса и себестоимости корпуса волноводного устройства.

В общем виде техническая эффективность представляет собой отношение затрат на производство годной продукции к затратам на производство всей продукции:

$$\mathcal{E} = \frac{\mathcal{E}_{\text{годной}}}{\mathcal{E}_{\text{всей}}}$$

Однако это выражение затрудняет учет таких факторов как надежность производственного процесса, качество, вес и себестоимость корпуса волноводного устройства при его разработке.

Для такой оценки можно использовать критерий эффективности, предложенный Р. К. Раскиным:

$$\mathcal{E} = H K_{\text{в}} K_{\text{т}} K_{\text{вз}},$$

где H — надежность производственного процесса изготовления волноводного устройства; $K_{\text{в}}$ — критерий веса корпуса волноводного устройства; $K_{\text{т}}$ — критерий технологической себестоимости изготовления корпуса волноводного устройства; $K_{\text{вз}}$ — критерий взаимозаменяемости.

Используя это выражение, можно при разработке оценить различные варианты решений, обратив основное внимание на критерии, играющие определяющую роль. Остальные критерии, которые для данного устройства не являются главными, принимаются равными единице.

Так, например, если разрабатывается волноводное устройство, основные требования к которому состоят в уменьшении веса, повышении надежности и уменьшении

себестоимости, то при расчете технической эффективности критерий взаимозаменяемости можно принять равным единице и т. д.

Рассмотрим структуру сомножителей, входящих в выражение эффективности. Под надежностью производственного процесса понимают способность процесса обеспечивать изготовление изделий в соответствии с предъявляемыми к ним требованиями, т. е. годных изделий:

$$H = H_{\text{вх}} H_{\text{т}} H_{\text{вых}},$$

где $H_{\text{вх}}$ — надежность входного контроля; $H_{\text{т}}$ — надежность технологического процесса; $H_{\text{вых}}$ — надежность выходного контроля.

При различных методах изготовления корпусов волноводных устройств надежность входного и выходного контроля можно принять неизменной. Определяющей будет надежность технологического процесса:

$$H_{\text{т}} = \prod_i^k H_i,$$

где H_i — надежность i -ой операции; k — общее количество операций.

Вероятность появления на выходе технологического цикла, состоящего из K операций m , дефектных изделий:

$$P_{1...k}(m) = \frac{\lambda^m}{m!} e^{-\lambda}.$$

Здесь λ — математическое ожидание или, в данном случае, среднее значение числа дефектов, возникающих при рассматриваемом процессе.

Вероятность появления брака на одном рабочем месте можно определить с помощью статистического контроля:

$$P_{\text{он}} = \lambda / K,$$

где λ — среднее количество дефектов, допускаемое на рабочем месте; K — количество операций, производимых на рабочем месте.

Значит надежность операции

$$H_{\text{оп}} = 1 - P_{\text{он}} = 1 - \lambda / K.$$

Сравнивать надежность технологического процесса можно как при изготовлении различных конструкций

корпусов волноводных устройств с помощью одного технологического процесса, так и при изготовлении различных конструктивных модификаций корпуса различными технологическими процессами. В первом случае рассматриваются значения надежностей «критических» операций, т. е. операций, надежность которых зависит от конструкции корпуса волноводного устройства. Во втором — сравнение надежности технологических процессов можно осуществить по надежности «критических» операций. Для формообразования число таких операций ограничено и вероятность брака одна и та же. Это дает возможность оценить надежность технологического процесса при данных условиях производства на основе предыдущих статистических исследований для конструкций одинаковой сложности.

Рассмотрим понятие критерия веса K_v корпуса волноводного устройства. Как уже отмечалось, для различных методов изготовления характерны разные конструктивные особенности корпусов волноводных устройств. Появление ребер жесткости при литье по выплавляемым моделям, фланцев для винтового соединения и крепежных винтов при изготовлении волноводного корпуса из двух половин литьем под давлением, толстого слоя диэлектрика, обеспечивающего механическую прочность корпуса при гальванопластическом методе изготовления, изменяет вес корпуса волноводного устройства в зависимости от способа изготовления. Технологические требования по совместимости материалов деталей конструкции заставляют иногда использовать материалы с удельным весом, отличным от минимально возможного.

Таким образом, различие методов изготовления и конструктивного оформления корпусов ведет к различию их в весе. Эти изменения веса учитываются его критерием, который определяется как отношение гипотетического (минимально возможного) веса корпуса волноводного устройства к его реальному весу. Минимальным весом можно считать вес корпусов устройства, выполненного из металла с минимальным удельным весом и толщиной стенок, обеспечивающей заданную механическую прочность, у которого отсутствуют особенности конструкции, обусловленные спецификой изготовления:

$$K_v = B_{\min} / B_{\text{реал}}$$

Чем ближе это отношение к единице, тем лучше у волноводного корпуса весовой критерий. Под критерием технологической себестоимости изготовления корпуса волноводного устройства K_T понимают величину, обратную технологической себестоимости C :

$$K_T = 1/C.$$

Технологическая себестоимость — это часть полной себестоимости, зависящая от варианта технологического процесса:

для единичной детали

$$C = a + b/N_{\text{год}};$$

для годовой программы

$$C_{N_{\text{год}}} = aN_{\text{год}} + b,$$

где a — текущие затраты на одну деталь; b — единовременные затраты на годовую программу; $N_{\text{год}}$ — годовая программа выпуска.

Величина $N_{\text{год}}$ обычно задана, а величины a и b определяются так:

$$a = m + l_{\text{н}} + P;$$

$$b = l_{\text{кз}} + ik,$$

где m — затраты на основные материалы и технологическое топливо (с учетом сумм, возвращенных предприятию при утилизации отходов материалов); $l_{\text{н}}$ — заработная плата производственных рабочих; $l_{\text{кз}}$ — заработная плата наладчиков оборудования; P — затраты, связанные с эксплуатацией оборудования нормальных приспособлений и инструмента; i — стоимость специального инструмента и оснастки, необходимых для выполнения годовой программы; k — коэффициент, учитывающий срок службы оснастки, а также расходы, связанные с эксплуатацией, включая ремонт оснастки.

Затраты на основные материалы определяются из выражения

$$m = C_m q_m - C_0 q_0,$$

где C_m и C_0 — стоимость единицы (кг , м^3) материала и отходов соответственно; q_m и q_0 — норма расхода мате-

риала на деталь и вес отходов на одну деталь соответственно.

Заработная плата производственным рабочим

$$I_{\text{п}} = \sum_0^n T_{\text{ш}} S,$$

где $T_{\text{ш}}$ — норма штучного времени, ч; S — тарифная ставка; n — число операций.

Заработная плата наладчиков оборудования

$$I_{\text{на}} = T_{\text{кр}} S r,$$

где $T_{\text{кр}}$ — норма подготовительно-заключительного времени (применительно к наладке), ч; r — число переналадок в год.

При сравнении конструктивных модификаций корпуса и технологических процессов уменьшение критерия технологической себестоимости говорит об ухудшении технической эффективности принятого конструкторско-технологического варианта.

Рассмотренные методы изготовления корпусов характеризуются определенными значениями достижимой точности размеров, формы и чистоты поверхностей, изготавливаемых деталей и сборочных единиц. Иногда эти показатели могут не совпадать с требованиями к точности размеров, формы и чистоте поверхностей корпуса волноводного устройства определенной конструкции. Тогда при этом процессе вероятность брака будет определяться технологическим процессом и конструкцией корпуса устройства. Для обеспечения соответствия параметров требованиям технических условий существует два пути — разбраковка и настройка. При изменении процента брака в результате различия технологических процессов и модификаций конструкции изменение технической эффективности учитывается критерием надежности. При использовании настройки или взаимного подбора, собираемых в тракт волноводных устройств, в случае отсутствия элементов настройки изменение технической эффективности учитывается критерием взаимозаменяемости. Время сборки и настройки таких устройств служит мерой оценки технической эффективности метода изготовления корпуса волноводного устройства. Критерий взаимозаменяемости определяется как отношение трудоемкости сборки и на-

стройки устройства с номинальными размерами, формой и чистотой поверхностей к трудоемкости сборки и на-
стройки реального волноводного корпуса:

$$K_{вз} = G_{идеал} / G_{реал}$$

Если конструкцию корпуса волноводного устройства нельзя изменить, то выбор технологического процесса осуществляют по критерию минимальной себестоимости. При этом сравнивается технологическая себестоимость волноводного корпуса при различных технологических процессах его изготовления.

§ 2.7. ВНУТРЕННЯЯ ОТДЕЛКА КОРПУСОВ

Электрические характеристики устройств СВЧ зависят от удельного сопротивления металла токонесущих поверхностей и их микрогеометрии.

Коррозия токонесущей поверхности ведет к появлению на ней диэлектрического (Al_2O_3), полупроводникового (Cu_2O) или проводящего слоя. Если продукт коррозии диэлектрик, то токи СВЧ текут под окисным слоем, если — полупроводник или проводник, часть тока течет в коррозионном слое, что вызовет рост активных потерь. Кроме того, коррозия может изменить микрогеометрию и микроструктуру поверхностного слоя, увеличить шероховатость токонесущей поверхности. Поэтому даже, если продукт коррозии диэлектрик, затухание растет.

Устойчивость к коррозии зависит от использования защитных покрытий или материалов, не поддающихся воздействию окружающей среды.

Покрытия делятся на проводящие и непроводящие. Проводящие покрытия — это гальванические осадки. Если толщина покрытия больше глубины проникновения, то оно становится токонесущим слоем и затухание зависит уже не от конструкционного материала стенок волновода, а от шероховатости поверхности осадка, его удельного сопротивления (которое является функцией структуры и пористости осадка) и рабочей частоты. При нанесении гальванических покрытий, если не приняты специальные меры, чистота поверхности ухудшается по сравнению с чистотой базового металла. В табл. 2.19 приведены коэффициенты приращения за-

тухания для некоторых покрытий, вызванного шероховатостью токонесущей поверхности.

Т а б л и ц а 2.19

Способ нанесения и тип покрытия	К
Меднение из кислых электролитов	1,625
Блестящее меднение	1,002
Серебрение из цианистых ванн	1,006
Блестящее серебрение	1,004

Структура осадков и их удельное сопротивление зависят от способа нанесения, режимов осаждения и составов ванн. Поэтому при изготовлении волноводов необходимо выбирать режим, при котором осадки имеют наименьшее удельное сопротивление. Коррозионная стойкость и устойчивость параметров осадков к воздействию окружающей среды определяются их пористостью. Основой повышения стойкости покрытий является уменьшение пористости, а ее величина определяется составом электролита и катодной плотностью тока. Скорость развития коррозии в порах зависит от режимов промывки. Пористость осадков появляется и при колебании катодной плотности тока, если электропитание осуществляется от нестабилизированного источника. Разброс расстояний между покрываемой поверхностью и анодом, глубины погружения в ванну ведет к разбросу пористости покрытий для партии устройств.

Наиболее широко применяется покрытие токонесущих поверхностей серебром из цианистых ванн, которое выполняет защитные функции, а также уменьшает активные потери. Цианистые электролиты имеют хорошую рассеивающую способность и высокое качество осадков. Однако у них есть существенные недостатки: они ядовиты, неустойчивы, малопродуктивны.

При покрытии серебром изделий из меди и ее сплавов их поверхность предварительно амальгамируется в растворе следующего состава (г/л):

ртуть двуххлористая $\text{HgCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	7—7,5
аммоний хлористый NH_4Cl	3—4
серебро хлористое AgCl	35—39
калий цианистый KCN	20—35

Колебание плотности тока ($0,2—0,5 \text{ а/дм}^2$) при гальваническом серебрении из цианистых электролитов и их температуры ($18—35^\circ \text{С}$) незначительно влияет на удельное сопротивление получаемых осадков.

При серебрении длинных волноводных трактов, для того чтобы обеспечить равномерность толщины покрытия на внутренней поверхности, используется принудительная циркуляция электролита сквозь волновод. При этом целесообразно периодически изменять направление

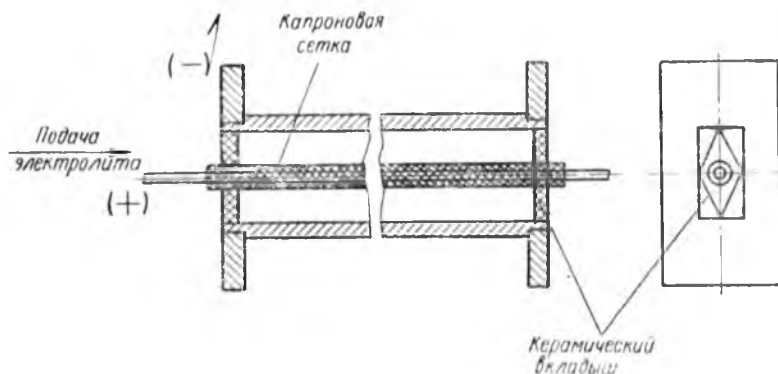


Рис. 2.20. Схема использования внутренних анодов при серебрении

движения электролита. Однако при серебрении с принудительной прокачкой электролита толщина покрытия по длине волновода неравномерна и качество его неодинаково. Так, для волноводов сечением $7,2 \times 3,4$, длиной 500 мм с одним изгибом при толщине покрытия у торцов 16—18 мкм в середине эта толщина составила 5—6 мкм при рыхлой и пористой структуре. В результате при такой технологии покрытия приходится увеличивать его толщину на краях волновода, чтобы в середине получить покрытие желаемой толщины. Это значительно удлинит технологический процесс изготовления волноводов и повышает их стоимость.

Хорошие результаты дает применение внутренних анодов (рис. 2.20), в качестве которых используются серебряная проволока диаметром не менее 0,8 мм. Дополнительный анод протягивается через волновод. На один из фланцев надевается заглушка со штуцером, позволяющим присоединить резиновый шланг насоса,

прокачивающего электролит. Другой фланец погружается в электролит. Корпус волновода соединяется с катодной штангой, а дополнительный анод — с анодной. Этим способом можно покрыть волноводы сечением не менее $7,2 \times 3,4$. При меньших размерах поперечного сечения серебряные покрытия получают химическим осаждением.

Для этого используют автокаталитическое осаждение серебра из цианистого раствора при ионно-адсорбционной подготовке поверхности. Катализатором процесса служит латунь стенок волноводного корпуса.

Технологический процесс состоит в следующем. Предварительно корпус обезжиривают в бензине и обрабатывают при температуре $18-20^\circ \text{C}$ в течение 5—10 сек в растворе следующего состава (г/л):

натрий едкий	30—50
натрий углекислый	20—30
тринатрийфосфат	50—70
жидкое стекло	10—15

Затем корпус декапируют в 5—7%-ном растворе цианистого калия при $18-20^\circ \text{C}$ в течение 5—7 мин и серебруют при температуре $18-20^\circ \text{C}$ в течение 2 ч в растворе следующего состава (в пересчете на металл), г/л:

цианистое серебро	3—6
цианистый калий	16—19,5
дистиллированная вода	—

При этом получается осадок серебра толщиной 5—7 мкм на всей поверхности волноводного корпуса. Процесс ведется при циркуляции электролита через канал волновода. Серебряный узел пассивируется в 1%-ном растворе бихромата калия.

Измерения, проведенные для серебряных латунных волноводов, показали, что величина затухания для них на $\lambda = 3 \text{ см}$ на 34% выше расчетной. Различие между теоретической и расчетной величинами затухания объясняется прежде всего пористостью и шероховатостью покрытия. Его можно уменьшить при использовании несимметрично выпрямленного тока или реверсирования тока, дающего более плотные и блестящие покрытия (рис. 2.21). Интенсифицировать процесс серебрения можно применением ультразвука. В связи с этим исключается предварительная операция амальгамирования, рабочие плотности тока могут быть повышены до

10—12 а/дм^2 , скорость осаждения увеличивается в 5—6 раз, осадки имеют высокую плотность.

При серебрении латунных волноводных корпусов, паянных мягкими припоями (ПОС-61, ПСр2, ПСр3, ПОС-40), принимают специальные меры для качественного покрытия швов. При рассмотренной технологии серебрения паяные швы не покрываются серебром, так как припой содержит большое количество олова и свинца — материалов, имеющих высокий электроотрицательный

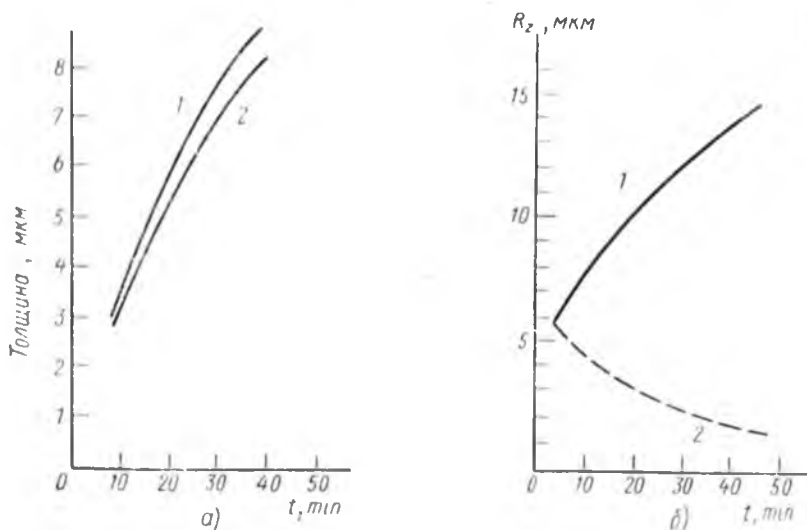


Рис. 2.21. Зависимость толщины (а) и высоты микронеровностей (б) серебряных осадков от времени осаждения:

1 — с реверсированием тока; 2 — без реверсирования тока

нормальный потенциал: $-0,14$ и $-0,13$ в соответственно. Это способствует контактному выделению серебра в местах паяных соединений. Поэтому покрытия имеют малую адгезию к базовому металлу и легко снимаются. Для качественного покрытия на покрываемый узел паносят подслон металла, ионы которого в момент электрокристаллизации имеют нормальный потенциал, близкий к потенциалу олова и свинца. Таким металлом является, например, медь. Меднение необходимо вести из электролитов на основе пиррофосфата и этилдиаминна.

В результате проходящего в них комплексобразования нормальный потенциал меди становится отрицатель-

ным (для пиррофосфатного электролита — 23 в). Использование серноокислых электролитов не дает положительных результатов — медь в них имеет электроположительный потенциал. Дальнейшее серебрение обычно производят в железосинеродистых электролитах. Для увеличения коррозионной стойкости покрытий и удаления остатков электролита из микропор в местах паяных соединений серебряные волноводные корпуса промывают в дистиллированной воде с наложением ультразвуковых колебаний.

Серебрение волноводных корпусов из алюминия и его сплавов имеет свою специфику. Наиболее серьезная трудность этого процесса заключается в том, что на поверхности алюминия и его сплавов образуется окисная пленка, которая после ее удаления стремится к регенерации. Кроме того, усложняют процесс серебрения высокий электроотрицательный потенциал и тенденция к контактному выделению металла на поверхности узла в момент погружения в электролит. Все это препятствует прочному сцеплению между покрытием и основным металлом.

Высокое качество серебряных покрытий достигается при предварительном нанесении на обезжиренную и протравленную поверхность алюминия слоя химически восстановленного никеля толщиной 10 мкм. С помощью этого можно получить равномерный по толщине и однородный по плотности осадок на всей поверхности волноводного корпуса.

Химическое никелирование ведется из кислых растворов при 91—96° С и pH = 4,3 — 4,1 следующего состава (г/л):

никель уксуснокислый	15
кальций гипофосфит	13

Оптимальная загрузка составляет 3—4 дм²/л, продолжительность процесса при этом 45—60 мин, толщина осадка 10—12 мкм. При химическом никелировании сварных волноводных корпусов необходима предварительная обработка в растворе цинката, так как иначе места сварки могут оказаться непокрытыми. Никелируемые трубы должны быть расположены в ванне вертикально, при этом улучшается перемешивание электролита пузырьками выделяющегося водорода и покрываемые поверхности не загрязняются шламом.

После никелирования осуществляют термообработку изделий при 220°C в течение 60 мин. При этом происходит диффузия никеля в алюминий на глубину 3—5 мкм.

Для закрытия пор никелевого покрытия на поверхность никеля наносится гальваническая медь. Ее использование обусловлено высокой плотностью гальванических медных осадков и относительно низкой их стоимостью. Поры могут быть закрыты и слоем серебра, но при этом его толщина должна быть значительной. Оно вызовет рост себестоимости корпуса. Гальваническое меднение ведется в ванне цианистого меднения, обладающей высокой рассеивающей способностью. Повышают плотность осадков применением ударно-импульсного постоянного тока при меднении. Режимы осаждения:

плотность тока	14—16 а/д.м. ²
длительность импульса	6 сек
длительность паузы	1 сек
выдержка под током	20—30 сек

Толщина покрытия при этом составляет 1,5—2,0 мкм. Затем проводят серебрение из цианистых электролитов по ранее рассмотренной технологии. Волноводные корпуса из алюминия и его сплавов выдерживают климатические воздействия и имеют затухание 0,18—0,2 дБ/м.

В процессе работы потери в серебряных волноводах заметно возрастают и могут достигнуть 200% от теоретической величины. Это объясняется тем, что продукты окисления серебра являются проводниками и вносят дополнительное затухание. Особенно окисляется серебро в присутствии сернистых соединений, образуя на поверхности сульфидную пленку.

Стойкость к воздействию сернистых соединений можно повысить обработкой серебряных покрытий в цианистых растворах каптакса. Серебряные волноводные корпуса выдерживают в течение 4—6 мин в растворе, содержащем 8—12 г/л меркаптобензотиазола (каптакса) и 80 г/л цианистого калия. Такая обработка, замедляя коррозию, не влияет на электрические потери при передаче СВЧ энергии.

Внутренние поверхности волноводных корпусов, полученные осаждением чистого серебра, имеют малую износоустойчивость, что затрудняет использование серебра

в устройствах СВЧ с механической перестройкой. Упрочнения токонесущего покрытия можно достигнуть применением электролитических сплавов на основе серебра, например сплава серебро — палладий (1—1,5%), имеющего износостойчивость в пять раз выше, чем у чистого серебра, и удельное сопротивление, близкое к сопротивлению серебра. Сплав устойчив к воздействию окружающей среды.

Иногда необходимо сохранить постоянство электрических параметров волноводных корпусов во времени, если величина активных потерь не имеет большого значения. Тогда используются покрытия, устойчивые к воздействию окружающей среды, обладающие относительно высоким удельным сопротивлением — никель, хром, палладий, кадмий, родий.

Таблица 2.20

Металл	Выход по току, %	Скорость осаждения, мк/ч						
		Катодная плотность тока, а/г.м ²						
		0,1	0,2	0,5	1	1,5	5	5
Серебро	100	—	8	19	38	57	—	
Палладий	90	—	3	7	15	22	—	
Родий	50	—	—	2	—	3,5	4	
Кадмий:								
из кислых ванн . .	95	—	—	—	23	—	46	115
из цианистых ванн	90	—	—	—	22	—	44	109
Медь:								
из кислых ванн . .	100	—	—	—	13	—	26	66
из цианистых ванн	60	—	—	—	16	—	32	79

В табл. 2.20 приведены значения скорости осаждения различных металлов в зависимости от режимов осаждения.

Если от волноводных корпусов требуется повышенная температурная стабильность, то их токонесущая поверхность покрывается сплавами с нулевым температурным коэффициентом сопротивления, например манганином.

Из диэлектрических защитных покрытий широко распространены лаковые пленки, предохраняющие токонесущую поверхность от воздействия окружающей среды. При использовании защитных лаковых пленок вносятся дополнительные потери энергии. Правильно выбрать покрытие можно только при учете его влияния на

электрические параметры волновода. Затухание, обусловленное наличием диэлектрической пленки на токонесущей поверхности прямоугольного волновода, рассчитываем из выражения

$$A = 37,5 \cdot 10^{-8} f \operatorname{tg} \delta \frac{[d/\epsilon + 6,57\epsilon b (d/a)^3]}{b \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}} \text{ дБ/м,}$$

где f — частота, гц ; λ — длина волны, м ; a, b — размеры широкой и узкой стенок волновода, м ; d — толщина диэлектрического покрытия, м ; ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика; $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь диэлектрика.

В табл. 2.21 приведены рекомендуемые способы защиты в зависимости от поперечных размеров латунных волноводов прямоугольного поперечного сечения и количества изгибов при серебрении контактных поверхностей фланцев.

Таблица 2.21

Характеристика волновода			Покрyтия	
Размеры поперечного сечения, мм	Длина, мм	Количество изгибов	Токонесущие	Защитные
От 7,2×3,4 до 11×5,5	До 500	0	Серебро	—
		1	»	Лак
		2	—	»
		3	—	»
		4	—	»
От 11×5,5 до 72×34	До 1000	0	Серебро	—
		1	»	—
		2	»	—
		3		Лак
		4		»

Использование лакового покрытия без предварительного серебрения в волноводах с несколькими изгибами объясняется сложностью получения серебряного покрытия равномерной толщины и высокой плотности. Лаковое покрытие должно отвечать следующим требованиям:

1) незначительно увеличивать активные потери в волноводе, т. е. иметь ϵ близкое к единице, и минималь-

ный $\lg \delta$ после климатических испытаний во всем рабочем диапазоне частот;

2) надежно сцепляться с покрываемой поверхностью;

3) не взаимодействовать химически с покрываемым материалом;

4) не изменять характеристик во времени и при климатическом воздействии.

Для покрытия токонесущих поверхностей волноводов используют лаки ВЛ-931, ЛЗВ-108, 976-1, СБ-1С, КПЭЦ, эмаль ЭП-74Т, фторопластовую эмульсию и т. д.

Характеристики этих материалов приведены в табл. 2.22.

Т а б л и ц а 2.22

Свойства лаков и эмалей	Лаки		Эмаль
	976-1	СБ-1С ТУ МХП 2785-54	ЭП-74Т СТУ ЯН 141-59
Удельное объемное сопротивление, $\text{ом}\cdot\text{см}$, сухого	10^{14}	$15 \cdot 10^{14}$	$4 \cdot 10^{15}$
После пребывания в камере влажности	10^{13}	10^{12}	$4,9 \cdot 10^{14}$
Тангенс угла потерь при 1 Гц:			
в нормальных условиях	0,005	0,02	0,026
при максимальной рабочей температуре . .	0,010	0,06	0,03
после 100 ч пребывания в условиях тропической влажности	0,012	0,02	0,028
Диэлектрическая постоянная при 1 Гц	3,9	3,4	3,2
в нормальных условиях			
при максимальной рабочей температуре	5,7	5	3,9
после 100 ч пребывания в условиях тропической влажности	4,3	2,6	4,5

Защитные диэлектрические пленки имеют различные свойства. Покрытие лаком ВЛ-931 при толщине лаковой пленки 0,02 мм не вызывает заметного роста затухания после климатических и механических воздействий. Например, для волновода 23×10 , выполненного из АОО, затухание не превышает 0,2 дБ/м, то же относится и к лаку КПЭЦ. Лак ЛЗВ-108 заметно увеличивает потери

(до 0,24 дб/м) после 14 суток пребывания в условиях тропической влажности и имеет тенденцию к растрескиванию. Лак 976-1 малотехнологичен и токсичен. Лак СБ-1С увеличивает потери от 0,2 до 0,24 дб/м после 30 суток пребывания в условиях тропической влажности и имеет низкую адгезию.

Лаки наносятся на очищенные металлические поверхности пульверизацией или заливкой полости обрабатываемых корпусов, после чего лак выливается из полости, а лаковая пленка на стенках корпуса высушивается при повышенной температуре (40—60° С). При этом корпус подвешивается, чтобы излишки лака могли стекать к выходу из рабочей полости. Толщина лаковой пленки зависит от вязкости лака. Количество слоев и вязкость лака подбирают экспериментально.

В качестве защитных покрытий используются также окисные пленки на основе защищаемых металлов. Они должны быть тонкими, механически прочными, плотными и непроводящими. Наиболее распространено фосфатное оксидирование алюминия и его сплавов и электрохимическое оксидирование серебряных покрытий.

Фосфатное оксидирование волноводов из алюминия и его сплавов проводят следующим образом.

После обезжиривания органическим растворителем, химического травления в растворе едкого натра (50—100 г/л при 50—60° С в течение 0,5—1 мин) и осветления в растворе азотной кислоты производят оксидирование в электролите следующего состава (г/л):

ортофосфорная кислота	40—50
хромовый ангидрид	5—7
плавиковая кислота	3—5
фтористый натрий	3—4

Режим работы — при температуре 18—20° С, время выдержки — 8—12 мин. Волноводы с таким покрытием выдерживают испытания при самых сложных климатических условиях. Однако затухание в них несколько увеличивается и составляет 0,29—0,34 дб/м. В табл. 2.23 приведены сравнительные данные по затуханию на $\lambda = 3$ см для различных способов защиты алюминиевых волноводов.

Материал волноводов и вид покрытия	Затухание, дБ/м
Сплав АМг без покрытия и защиты	0,2—0,21
Технически чистый алюминий АОО:	
без покрытия и защиты	0,19—0,26
с защитой лаком ВЛ-931	0,18—0,19
с фосфатным оксидированием	0,19—0,21
с серебрением поверхности и защитой лаком ВЛ-931	0,17—0,2

Изделия, покрытые серебром, оксидируются в электролите следующего состава (г/л):

натрий сернистый	25—30
натрий сернистоокислый	15—20
серная кислота	3—5
ацетон CH_3COCH_3	3—5

Температура раствора 18—25° С, анодная плотность тока 0,1—0,5 а/дм², время обработки 3—5 мин.

При оксидировании волновода необходимо применять внутренний катод для равномерности покрытия.

Волноводы с оксидированной поверхностью серебряного покрытия устойчивы к коррозии. Наличие оксидного слоя не вносит заметного увеличения потерь. Так, добротность полого резонатора после оксидирования при работе на $\lambda = 3$ см уменьшается всего на 0,3—0,5%.

Контроль качества защитных диэлектрических покрытий осложняется тем, что покрытие наносится на поверхности волноводного корпуса недоступные визуальной оценке. Поэтому его качество проверяется климатическими воздействиями и при хороших результатах параметры технологического процесса получения покрытий стабилизируются. Такая проверка кроме трудоемкости не гарантирует от брака, не позволяет создать регулируемый технологический процесс нанесения защитных покрытий и малооперативна.

Анализ механизма коррозии алюминия и его сплавов, защищенных оксидными пленками, структуры и свойств этих пленок позволил использовать простой и оперативный способ контроля их качества.

Коррозия алюминия в обычных атмосферных условиях имеет электрохимический механизм. При этом кор-

резонансные процессы развиваются в тонких пленках электролитов, возникающих на поверхности металла вследствие адсорбции или конденсации влаги и последующего растворения в ней газов (O_2 ; CO_2 ; SO_2 , NH_3), кислот и солей. Установлено, что на поверхности алюминия, покрытого окисной пленкой, существует три вида участков: анодные — поры; катодные — покрытые сплошной диэлектрической пленкой, тонкой и способной пропускать

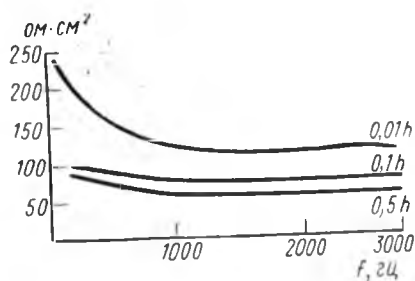


Рис. 2.22. Зависимость активного сопротивления окисного покрытия от частоты

электроны, и электрохимически инертные участки, т. е. такие, которые покрыты пленкой большой толщины, практически не пропускающей электронов и хорошо изолирующей поверхность металла. Волноводный корпус лучше защищен от коррозии, если большая часть его поверхности по-

крыта инертными участками окисной пленки. Следовательно, задачей контроля качества защищенной пленки является определение площади электрохимически активных участков. Для этого используется измерение активного и емкостного сопротивлений окисных пленок. Полость волноводного корпуса заполняется нейтральным токопроводящим раствором (например, раствором Na_2SO_4), в нее вводится дополнительный электрод. Мостовым методом измеряется емкость и активное сопротивление системы на различных частотах (от 100 до 5000 Гц) и постоянном токе. Исследования показали, что эквивалентной электрической схемой окисной пленки на поверхности алюминия является параллельное соединение активного сопротивления и емкости. Величина активного сопротивления определяется двумя компонентами — суммарным сопротивлением незащищенных участков поверхности (пор) и сопротивлением утечки катодных участков.

На рис. 2.22 даны кривые зависимости результирующего активного сопротивления от частоты при различных концентрациях раствора Na_2SO_4 . Взаимное смеще-

ние кривых обусловлено различным сопротивлением растворов.

Измерение активного сопротивления покрытий различного качества показывает, что во всех случаях с ростом площади электрохимически активных участков величина активного сопротивления пленки уменьшается.

Измерение емкости и сравнения полученных результатов с числом электрохимически активных участков на поверхности устройства показали определенную закономерность, а именно, чем больше число электрохимически

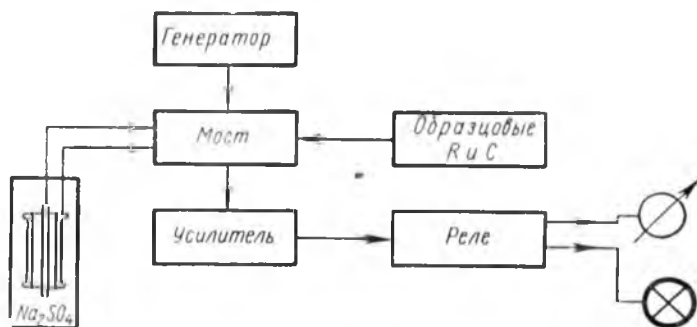


Рис. 2.23. Структурная схема измерения параметров покрытия

активных участков, тем выше емкость независимо от толщины окисной пленки на электрохимически инертных участках. Значит на величину емкости влияют катодные участки покрытия, а поры определяют лишь активную часть комплексного сопротивления пленки. Для алюминия с окисным покрытием качественные защитные пленки характеризуются удельной емкостью около 1 мкф/см^2 .

Таким образом, комплексное сопротивление защитного окисного покрытия позволяет судить о стабильности или изменении его качества. Если при измерении партии волноводных устройств обнаруживается, что при неизменной емкости меняется активное сопротивление, значит изменена пористость покрытия. При производственном контроле стабильности и воспроизводимости качества защитных окисных покрытий производят два замера на фиксированной частоте — активного сопротивления и емкости покрытия. Для упрощения процесса можно использовать структурную схему, показанную на рис. 2.23.

Контролируемый волноводный корпус с дополнительным электродом помещают в ванну с раствором Na_2SO_4 и включают в плечо измерительного моста. В другое плечо включены образцовые сопротивление или емкость. Их величина выбирается в зависимости от размеров волноводного корпуса, концентрации раствора Na_2SO_4 и требований к защитному покрытию. Мост питается от стабилизированного источника питания на частоте 1000 гц. Разбаланс с моста через усилитель подается на сигнальную обмотку реле. Если он не превышает заданных пределов, т. е. сигнал ниже напряжения срабатывания реле, то включен нуль-индикатор (сигнальная лампа), если превышает, то реле срабатывает и сигнал подается на измерительный прибор, шкала которого градуирована в значениях ΔR и ΔC . После проверки корпус поступает на промывку.

Высокая производительность способа позволяет вести стопроцентный контроль качества защитных покрытий. Это облегчает динамический контроль стабильности технологического процесса оксидирования или направленной корректировку его параметров.

Следует отметить, что рассмотренный способ контроля применяется не только для алюминиевых корпусов волноводных устройств, но и для корпусов, изготовленных из других материалов, защищенных диэлектрическими покрытиями.

Трудоемкость электролитического серебрения и оксидирования определяется длиной обрабатываемого волноводного корпуса и его конфигурацией. В табл. 2.24 и 2.25 приведены значения штучного времени для электрохимического серебрения и оксидирования. Это время учитывает весь комплекс работ по нанесению покрытий, исключая изоляцию непокрываемых мест.

Чистота токонесущей поверхности изменяется при нанесении на нее металлических покрытий или создании окисных пленок.

В табл. 2.26 приведены данные, характеризующие изменение чистоты поверхности после нанесения покрытий.

Чистоту токонесущей поверхности можно повысить *механическим полированием и химическим или электрохимическим полированием*. Для механического полирования используются фетровые полировальники или стальные шарики.

Таблица 2.24

Электролитическое серебрение								
Длина канала, мм, до	Прямые трубы			Изогнутые трубы с радиусом изгиба, мм, до				
				R=60		с двумя изгибами R=60		R=180
	Внутреннее сечение трубы a·b, мм, до:							
	23×10	28,5× ×12,6	72×34	23×10	28,5× ×12,6	72×34	28,5× ×12,6	28,5× ×12,6
Время на одну деталь, мин								
50	17	21	53	19	23	58	25	42
100	18	22	55	20	24	61	26	44
150	19	23	58	21	25	64	28	46
200	20	24	60	22	26	66	29	48
250	21	25	63	23	27	70	30	50
300	22	27	68	24	30	75	32	54
350	23	28	70	25	31	77	34	56
400	24	29	73	26	32	80	35	58
450	25	30	75	27	33	83	36	60
500	26	31	78	28	34	85	37	62
600	27	34	85	30	37	94	41	68
700	29	36	90	32	40	102	43	72
800	31	38	95	34	42	104	46	76
900	33	41	102	36	45	112	49	82
1000	35	43	108	39	47	118	52	84

Фетровый полировальник представляет собой вкладыш, размеры которого соответствуют размерам канала волновода. Он должен плотно входить в канал. Рабочие поверхности покрыты фетром. Для обработки фетровым полировальником используются только прямолинейные волноводные трубы. Полирование ведется с пастой. Полировальник вводится в волновод, на фланцы которого надеваются крышки со штуцерами, соединенными с золотниковой системой (рис. 2.24). От магистрали сжатого воздуха через золотниковую систему к крышкам попеременно подводится повышенное давление, приводящее в движение полировальник. Применяются конструкции полировальников с резиновыми или пружинными прокладками, обеспечивающими равномерный и постоянный прижим фетра по периметру к токонесущей поверхности.

Для полирования поверхности изогнутых и скрученных волноводных труб применяются стальные шарик.

Таблица 2.25

Электролитическое окислирование								
Длина клина, мм, до	Прямые трубы			Изогнутые трубы с радиусом изгиба, мм, до				
				$R=60$		с двумя изгибами $R=60$	$R=180$	
	Внутреннее сечение трубы $a \times b$, мм, до							
	23×10	28,5× 12,6	72×34	23×10	28,5× 12,6	72×34	28,5× 12,6	28,5× 12,6
Время на одну деталь, мин								
50	12,0	14,7	37,0	13,3	16,0	41,0	17,5	29,0
100	12,6	15,4	38,5	14,0	16,8	43,0	18,4	31,0
150	13,3	16,0	40,6	14,7	17,5	45,0	19,6	32,0
200	14,0	16,8	42,0	15,4	18,4	47,0	20,3	34,0
250	14,7	17,5	44,0	16,0	18,8	49,0	21,0	35,0
300	15,4	19,0	47,6	16,8	21,0	52,0	22,4	38,0
350	16,0	19,6	49,0	17,5	21,7	54,0	23,8	39,0
400	16,8	20,3	51,0	18,2	22,4	56,0	34,5	40,0
450	17,5	21,0	52,5	19,0	23,0	58,0	25,0	42,0
500	18,2	21,7	55,0	19,6	23,8	60,0	26,0	43,0
600	19,0	23,8	60,0	21,0	26,0	66,0	29,0	48,0
700	20,3	25,0	63,0	22,4	28,0	71,0	30,0	50,0
800	21,7	26,6	67,0	23,8	29,4	73,0	32,0	53,0
900	23,0	28,7	71,0	25,0	31,5	78,0	34,0	57,0
1000	24,5	30,0	75,0	27,3	33,0	83,0	36,0	59,0

Таблица 2.26

Вид покрытия	Классы чистоты поверхности	
	до нанесения покрытия	после нанесения покрытия
Серебрение блестящее	7—8	10
Серебрение матовое	5—6	6—7
Кадмирование	7—8	6—7
Фосфатирование	5—6	4—5
Окислирование	6—7	6

The drawing shows a mechanical assembly in cross-section. The main body consists of a central horizontal section (6) connected to two curved end sections (2). The end sections contain internal components labeled 3, 4, and 5. A central shaft or rod (7) passes through the assembly, with a vertical extension (8) at the bottom. A detailed view of a component labeled 9 is shown below the main assembly, illustrating its internal structure and movement, indicated by arrows.

1 — резиновые шланги; 2 — раздвижные фланцы; 3 — металлическая сетка; 4 — отверстия для выхода воздуха; 5 — полирующий вкладыш из плотного фетра; 6 — полируемый волновод; 7 — кран; 8 — воздушная магистраль; 9 — кинематическая схема переключения крана

В результате механического полирования чистота обрабатываемых поверхностей повышается на 1—2 класса, а при обработке стальными шариками происходит дополнительное уплотнение поверхностного слоя металла.

6-3867

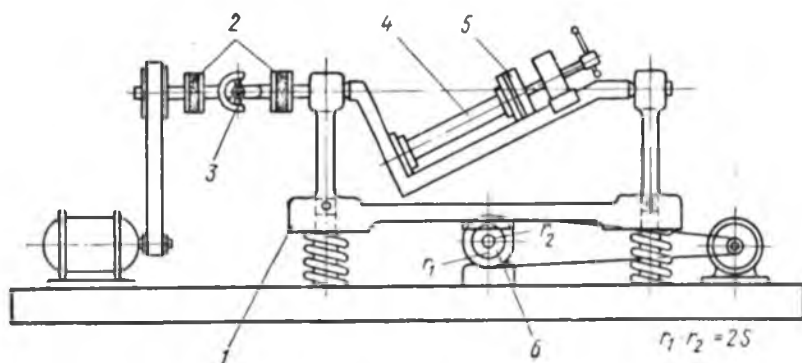


Рис. 2.25. Схема устройства для полирования токонесущих поверхностей стальными шариками:

1 — вибрационная платформа; 2 — гибкие муфты; 3 — карданное соединение;
4 — волновод; 5 — заглушка; 6 — эксцентрик

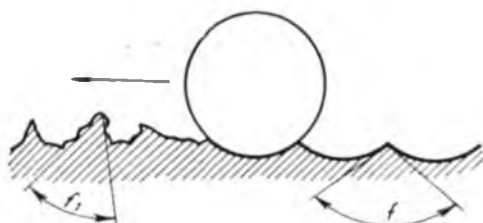


Рис. 2.26. Микропрофиль при обкатке токонесущей поверхности шариком

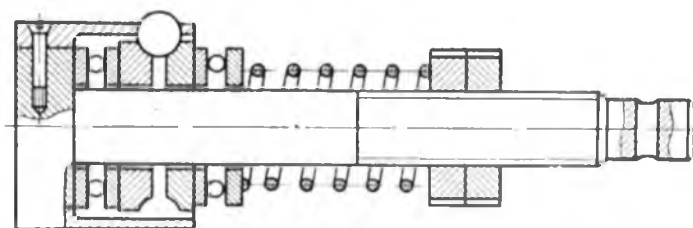
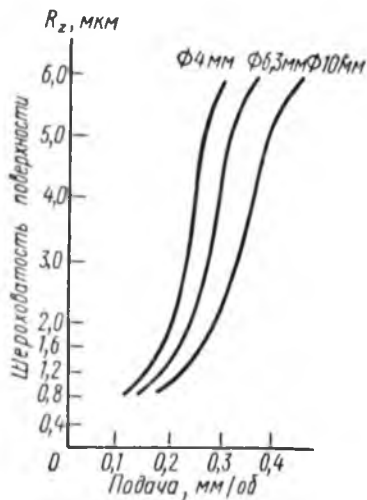
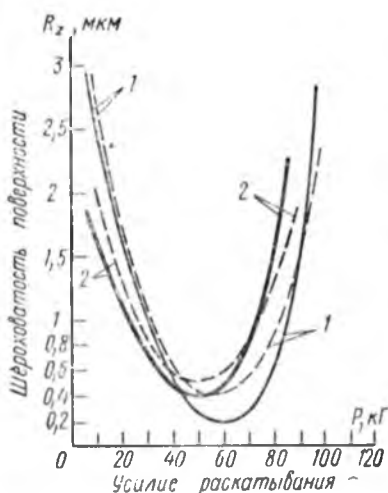


Рис. 2.27. Трехшариковый упругий раскатник

дорнования (раскатывание шариковыми раскатниками). Процесс основан на холодном пластическом деформировании поверхностного слоя металла вращающимися шарами, которые, катясь по обрабатываемой поверхности, сглаживают (сминают) ее микронеровности (рис. 2.26). Уменьшение затухания при данной обработке вызвано уменьшением высоты микронеровностей и ростом наиболее вероятного угла при их вершине.



Раскатка производится трехшариковыми упругими раскатниками (рис. 2.27). Оснащение их шариками вместо роликов дает возможность проводить обработку заготовок с относительно тонкими стенками. Площадь контакта шара с обрабатываемой поверхностью меньше, чем у ролика того же диаметра, следовательно, требуется меньшее давление для пластической деформации. Обработку ведут на токарно-винторезных станках при закреплении корпуса в патроне, а раскатника — в пиноли задней бабки или резцедержателе.

Одним из важнейших параметров, определяющих качество обрабатываемой поверхности, является усилие раскатывания. При недостаточном усилии не происходит деформации исходных микронеровностей, а чрезмерно большое давление может вызвать разрушение (шелушение) поверхностного слоя за счет перенаклепа. На рис. 2.28 показаны зависимости шероховатости поверхности, обработанной раскатыванием, от усилия раскатывания, полученные для числа оборотов $n=280$ об/мин, исходной чистоты поверхности $\nabla 5$,

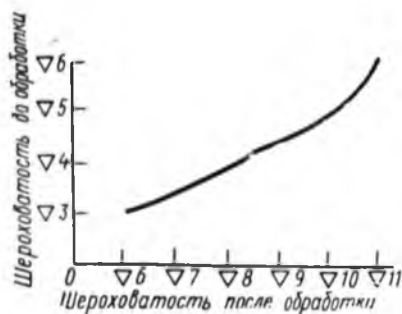


Рис. 2.30. Зависимость чистоты поверхности после обработки раскатыванием от исходной чистоты

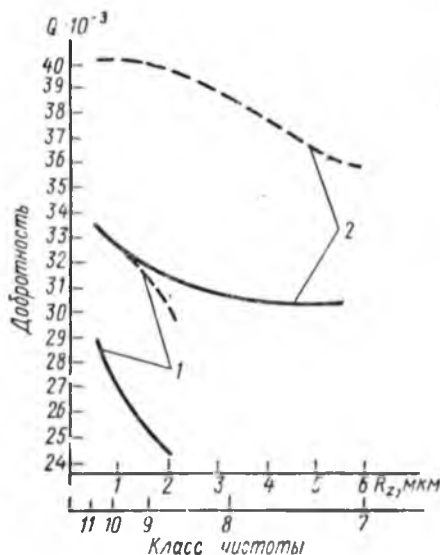


Рис. 2.31. Зависимость добротности полого резонатора от чистоты поверхности и способа обработки:

1 — полирование; 2 — раскатка; — — — сплав Д16; — — — латунь ЛС59-1 с покрытием серебром; $f=10\,000$ МГц, тип колебания H_{012} , L — диаметр резонатора 50 мм

диаметра обрабатываемой полости 50 мм, подачи 0,175. При необходимости нанесения гальванических покрытий на токонесущую поверхность оптимальные результаты получаются, если операцию раскрывания проводить после нанесения покрытия.

Подача также влияет на чистоту обрабатываемой поверхности. На рис. 2.29 дана зависимость шероховатости поверхности от величины подачи при раскатывании дюралюминия Д16, число оборотов $n=280$ об/мин, исход-

ная чистота поверхности $\nabla 5$, диаметр обрабатываемой полости 50 мм, усилие 30 кГ.

Чистота, достигаемая в результате раскатывания, определяется чистотой исходной поверхности (рис. 2.30).

Процесс раскатывания обуславливает изменение размера заготовки в направлении деформации за счет заполнения впадин микрорельефа металлом выступов. Форма полости остается неизменной.

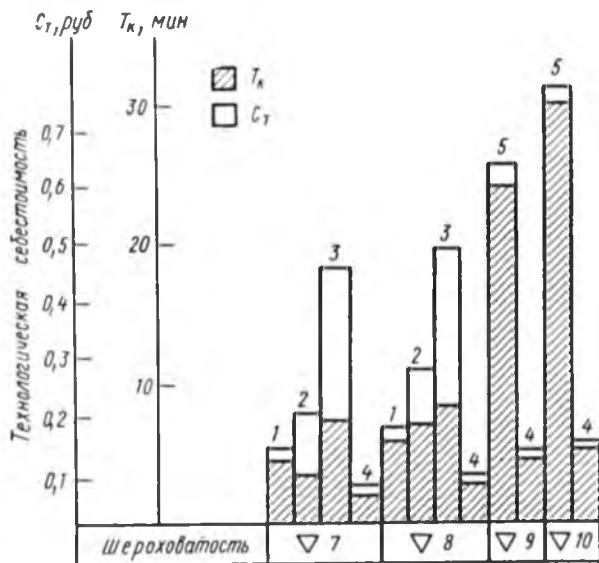


Рис. 2.32. Диаграмма сравнительной технологической себестоимости ($C_{\text{т}}$) и штучно-калькуляционного времени (T) на обработку волноводных полостей различными способами:

1 — растачиванием; 2 — развертыванием; 3 — шлифованием; 4 — раскатыванием; 5 — суперфиниш

На рис. 2.31 даны экспериментально полученные кривые, характеризующие зависимость добротности полого резонатора от чистоты токонесущей поверхности и способа ее обработки. Из графиков видно, что при полировании (аналогично шлифованию, суперфинишированию, хонингованию) с уменьшением класса чистоты добротность резко падает. При обработке раскатыванием кривые более пологи, т. е. при достижении требуемой доб-

ротности процесс менее критичен к стабильности режимов обработки. Различие в ходе кривых объясняется тем, что при обработке раскатыванием наиболее вероятный угол при вершине микронеровностей велик и изменяется незначительно с ростом их высоты. При других способах углы при вершине микронеровностей малы и коэффициент шероховатости зависит от их высоты.

Высокая эффективность применения чистовой обработки раскатыванием определяется не только эксплуатационными, но и экономическими показателями.

На рис. 2.32 дана диаграмма сравнительной технологической себестоимости и штучно-калькуляционного времени на обработку полостей различными способами.

Штучное время на пневматическое полирование токонесущей поверхности волноводных корпусов фетровым полировальником показано в табл. 2.27, а стальными шариками — в табл. 2.28.

Таблица 2.27

Характер поверхности	Длина трубы, м. до	Прямой волновод					Изогнутый волновод				
		Периметр трубы, м.м. до									
		100	150	200	250	300	100	150	200	250	300
		Время, мин									
До серебре- ния	200	6,5	6,8	7,1	7,4	7,7	7,3	7,6	7,9	8,2	8,5
	400	7,0	7,3	7,6	7,9	8,2	7,8	8,1	8,4	8,7	9,0
	600	7,5	7,8	8,1	8,4	8,7	8,3	8,6	8,9	9,2	9,5
	800	8,0	8,3	8,6	8,9	9,2	8,8	9,1	9,4	9,7	10,0
	1000	8,5	8,8	9,1	9,4	9,7	9,3	9,6	9,9	10,2	10,5
После се- ребрения	200	6,0	6,3	6,6	6,9	7,2	6,8	7,1	7,4	7,7	8,0
	400	6,5	6,8	7,1	7,4	7,7	7,3	7,6	7,9	8,2	8,5
	600	7,0	7,3	7,6	7,9	8,2	7,8	8,1	8,4	8,7	9,0
	800	7,5	7,8	8,1	8,4	8,7	8,3	8,6	8,9	9,2	9,5
	1000	8,0	8,3	8,6	8,9	9,2	8,8	9,1	9,4	9,7	10,0

Механические способы полирования токонесущих поверхностей волноводных корпусов имеют ряд существенных недостатков:

1) трудность, а иногда и невозможность полирования поверхностей, имеющих сложный профиль;

Таблица 2.28

Длина трубы, мм, до	Периметр трубы, мм, до				
	100	150	200	250	300
	Время, мин				
200	5,0	5,3	5,6	5,9	6,2
400	5,5	5,8	6,1	6,4	6,7
600	6,0	6,3	6,6	6,9	7,2
800	6,5	6,8	7,1	7,4	7,7
1000	7,0	7,3	7,6	7,9	8,2

Примечание. Нормативы времени предусматривают следующий режим полировки: амплитуда 1 мм; частота 30 гц; вращение детали 5 об/мин.

2) загрязнение токонесущих поверхностей полировальными пастами;

3) возможность деформации волноводных корпусов в процессе полирования.

Электрохимическое и химическое полирование не имеет этих недостатков и хотя не может полностью заменить механического полирования, часто оказывается более экономичным и значительно расширяет технологические возможности полирования.

Электролит для электрохимического полирования должен быть устойчив в работе и обладать достаточно широким рабочим интервалом плотности тока и температуры. Для каждого металла имеются специальные составы электролита.

Для электрополирования латуни и меди в качестве электролита используется 70%-ный раствор ортофосфорной кислоты (уд. вес $1,55 \text{ г/см}^3$) при анодной плотности тока $1,5\text{--}2 \text{ а/дм}^2$ и $18\text{--}20^\circ \text{С}$. Электролит после составления должен быть проработан с медными анодами и катодами. Количество тока, прошедшего через него, должно составлять около $5 \text{ а} \cdot \text{г/л}$. После проработки электролит пригоден для работы. Продолжительность электрополирования 10—15 мин.

Для электрополирования серебряных поверхностей используется электролит следующего состава (г/л):

серебро цианистое 2—3
калий цианистый 28—32

и несимметрично выпрямленный ток при режимах:

анодная плотность тока . . .	8—10 а/дм ²
время пребывания детали под током	0,5 сек
время пребывания детали без тока	1,5 сек
температура электролита . . .	15—25°C

Серебряные покрытия, обработанные электрополированием, имеют повышенную устойчивость к коррозии и чистоту поверхности до 9—10-го класса шероховатости.

Электрополирование алюминия ведется с использованием электролита следующего состава (в весовых процентах):

ортофосфорная кислота	34
серная кислота	34
хромовый ангидрид	3,6
вода	28,4

Температура электролита 80—90°C, анодная плотность тока 30—35 а/дм², продолжительность электрополирования 1—6 мин. Катодами служат свинцовые пластины. Этот электролит целесообразно применять для обработки волноводных узлов из АО, АОО, АМг, АМц. Электролиты с повышенной концентрацией серной и фосфорной кислот применяются для электрополирования волноводных узлов из дюралюминия, в частности сплава Д16. Хорошие результаты дает применение реверсивного тока при электрополировании алюминия — при этом устраняется питтинг на полированной поверхности и упрощается процесс, так как расширяется рабочий интервал режимов полирования.

Химическое полирование дает более низкую по сравнению с электрохимическим полированием чистоту токонесущих поверхностей, однако имеет достоинства:

1) не требуется специального источника тока и приспособлений для создания качественного контакта с узлом;

2) можно обрабатывать рабочие полости волноводных узлов со сложной конфигурацией.

К недостаткам процесса относятся:

1) небольшой срок службы раствора;

2) вредность процесса и необходимость работы с вентиляцией. Этот процесс применяется главным образом для полирования волноводных узлов из алюминия. Для этого используются растворы, содержащие NaOH,

NaNO_3 , NaNO_2 с различными добавками H_3PO_4 , HNO_3 , H_2SO_4 , $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$.

Скорость растворения металла при химическом полировании увеличивают проведением процесса при повышенных температурах раствора, введением в него солей тяжелых металлов, а также деполяризаторов.

Трудоемкость электрополирования и химического полирования близка по величине к трудоемкости электролитического оксидирования корпусов волноводных устройств. Значения штучного времени для этих процессов можно взять из табл. 2.25.

Поверхностный эффект накладывает определенные требования не только на микрогеометрию, но и на структуру металла токонесущей поверхности. Величина активных потерь в волноводе определяется электрическим сопротивлением токонесущей поверхности. Это сопротивление поверхностного слоя металла зависит от метода обработки его токонесущей поверхности. Обычно оно выше, чем сопротивление «массивного» металла.

При выборе способа обработки токонесущей поверхности необходимо учитывать, что механическая обработка резанием и давлением ведет к размельчению зерен металла до размеров 0,001—0,01 $\mu\text{м}$, которые соизмеримы с длиной свободного пробега электрона. Электрическое сопротивление поверхностного слоя повышается из-за рассеяния электронов на границах зерен. Толщина слоя с размельченными зернами после чистовой обработки лежит в пределах от единиц до десятков $\mu\text{м}$.

При механическом шлифовании и полировании на токонесущей поверхности образуется поверхностный слой со сложной структурой, который содержит частицы абразива, полировальной пасты, окислы, размельченные и разориентированные кристаллы. Толщина этого слоя невелика — не более 0,1 $\mu\text{м}$, а электрическое сопротивление выше, чем сопротивление слоя, имеющего только размельченные зерна. Граница раздела недеформированного и поверхностного слоев имеет сложную микрогеометрию, что вызывает появление межслойной «шероховатости».

Поскольку электрическое сопротивление поверхностного слоя в несколько раз выше электрического сопротивления недеформированного слоя, то эффективное сопротивление на СВЧ будет в большой степени определяться этой межслойной «шероховатостью», несмотря на

высокую чистоту токонесущей поверхности. Поэтому полирование этих поверхностей не всегда дает ожидаемое уменьшение потерь. Особенно это заметно в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне длин волн. Выявить и особенно контролировать это в процессе изготовления сложно, поэтому при производстве устройств СВЧ миллиметрового или субмиллиметрового диапазона технологический процесс необходимо строить с таким расчетом, чтобы удалить поверхностный слой. Для этого используют химическое или электрохимическое полирование. На величину активных потерь заметное влияние оказывает пористость, которая проявляется при изготовлении волноводных корпусов литьем или гальваническим наращиванием. Поры снижают эффективную площадь поперечного сечения токонесущего слоя. Зная их размер и количество, можно рассчитать изменение площади поперечного сечения. Кроме того, в порах остаются следы химических реактивов, используемых при производстве волноводных корпусов. Поэтому поры могут быть центрами коррозии. Если для формообразования волноводных корпусов используется способ, дающий высокую пористость, то технологический процесс должен предусматривать операции по уплотнению токонесущего слоя. Обычно такие операции относятся к категории отделочных.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ВОЛНОВОДНЫХ УСТРОЙСТВ СВЧ

Волноводные устройства СВЧ разнообразны по своему назначению и конструктивному оформлению. Однако в их конструкции можно выделить общие по конструктивно-технологическим признакам элементы и детали, например отверстия связи, установочные отверстия в стенках волноводов, поглощающие сопротивления, волноводные диафрагмы и т. д. Для изготовления таких элементов и деталей, входящих в различные устройства СВЧ, будут использоваться одинаковые технологические процессы.

На примере конкретных устройств СВЧ рассмотрим изготовление типичных элементов и деталей, входящих в их конструкцию.

§ 3.1. ИЗГОТОВЛЕНИЕ СОГЛАСОВАННЫХ НАГРУЗОК И ФИКСИРОВАННЫХ ПОГЛОЩАЮЩИХ АТТЕНУАТОРОВ

Волноводные согласованные нагрузки бывают поверхностные и объемные. Конструктивно их выполняют в виде отрезка волноводной трубы, короткозамкнутого на одном конце и снабженного соединительным фланцем на другом. Внутри трубы помещают поглощающее сопротивление в виде пластины с заостренными концами или клина с одним или двумя скосами.

В поверхностных согласованных нагрузках для волноводов прямоугольного поперечного сечения, возбуждаемых волной типа H_{01} , в качестве поглощающего сопротивления используются тонкие клинообразные диэлектрические пластины, покрытые поглощающим слоем (рис. 3.1, а). Пластины располагаются параллельно

электрическим силовым линиям поля, а значит, и узким стенкам волновода. Клинообразная форма пластин обеспечивает поглощение мощности в широкой полосе частот с минимальным значением КСВ и, кроме того, равномерный нагрев сопротивления. Это особенно важно, поскольку неравномерное выделение тепла по длине сопротивления вызывает деформацию пластин. Иногда для противодействия изгибу, короблению пластин и сокра-

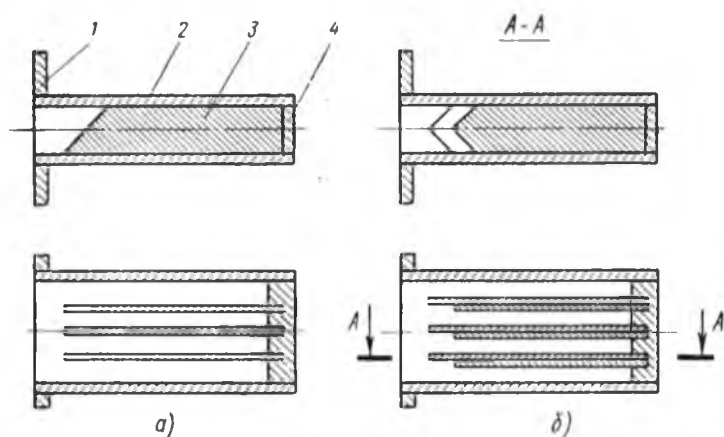


Рис. 3.1. Волноводные согласованные нагрузки с поверхностными поглощающими сопротивлениями в виде одиночных (а) и сдвоенных (б) пластин:

1 — фланец; 2 — волноводная труба; 3 — поверхностное поглощающее сопротивление; 4 — заглушка

щению их длины при сохранении требуемого значения рассеиваемой мощности и КСВ используют две склеенные пластины, одна из которых короче другой (рис. 3.1, б).

Согласованные нагрузки с поверхностными сопротивлениями применяются для рассеивания небольших уровней мощности (до 5—8 вт).

Варианты конструкций этих нагрузок даны на рис. 3.2. Согласованная нагрузка (рис. 3.2, а) выполнена в виде короткозамкнутого отрезка волноводной трубы 1 с фланцем на конце. Противоположный конец волноводной трубы закрыт металлической заглушкой 9. В пазах параллельно узким стенкам волноводной трубы установлены диэлектрические пластины с поглощающим покры-

тием, поверхностное сопротивление которых имеет величину около 1000 ом/см^2 .

Точное положение поглощающих пластин подбирается при настройке и фиксируется стопорными винтами 7 и контргайками 8. На входе нагрузки перед средней пластиной по оси широкой стенки установлен регулировочный винт, выполняющий роль реактивного штыря для согласования волновых сопротивлений и получения заданных значений КСВ.

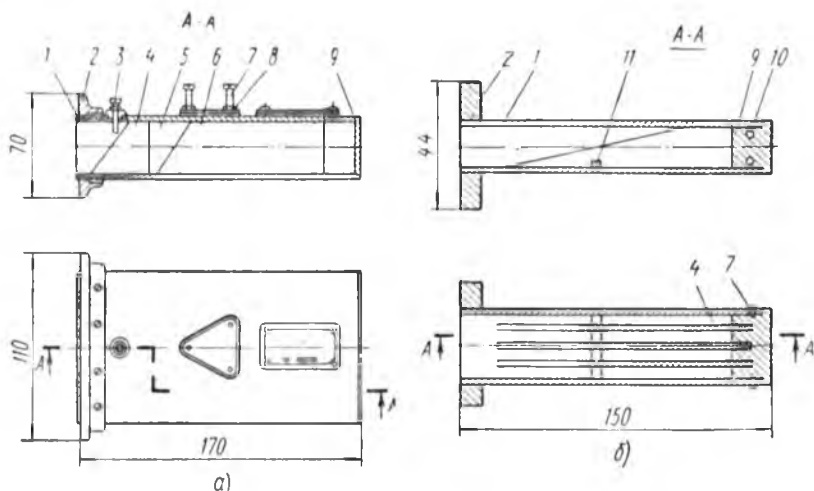


Рис. 3.2. Конструкции волноводных согласованных поглощающих нагрузок с поверхностными поглощающими сопротивлениями:

1 — волноводная труба; 2 — фланец; 3 — регулировочный винт; 4, 5, 6 — поглощающие пластины; 7 — стопорный винт; 8 — контргайка; 9 — заглушка; 10 — штифт; 11 — планка

Конструкция согласованной нагрузки (рис. 3.2б) отличается от предыдущей выполнением крепления и формой поглощающих пластин, также отсутствием настроечных элементов. Поглощающие пластины входят в пазы заглушки 9 и крепятся к ней штифтами. Параллельность пластин обеспечивает планка 11, в пазы которой вводятся пластины. Положение заглушки фиксируется опорными винтами.

Технологический процесс изготовления волноводных согласованных нагрузок этой конструкции следующий:

1) получение отрезка волноводной трубы, фланца и их сборка;

2) обработка контактной поверхности фланца и сверление крепежных отверстий;

3) нанесение защитных покрытий и отделка токонесущих поверхностей;

4) изготовление диэлектрических пластин поглотителя;

5) нанесение на поверхность пластин поглощающего покрытия;

6) сборка волноводной согласованной нагрузки;

7) настройка.

Первые три пункта подробно рассмотрены в предыдущих разделах. Специфично здесь лишь только изготовление пазов в полости волноводной трубы. Их получают протягиванием, используя специальную протяжку, которая одновременно формирует необходимое число пазов и обеспечивает их чистовую обработку.

Пазы протягиваются до сборки волноводной трубы с фланцем.

Рассмотрим более подробно пп. 4, 5 и 6.

Здесь в качестве материалов диэлектрического основания поверхностных поглощающих нагрузок используются керамика, стекло, гетинакс, слюда, текстолит. Роль поглощающего покрытия выполняют тонкие пленки металлов (сплавов) с высоким удельным сопротивлением, например тонкие пленки нихрома. Можно использовать и неметаллические проводящие пленки, в частности пленки лакосажевых суспензий.

Керамические подложки для поверхностных поглощающих волноводных нагрузок толщиной от 0,3 до 1,5 мм изготавливают из высокоглиноземистой массы «Миналунд» (М-7). Технологический процесс изготовления керамической пленки состоит в следующем. Шликер, изготавливаемый на основе 3—4%-ного раствора натрийкарбоксиметилцеллюлозы и массы М-7 в соотношении 1:1, разливается на стекле и высушивается в течение 50—60 ч при комнатной температуре. В результате получается эластичная керамическая пленка, которая легко отделяется от стекла и хорошо обрабатывается.

В штампе или приспособлении из диэлектрической пленки вырубается подложка волноводной нагрузки заданной конфигурации. Небольшое количество связки в сырых деталях позволяет применить однократный обжиг при температуре 1720°С с выдержкой 5—6 ч. После

обжига поверхность подложки, прилежавшая к стеклу, имеет чистоту 7—8-го класса, а противоположная поверхность — 5—6-го класса шероховатости.

Тонкую пленку нихрома наносят на поверхность керамической подложки испарением в вакууме. Нихром осаждается на нагретую подложку. После нанесения слоя заданной толщины он спекается в вакууме при 450° С. Нагрев подложки косвенный.

Технологический процесс изготовления плоских поглощающих нагрузок на стекле состоит в следующем. Прямоугольная стеклянная пластина тщательно обезжиривается и с одной стороны матируется. На края пластины вжиганием наносят серебряные контактные площадки. Слой нихрома осаждают на матированную поверхность вакуумным распылением. Спекание слоя нихрома происходит за счет его нагрева электрическим током, подводимым к пленке через серебряные контакты. При этом сопротивление пленки уменьшается приблизительно на 25 %.

Далее следует лакирование пластины (если оно предусмотрено чертежом) и обрезка для получения заданной конфигурации.

При изготовлении поглощающих пластин на слюдяных подложках последовательность операций та же, что и на стеклянных, за исключением матирования. Слюдяные подложки не матируются, слой нихрома наносится на поверхность свежерасщепленной слюды.

Поглощающие нагрузки на подложках из гетинакса изготавливаются без спекания ввиду низкой термостойкости гетинакса. Поэтому надо учитывать, что сопротивление слоя нихрома после извлечения из вакуумной установки будет увеличиваться.

Лакосажевые суспензии наносят на подложки намазыванием, окунанием или пульверизацией с последующей сушкой.

При сборке поглощающие пластины устанавливаются в пазы в стенках волноводной трубы или крепятся в заглушке. Перед этим торцевые поверхности пластин, соприкасающиеся со стенками волновода, смазывают клеем. Для конструкции, показанной на рис. 3.2, б, поглощающие пластины вначале крепятся штифтами в пазах заглушки, затем вклеиваются в пазы планки, после чего получившаяся сборочная единица устанавливается в полость волновода и положение заглушки фиксируется винтами.

Настройка волноводных согласованных нагрузок ведется на стандартных измерительных стендах (§ 4.1) по минимуму коэффициента отражения.

Волноводные согласованные нагрузки с объемным сопротивлением можно использовать для рассеивания не только малых (единицы ватт), но и больших уровней мощности (до 1000 вт). Малые значения КСВН этих нагрузок достигаются правильным выбором размеров и формы поглощающих сопротивлений. Их клинообразная

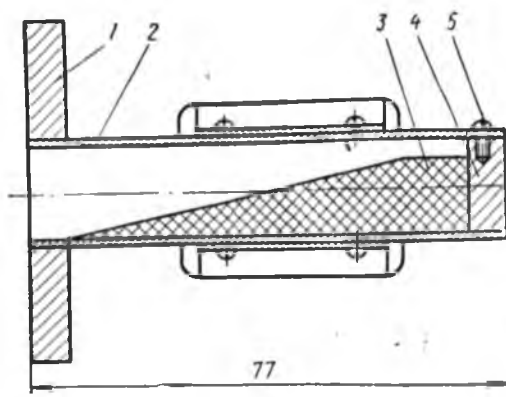


Рис. 3.3 Конструкция волноводной поглощающей нагрузки малой мощности с объемным поглощающим сопротивлением:

1 — фланец; 2 — волноводная труба; 3 — поглощающее сопротивление; 4 — заглушка; 5 — винт

форма обеспечивает минимальный КСВН в широком диапазоне частот и равномерное нагревание всего сопротивления. Рассмотрим наиболее типичные конструкции волноводных согласованных нагрузок с объемным сопротивлением.

На рис. 3.3 показана конструкция волноводной согласованной нагрузки с объемным сопротивлением, рассчитанной на поглощение мощности до 5 вт. Она выполнена в виде отрезка волноводной трубы 2 с фланцем 1 на одном конце и короткозамыкающей металлической заглушкой 4 на другом конце. Внутри волноводной трубы жестко закреплено поглощающее сопротивление клинообразной формы 3. Заглушка крепится к волноводной трубе винтом 5.

Для поглощения большой мощности (сотни ватт) используется волноводная согласованная поглощающая нагрузка, конструкция которой представлена на рис. 3.4. Корпус нагрузки состоит из двух частей 2 и 3, изготовленных литьем. Обе части скрепляются винтами 4 и после сборки образуют прямоугольный волновод с фланцем и охлаждающими ребрами. Волновод со стороны,

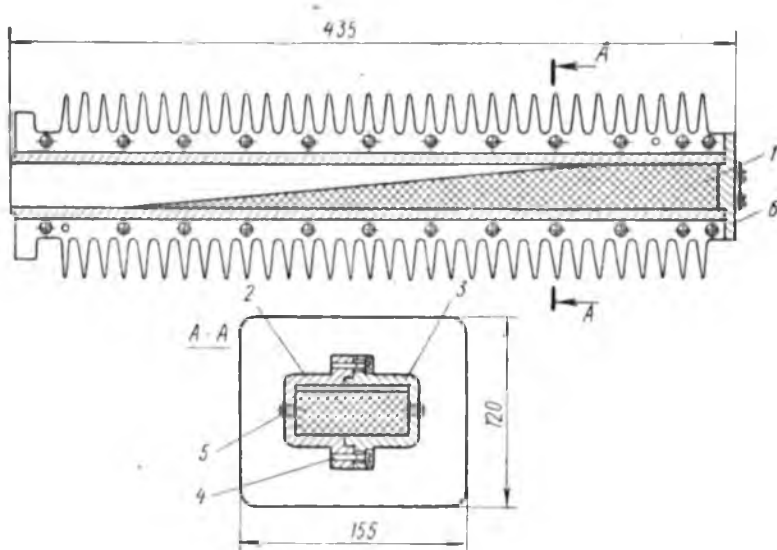


Рис. 3.4. Конструкция волноводной поглощающей нагрузки высокой мощности с объемным поглощающим сопротивлением:

1 — поглощающее сопротивление; 2, 3 — детали корпуса; 4 — крепежные винты; 5 — стопорные винты; 6 — заглушка

противоположной фланцу, закрыт металлической заглушкой 6, укрепленной с помощью винтов. Внутри волновода установлено поглощающее сопротивление 1, закрепленное в волноводе стопорными винтами 5.

Технологические процессы, используемые для получения корпусов волноводных согласованных нагрузок, подробно рассмотрены в предыдущем изложении. Рассмотрим подробнее технологию изготовления и установки объемных поглощающих сопротивлений.

Объемные поглощающие сопротивления низкого и среднего уровня мощности выполняются из материалов типа М (М-1, М-2, М-3), представляющих собой компо-

Таблица 3.1

Характеристики	Тип материалов		
	М-1	М-2	М-3
Удельный вес, г/см ³	4,57—4,68	2,93—3,03	1,54—1,71
Удельная ударная вязкость, кГсм/см ²	3,8—4,5	3,2—4,0	3,3—3,6
Временное сопротивление изгибу, кГ/см ²	90	109	162
Формоустойчивость, °С	60	60	60

зицию карбонильного железа и полистирола. Некоторые характеристики этих материалов приведены в табл. 3.1.

В качестве наполнителя используется карбонильное железо Р-41 сорта ВТУ 1024-54. Соотношение полистирола и карбонильного железа в зависимости от марки материала показано в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Материал	Состав песочных частей	
	полистирола	карбонильного железа
М-1	1	10
М-2	1	4
М-3	1	0,85

Некоторое повышение теплостойкости и механической прочности объемных поглощающих сопротивлений достигается заменой полистирольной связки на полиэтилен низкого давления. Формоустойчивость при этом возрастает на 30—40°С.

Из-за отсутствия растворителей для полиэтилена при изготовлении его композиции с карбонильным железом лаковая технология не применяется. Исходные материалы в виде мелкодисперсных порошков смешиваются в шаровой мельнице (соотношение веса шаров и веса компонентов 2:1 при заполнении барабана на 60—70%). Невозможность использования лаковой технологии отрицательно сказывается на свойствах поглощающего материала — обволакивание частиц карбонильного железа

диэлектриком менее равномерно, чем у материалов типа М. Поэтому удельное объемное электрическое сопротивление материалов, использующих в качестве связки полиэтилен, меньше, чем у материалов типа М.

Формообразование поглощающих сопротивлений у обоих материалов одинаково и определяется термопластичной связкой, т. е. прессование на литьевых машинах или прессах. Оно ведется при температуре исходной массы $180\text{--}230^\circ\text{C}$ и давлении $480\text{--}800\text{ кг/см}^2$ для полиэтиленовой связки и $800\text{--}1200\text{ кг/см}^2$ для материалов типа М. Высокая текучесть полиэтилена облегчает прессование. В процессе изготовления объемных поглощающих нагрузок из материала типа М могут возникать внутренние напряжения, которые снижаются термообработкой — выдержка при $60\text{--}80^\circ\text{C}$ в течение 1—3 ч.

Кроме полиэтилена и полистирола в качестве связки используются различные терморезактивные материалы. Они позволяют получить сопротивления с более высокой механической прочностью и теплостойкостью. Объемные поглощающие нагрузки с терморезактивной связкой изготавливают прессованием без подогрева для придания требуемой формы и последующей термообработкой для поликонденсации связки. Исходная пресс-масса изготавливается по лаковой технологии или сухим смешиванием компонентов в шаровых мельницах. Перед прессованием, которое ведется при $18\text{--}20^\circ\text{C}$ и удельном давлении $8\text{--}10\text{ т/см}^2$, она смачивается для облегчения формообразования. После прессования объемная поглощающая нагрузка нагревается до $30\text{--}40^\circ\text{C}$ для удаления влаги и снятия внутренних напряжений в ферромагнитном наполнителе. Длительность термообработки 18—20 ч при принудительной циркуляции воздуха. Затем проводят термообработку для поликонденсации смолы при $120\text{--}130^\circ\text{C}$ в течение 2—4 ч.

При использовании в качестве связки эпоксидных компаундов (феррозпоксид) компоненты исходной массы смешивают в вакуум-смесителе. Их загрузку ведут при работающей мешалке в таком порядке: смола, пластификатор, карбонильное железо.

Готовая смесь вакуумируется в течение 25—50 мин при определенной температуре, рекомендуемой для применяемого пластификатора, при остаточном давлении 10—15 мм рт. ст. Процесс ведется до полного удаления пузырьков воздуха из массы. В подготовленную массу

вводится отвердитель, предварительно расплавленный и дозированный.

При введении отвердителя надо соблюдать температурный режим, так как при повышении температуры происходит возгонка ангидридов, а при понижении — их выпадение из раствора. В обоих случаях изменяется состав компаунда. После смешивания компаунда с отвердителем и получения однородной массы компаунд вторично вакуумируется при

остаточном давлении 10—15 мм рт. ст. в течение 10—15 мин. Отверждение компаундов производят немедленно после заливки форм.

Для компаундов, отверждаемых маленновым ангидридом, рекомендуются следующие режимы полимеризации для объемных поглощающих нагрузок:

на сечение волновода 23×10 и менее $t_1 = 110^\circ \text{C} - 2 \text{ ч}$, $t_2 = 150^\circ \text{C} - 2 \text{ ч}$;

на сечение волновода выше 23×10 $t_1 = 75 \pm 5^\circ \text{C} - 8 - 10 \text{ ч}$, $t_2 = 120 \pm 2^\circ \text{C} - 5 \text{ ч}$.

Кроме карбонильного железа в качестве наполнителя для всех рассмотренных ранее случаев можно использовать и другие материалы, например графит, асбест и т. д. Технологический процесс изготовления при этом существенно не изменяется.

Формообразование объемных поглощающих сопротивлений с эпоксидными компаундами в качестве связки можно осуществить не только в формах, но и непосредственно в волноводе, в полость которого устанавливается оправка из легированной стали (4Х13), формирующая поглощающий клин. Затем в волновод заливается компаунд. После отверждения оправка извлекается.

Этот процесс формообразования поглощающих сопротивлений применяется при изготовлении волноводных согласованных нагрузок гальванопластикой. Корпус волноводной согласованной нагрузки (рис. 3.5) получают

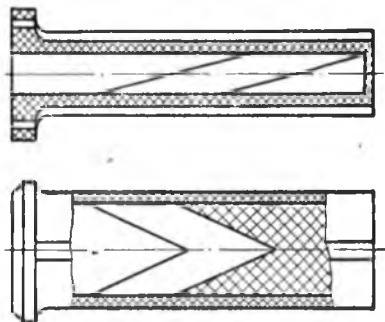


Рис. 3.5. Волноводная поглощающая нагрузка, изготовленная с применением гальванопластика

наращиванием на возвратных формах. В задней стенке корпуса предусматривают технологические отверстия. После опрессовки в полость волновода вводится оправка для формования поглощающего сопротивления. В волновод путем шприцевания через технологические отверстия в задней стенке вводится эпоксидный компаунд с наполнителем. Материал поглощающего сопротивления имеет хорошую адгезию со стенками волновода, поэтому дополнительное крепление поглощающего сопротивления не требуется.

Высокую термостойкость имеют объемные поглощающие сопротивления из кристаллического кремния с керамической связкой. Процесс их изготовления следующий. Ультрафарфоровая керамическая масса размалывается в шаровой мельнице и просеивается через сито 900 отв/см^2 . Так же обрабатывается и кристаллический кремний. Весовое соотношение фарфоровых шаров и обрабатываемого материала для кремния и керамики 1 : 1. Смешивание компонентов производится в шаровой мельнице в течение 8—10 ч. Перед прессованием в смесь керамики и кремния добавляют 5—7% воды и смесь протирают 3—4 раза сквозь сито 144 отв/мм^2 для равномерного увлажнения. Из нее прессуют брикеты при давлении $150\text{—}200 \text{ кг/см}^2$. Для обеспечения равномерного распределения компонентов в смеси брикеты дробятся и масса вторично протирается сквозь сито. Из подготовленной смеси отпрессовываются заготовки поглощающих нагрузок при давлении 400 кг/см^2 . Заготовки сушат при $100\text{—}110^\circ\text{C}$ в течение 10—16 ч и пропитывают парафином, погружая в расплав на 2—5 ч (в зависимости от размеров заготовки). После пропитки их механически обрабатывают и обжигают в электрической печи по следующему режиму (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Этапы термообработки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Температура, $^\circ\text{C}$	100	150	200	250	300	400	600	800	1000	1100	1150	1150

Время выдержки при каждой температуре 1 ч. Обожженные детали шлифуются, промываются и тщательно просушиваются при $700\text{—}800^\circ\text{C}$.

Фиксированные поглощающие аттенюаторы для волноводов изготавливаются с объемным поглощающим сопротивлением. Конструктивно они представляют (рис. 3.6, а, б и в) отрезок волноводной трубы с фланцами на концах. Внутри нее установлено поглощающее сопротивление, для которого используются те же материалы, что и для волноводных согласованных нагрузок. Технологический процесс изготовления фиксированных поглощающих аттенюаторов состоит в следующем:

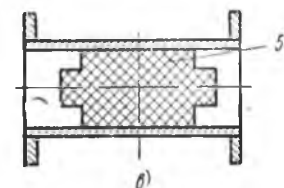
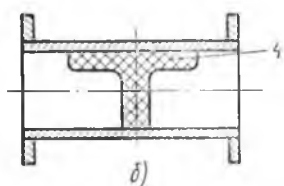
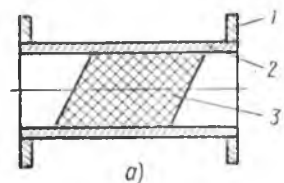


Рис. 3.6. Фиксированный поглощающий волноводный аттенюатор:

1 — фланец; 2 — волноводная труба; 3, 4, 5 — поглощающие сопротивления

1) получение корпуса фиксированного поглощающего аттенюатора;

2) получение объемного поглощающего сопротивления;

3) установка поглощающего сопротивления в канал волновода.

Объемные сопротивления при установке в канал волновода приклеиваются к стенкам или крепятся винтами. Перспективно формообразование объемного поглощающего сопротивления непосредственно в канале волновода. Сложная форма обонх концов поглощающего сопротивления достигается формовкой поглощающего сопротивления с применением двух оправок. Вначале

в полость волновода устанавливается первая оправка, формирующая один конец объемного волноводного сопротивления. С противоположной стороны заливается компаунд с наполнителем (количество заливаемого материала строго дозируется), после чего вводится вторая оправка, формирующая другой конец объемного волноводного сопротивления.

Эта оправка имеет каналы для удаления воздуха из полости между компаундом и оправкой в процессе формования.

§ 3.2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ВОЛНОВОДНЫХ НАПРАВЛЕННЫХ ОТВЕТВИТЕЛЕЙ

Направленный ответвитель представляет собой устройство (рис. 3.7), состоящее из двух волноводных труб, имеющих на определенном участке общую тонкую стенку (узкую или широкую). В общей стенке сделаны отверстия, служащие элементами связи, через которые ответвляется часть мощности из основного волновода во

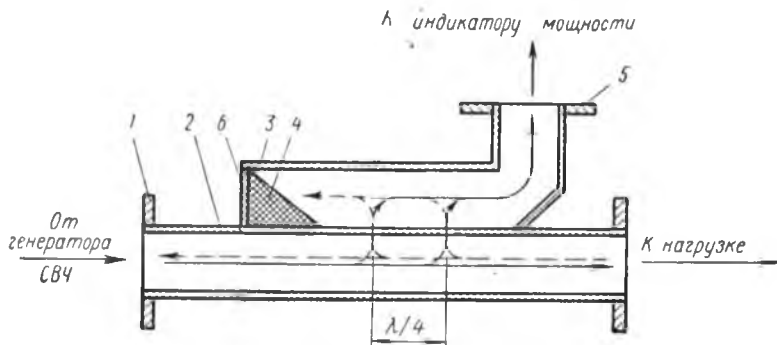


Рис. 3.7. Схема однонаправленного волноводного ответвителя

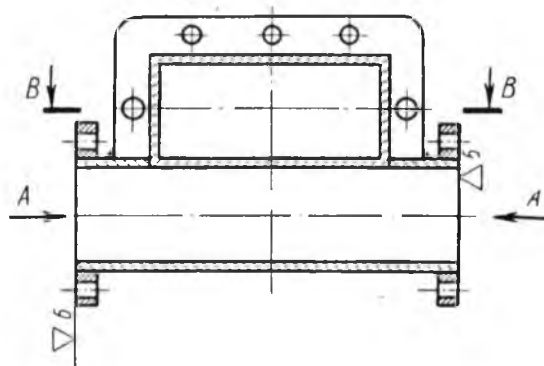
вспомогательный. Число отверстий, их форма и размеры определяют коэффициент связи и направленность ответвления. Волноводная труба 2 с обеих сторон имеет фланцы 1, волноводная труба 3 — один фланец 5. На другом ее конце устанавливается короткозамыкающая металлическая заглушка 6 и поглощающее сопротивление 4.

Волноводные трубы 2 и 3 могут быть расположены так, как показано на рис. 3.7, повернуты друг относительно друга на некоторый угол или пересекаться под углом девяносто градусов (рис. 3.8). Технологический процесс изготовления направленных ответвителей состоит в следующем:

- 1) изготовление прямоугольной волноводной трубы направленного ответвителя (удаления части стенки и обработка посадочных мест под фланцы);

- 2) изготовление изогнутой волноводной трубы направленного ответвителя с отверстиями связи (гибка заготовки, получение посадочных мест под фланцы и изготовление отверстий связи);

- 3) сборка прямолинейной и изогнутой волноводных труб;
- 4) изготовление и установка фланцев;



B-B

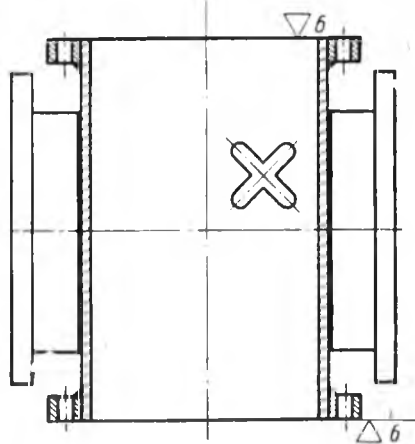


Рис. 3.8. Конструкция волноводного направленного ответвителя

- 5) внутренняя и внешняя отделка;
- 6) изготовление и установка поглощающего сопротивления.

Если в направленном ответвителе обе волноводные трубы прямолнейны (см. рис. 3.8), то вначале трубу изготавливают с удаленным участком стенки, затем — с отверстиями связи.

Участок стенки прямолинейной волноводной трубы удаляется для обеспечения минимальной толщины общей стенки связанных волноводов.

Технологический процесс вскрытия участка стенки следующий. Вначале участок общей стенки удаляется фрезерованием заготовки на оправке. При этом стенка удаляется не на всю толщину. Остается слой металла толщиной в несколько сотых долей миллиметра. Затем фрезерованная поверхность притирается на чугунном притире. В процессе этого оставшийся тонкий слой металла отделяется от стенок заготовки, а торцы необработанных стенок заготовки имеют хорошую плоскостность.

Гибка волноводной трубы осуществляется одним из методов, приведенных в § 1.1.

Отверстия связи выполняются с высокой точностью. Их размеры, расстояние от оси и расстояния между ними выдерживают с точностью до сотых долей миллиметра. Совершенно недопустимо наличие заусенцев или искажение плоскостности стенки заготовки, в которой выполнены отверстия связи. Их форма разнообразна (прямоугольные, круглые, крестообразные), количество велико и номинальные размеры неодинаковы. Это усложняет процесс их изготовления.

Отверстия связи непосредственно в стенке заготовки получают с помощью прецизионной электроискровой обработки. Вначале осуществляют черновую прошивку отверстий на жестких режимах (табл. 3.4). Производительность при этом составляет 100—500 мм³/мин и чистота образующей поверхности лежит в пределах 2—3-го класса. Затем производят чистовую обработку отверстий на мягких и особо мягких режимах. Производительность при этом 0,1—0,01 мм³/мин при чистоте обработки образующей поверхности отверстия по 7—9-му классам.

Для устранения погрешностей переустановка целесообразно совместить процессы получения отверстий связи. Для этого электрод делают ступенчатым — нижняя, прошивающая часть, и верхняя, калибрующая. При этом должны использоваться электроискровые станки, допускающие работу на жестких и мягких режимах.

Таблица 3.4

Режимы	Энергия единичного импульса, Дж	Сила тока в контуре, ма		Емкость конденсаторов, мкф
		разрядном	зарядном	
Жесткие	0,5—5	Выше 100	Выше 5	Выше 100
Средние	0,05—0,5	10—100	1—5	10—100
Мягкие	0,005—0,05	Ниже 10	Ниже 1	Ниже 10

Рабочие размеры при изготовлении электродов выбирают следующим образом. Диаметр прошивающей части электрода

$$D = D_0 - 2(a + h),$$

где D_0 — номинальный диаметр отверстия; a — искровой промежуток; h — припуск на калибровку ($\sim 0,02$ — $0,03$ мм).

Допуск равен величине искрового промежутка. Для калибрующей части электрода диаметр и допуски равны диаметру и допускам получаемого отверстия.

В качестве материала электрода используют латунь ЛС-1-59-1. В табл. 3.5 приведены сравнительные характеристики производительности обработки и износа электрод-инструмента, выполненного из латуни и меди при обработке заготовок из меди, латуни и алюминия.

Таблица 3.5

Материал заготовки	Материал электродов							
	латунь ЛС-1-59-1				медь М1			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
Медь М1	1,76	210	45	46,5	1,0	120	60	80
Латунь Л62	1,84	230	78	78	1,1	136	150	149
Алюминий АОО	1,08	200	27,5	9,2	0,57	220	148	480

Примечание. I — производительность обработки, г/мин; II — производительность обработки, мм³/мин; III — износ электрод-инструмента в процентах к весу удаленного металла; IV — износ электрод-инструмента в процентах к объему удаленного металла.

Данные, приведенные в таблице, получены при обработке на электроэрозионном станке с разобленным генератором коротких импульсов при следующих режимах: $U = 150$ в, $A = 1$ вт/сек, $f = 1200$ имп/сек, $\tau = 7$ мксек.

Допустимое значение энергии импульса при чистовой обработке (калибровке) отверстия связи определяется требуемой чистотой образующей поверхности отверстия.

В табл. 3.6 приведены усредненные значения чистоты поверхности в зависимости от энергии импульса при работе электродом из латуни ЛС-1-59-1 в керосине.

Таблица 3.6

Энергия импульса, дж	$6 \cdot 10^{-3} \div 8 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3} \div 1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2} \div 1,25 \times 10^{-2}$	$1,25 \times 10^{-2} \div 1,5 \cdot 10^{-2}$
Класс чистоты	7	8	9	10

Производительность чистовой обработки отверстий связи

$$U = 0,022 C^{2/3} U^{3/2} f^{2/3} \text{ мм}^3/\text{мин.}$$

Количество отверстий связи колеблется от одного до нескольких десятков. Электроискровая обработка позволяет получать все отверстия связи одновременно. Инструмент для этого представляет собой набор электродов, взаимное расположение которых определяется калиброванными стальными прокладками. Электроды и прокладки зажимаются в общей обойме, которая имеет хвостовик для установки на станке.

При прошивке нескольких отверстий связи с различной площадью скорость износа электродов (уменьшение их длины) неодинакова и обратно пропорциональна площади их поперечного сечения.

Результатом неравномерного износа может быть изменение режимов обработки и, как следствие этого, снижение точности и чистоты образующей поверхности прошиваемых отверстий. Для устранения неравномерности износа электроды изготавливают пустотелыми так, чтобы площадь металла в их поперечном сечении была одинаковой для всех электродов. Пустотелые электроды должны иметь отверстия для выхода газов.

Электроискровой обработкой получают отверстия связи любой конфигурации с точностью до сотых долей миллиметра.

Для получения отверстий связи стенка заготовки волновода предварительно фрезеруется на оправке до получения заданной и равномерной толщины. Обработанная поверхность притирается для обеспечения требуемой плоскостности. Затем подготовленную заготовку волновода устанавливают в приспособление, ориентирующее

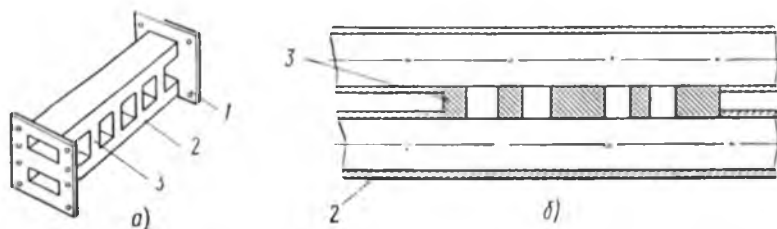


Рис. 3.9. Волноводный направленный ответвитель со связью через шлейфы (а), конструкция зоны связи при малой длине шлейфов (б):
1 — волноводные фланцы; 2 — волноводные трубы; 3 — шлейфы связи

и фиксирующее ее относительно электродов. Базировка заготовки ведется по каналу. Подъемом ванны волновод помещается в рабочую среду, после чего производится прошивка отверстий связи. Для удаления из полученных отверстий связи выгоревших частиц металла (материала заготовки и инструмента) достаточно заготовку в течение 1—3 сек обработать в смеси серной, азотной и соляной кислот с последующей промывкой в воде.

Электроискровая прошивка отверстий связи характеризуется высокой производительностью, точностью выполнения размеров и является перспективной для серийного и мелкосерийного производства.

Кроме рассмотренной сборной конструкции применяются направленные ответвители, изготовленные комбинированными методами с использованием гальванопластики. Технологический процесс их изготовления рассмотрен в § 2.5.

Кроме связи через отверстия и щели широко распространены направленные ответвители, использующие волноводные *четверть-волновые шлейфы*. Конструктивно

они также сборные. Размер шлейфов волноводных направленных ответвителей дециметрового диапазона получается большим и зона связи выполняется из отрезков прямоугольных труб (рис. 3.9, а). Процесс изготовления зоны связи состоит в следующем:

1) удаление части стенки в заготовках волноводных труб;

2) пайка волноводных труб с отрезками прямоугольных труб, оформляющих зону связи.

Технология удаления части стенки заготовок волноводных труб та же, что и для направленных ответвителей, изготовление которых рассматривалось ранее. Пайка шлейфов связи ведется твердым припоем.

Шлейфы волноводных направленных ответвителей сантиметрового диапазона имеют малую длину. Это позволяет выполнить шлейфы в виде прямоугольных отверстий в металлической пластине (рис. 3.9, б). Отверстия получают штамповкой с последующей рихтовкой пластины по плоскости и калибровкой отверстий. Перед пайкой внутренние напряжения пластины снимают отжигом. Конструкция направленного ответвителя позволяет провести пайку фланцев волноводных труб одновременно со шлейфами связи (например, в печах или в расплаве солей).

§ 3.3. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ВОЛНОВОДНЫХ ФИЛЬТРОВ

Волноводные фильтры выполняются как на основе волноводов прямоугольного, так и круглого поперечного сечений. Эти конструкции состоят из однотипных в конструктивном отношении звеньев. Для волноводных фильтров на основе волноводов прямоугольного поперечного сечения применяют следующие звенья.

1. Короткозамкнутые отрезки волноводов прямоугольного поперечного сечения, симметрично включенные в широкие стенки основного волновода (рис. 3.10, а).

2. Объемные полые резонаторы, связанные с основным волноводом по его узкой или широкой стенке и расположенные на определенном расстоянии друг от друга (рис. 3.10, б). Связь основного волновода с резонаторами осуществляется волноводными диафрагмами. В общем случае плоскость диафрагмы может не совпадать

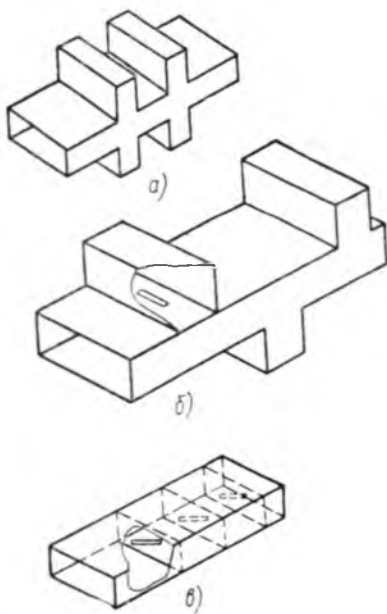
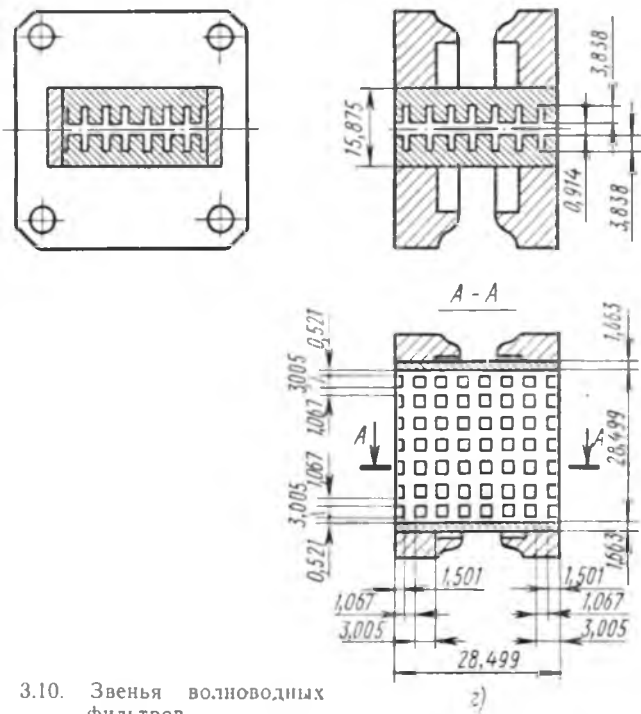


Рис.



3.10. Звенья волноводных фильтров

с плоскостью присоединения к основному волноводу. Конструктивно полые резонаторы располагаются на одной или на противоположных стенках основного волновода.

3. Резонаторы, образованные в основном волноводе двумя плоскими неоднородностями, расположенными на определенном расстоянии друг от друга. В качестве неоднородностей используются волноводные диафрагмы (рис. 3.10, в).

4. Волноводы, имеющие на внутренней поверхности широких стенок выступы, расположенные друг от друга на определенном расстоянии (рис. 3.10, г).

Волноводные диафрагмы, использующиеся в фильтрах, представляют собой тонкие ($0,2—0,4$ мм) металлические пластины с отверстием (рис. 3.11) или металлические стержни (рис. 3.12). Диафрагмы изготавливаются из того же металла, что и корпус волноводного фильтра, чтобы избежать их коробления из-за разных ТКЛР.

Рассмотрим технологию типовых конструкций звеньев волноводных фильтров. Она заключается в изготовлении корпуса волноводного фильтра; установке волноводных диафрагм; получении выступов заданной конфигурации на внутренней поверхности широких стенок волноводной трубы.

При изготовлении корпусов волноводных фильтров сборной конструкции на основе стандартных труб прямоугольного поперечного сечения технологический процесс предусматривает обработку волноводной трубы для создания в ее стенках окна, а на концах — посадочных

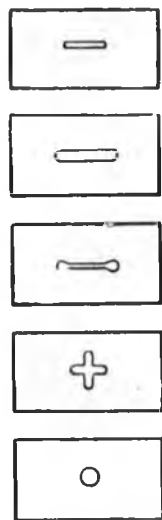


Рис. 3.11. Типы волноводных диафрагм

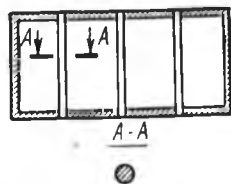


Рис. 3.12. Стержневая волноводная диафрагма

мест под фланцы; получение отрезков труб прямоугольного поперечного сечения, сборку их с волноводной трубой (рис. 3.13); установку заглушек на открытые концы отрезков труб, постановку фланцев и пайку. В том процессе специфично лишь получение окон в стенках волноводной трубы. Если окно вскрывает торцы боковых стенок волноводной трубы, то для его получения используется фрезерование. В остальных случаях применяется штамповка, при которой матрица вводится в канал за-

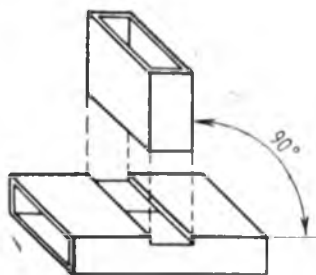


Рис. 3.13. Сборка отрезка трубы прямоугольного поперечного сечения с волноводной трубой

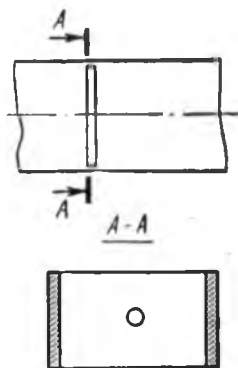


Рис. 3.14. Установка толстой диафрагмы в канал волновода

готовки. В зависимости от требуемого усилия используются штампы с консольной матрицей (малые усилия) или с плавающей матрицей (большие усилия). Методика расчета рабочих размеров пуансона и матрицы и определение необходимого усилия вырубки те же, что и для листового материала.

Точность размеров отверстий в диафрагмах должна соответствовать требованиям 3—4-го классов. Жесткие допуски на размеры заставляют использовать для получения отверстий в диафрагмах прецизионную электроискровую обработку (см. § 3.2). Вначале пластина диафрагмы вырубается по внешнему контуру, по которому и ведется базировка при получении отверстия.

Процесс установки волноводных диафрагм в волноводной трубе должен обеспечивать перпендикулярность плоскости диафрагмы оси волновода, ее плоскостность,

соосность отверстий диафрагм и качественный электрический контакт диафрагм со стенками волновода.

Для толстых диафрагм ($\sim 0,4$ мм) в противоположных стенках волновода выполняются методом фрезерования щели, ширина которых равна толщине диафрагмы плюс удвоенный зазор под пайку. Токонесущие поверхности волноводного корпуса и диафрагмы серебрятся. После чего диафрагма устанавливается в пазы (рис. 3.14). Для соосности отверстий в диафрагмах и заданного их расположения в волновод вводится оправка, профилированная по форме отверстий. Ее длина на 40—50 мм превышает длину волновода. Оправка базируется относительно канала волновода. Затем торцы диафрагм, находящиеся в щелях, пропанвываются и оправка извлекается.

Для установки диафрагм толщиной $\sim 0,2$ мм одна из стенок волноводной трубы удаляется. Диафрагмы устанавливаются в канал по оправкам и фиксируются точечной сваркой (рис. 3.15). Последующая пайка удаленной стенки и диафрагм к стенкам волноводного корпуса ведется в печах за счет серебра, осажденного на поверхность диафрагм и токонесущие поверхности волноводного корпуса.

Наиболее технологичны стержневые диафрагмы, изготавливаемые из калиброванной серебряной латунной проволоки. Для установки стержневых диафрагм в стенках волноводного корпуса по кондуктору сверлятся установочные отверстия. Стержни закрепляются пайкой.

Звенья волноводных фильтров, представляющие собой волноводы с выступами на широких стенках, делаются сборными (см. рис. 3.10, г). Вначале в металлических пластинах, которые предназначены для широких стенок волновода, получают пазы требуемой конфигурации. Затем волновод паяется твердым припоем. При прямоугольных выступах пазы получают фрезерованием. Для получения цилиндрических выступов используют электронскую обработку. При этом электрод пред-

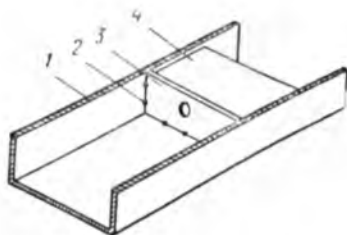


Рис. 3.15. Установка тонкой диафрагмы в канал волновода:

1 — вскрытая волноводная труба; 2 — места точечной сварки; 3 — диафрагма; 4 — оправка

ставляет собой пластину с отверстиями, которые соответствуют по форме и расположению выступам на поверхности широкой стенки. Чтобы избежать появления радиусов скругления в основании выступов, вначале ведется черновая обработка на жестких, затем — чистовая на мягких режимах. Получаемая точность размеров 0,04—0,06 мм, шероховатость до $\nabla 8$.

Жесткие допуски на размеры выступов требуют проведения чистовой обработки импульсами гребенчатой формы, что резко снижает износ инструмента. Радиальное расстояние в зависимости от режима обработки приведено в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Частота, кгц	Рабочий ток, ма	Скважность импульсов	Напряжение холостого хода, в	Рабочее напряжение, в	Боковой зазор на сторону, мм	Производительность, мм ³ /мин
Импульсы прямоугольной формы						
8	44	1,25	88	25	0,153	400
22	44	1,25	105	25	0,112	320
66	30	1,5	120	25	0,074	200
200	10	2	60	20	0,036	30
440	4	2	50	15	0,012	6
Гребенчатые импульсы						
22	42	1,2	105	30	0,132	200
44	25	3	130	35	0,125	120
88	10	3	135	32	0,097	40
200	4	3	140	35	0,046	10

Примечание. Толщина пластины электрод-инструмента должна быть в 2—3 раза больше высоты получаемых выступов.

По своей конструкции *волноводные фильтры на основе круглых* волноводов разнообразны.

Рассмотрим гофрированный волновод (рис. 3.16, а); волновод, состоящий из металлических колец, разделенных диэлектриком (рис. 3.16, б), и волновод в виде спирали из тонкой проволоки (рис. 3.16, в).

Все перечисленные конструкции являются периодическими. Они позволяют передавать широкую полосу

частот, если в них не возникает резонансных явлений, т. е. если расстояние между двумя последовательными неоднородностями остается всегда меньше половины длины волны для наибольшей передаваемой частоты.

Круглый гофрированный волновод состоит из гофрированной волноводной трубы круглого поперечного сечения с соединительными фланцами на концах.

В качестве исходной заготовки при изготовлении круглых гофрированных волноводных труб используют стандартные тянутые трубы с толщиной стенок 0,1—0,5 мм (рис. 3.17). В качестве конструктивного материала применяются полутомпак (Л80) и бериллиевая бронза, закаленная в воде при 780° С.

Широко распространен гидравлический метод, обеспечивающий неизменность чистоты токонесущей поверхности волноводной трубы по сравнению с исходной заготовкой, стабильность геометрических и механических свойств гофров, высокопроизводительный и поддающийся механизации. Заготовка, диаметр которой равен минимальному диаметру гофрированного волновода, по-

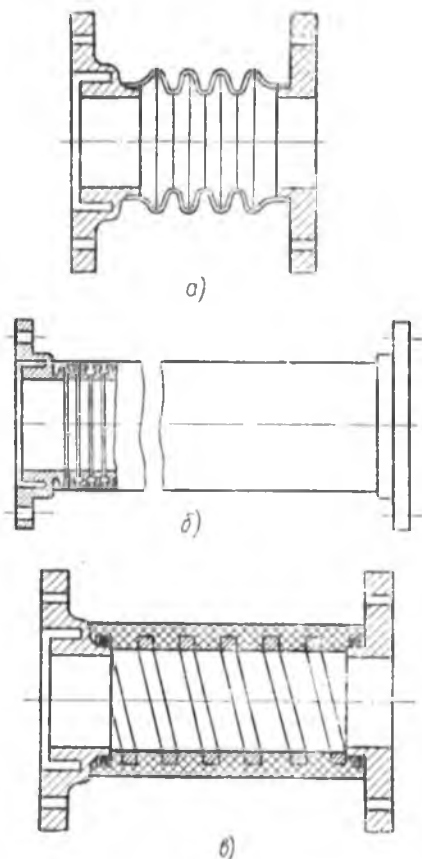


Рис. 3.16. Волноводные фильтры на основе круглых волноводов:

a — с гофрированными стенками; *б* — из металлических и диэлектрических колец; *в* — в виде спирали

мещается в специальное устройство (рис. 3.18). Пластина-
чатые матрицы 1 плотно охватывают трубку и распола-
гаются на равном друг от друга расстоянии. Их положе-
ние фиксируется гребенкой 2. Один конец заготовки дол-
жен быть герметически закрыт с помощью заглушки. От-

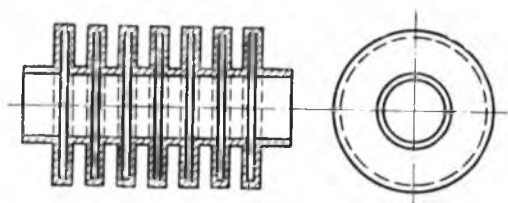


Рис. 3.17. Круглая волноводная гофрирован-
ная труба

крытый ее конец вставляется в зажим 3. В заготовку по-
дается жидкость (обычно вода) под давлением 3—5 ат,
после чего удаляют фиксирующие гребенки. Заготовка
расширяется под действием внутреннего давления, на-

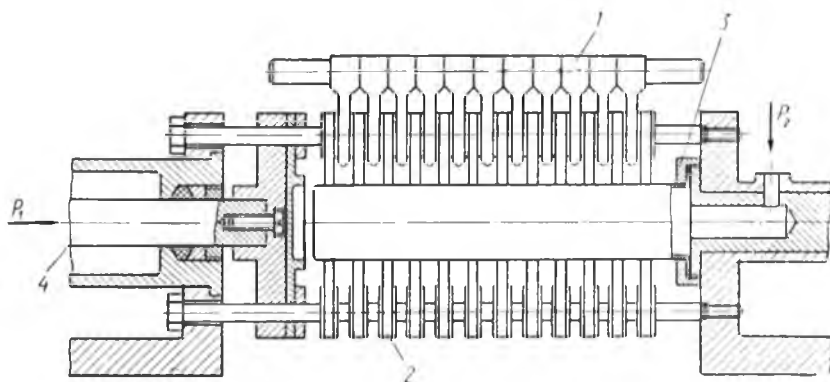


Рис. 3.18. Схема установки для гидростатического гофрирования
круглых волноводных труб

дежно фиксирует положение пластинчатых матриц. Гид-
равлическая система станка перемещает шток 4. Стенки
заготовки деформируются при одновременном уменьше-
нии ее длины. В результате деформации в пространстве
между пластинчатыми матрицами образуются гофры.

Величину требуемого формующего усилия можно найти из выражения

$$P = \frac{200\delta R}{d},$$

где δ — толщина стенки заготовки, мм; R — допустимое напряжение в материале заготовки, кг/мм², равное 0,7; d — внутренний диаметр заготовки, мм.

Отформованную заготовку промывают и для снятия внутренних напряжений, возникших при формовке гофров, отжигают при 290—320° С в течение 2 ч. Отжиг ведется в приспособлении, обеспечивающем постоянство геометрии гофра.

Завершающий этап — осаживание заготовки, обеспечивающее нагартровку материала стенок, что улучшает эксплуатационные свойства волновода. Осаживание ведется на оправке, которая вводится в полость волновода, сжатием его до заданной длины.

После осаживания проводят контроль геометрических размеров гофрированной круглой волноводной трубы (радиуса закругления гофра, шага гофра, максимального и минимального диаметра внутренней полости). Измерение радиуса внешнего закругления выступов и впадин производится на часовом проекторе в проходящем свете. Для перехода от внешних размеров к размерам рабочей полости необходимо знать толщину стенки. При этом следует учитывать, что в процессе гофрирования толщина стенки исходной заготовки изменяется неодинаково для различных сечений.

Для измерения толщины стенки гофрированного волновода по вершинам и впадинам используют предложенную А. Н. Гавриловым и Ю. Д. Лазутиным пневмоконтактную головку (рис. 3.19), состоящую из корпуса 1, ползуна 2, сопла 3, крышки 4, неподвижной и подвижной губок 5 и 6, пружины 7, оси 8, ручек 9 и 10, штуцера 11 и микровинта 12. В процессе измерений в зависимости от толщины стенки изменяется зазор a , что меняет давление в полости штуцера. Головка предварительно калибруется по шаблонам. Изменение давления, замеряемое манометрической системой, связывается с линейным перемещением подвижной губки.

Дальнейшая сборка гофрированной волноводной трубы с фланцами и нанесение покрытий на внешнюю и внутреннюю поверхности волновода аналогична процес-

4

124

198

горячей воде и удаляют слой воска с поверхности фланцев. На поверхность пакета наносят тонкий слой клея лейконат. Пакет шайб и фланцы опрессовываются резиной с одновременной ее вулканизацией в пресс-формах при 145°C в течение 50 мин под давлением не менее 50 кг/см^2 . Вначале вулканизации делают две-три подпрессовки для предотвращения образования пузырей и вздутий.

При изготовлении спиральных волноводов используют проволоку прямоугольного, треугольного или круглого поперечного сечения.

Отрезки спирального волновода небольшой длины (до 0,5 м) можно изготовить, применяя жесткие оправки, из легированной стали. На оправку — виток к витку — наматывается эмалированная проволока заданного поперечного сечения. Концы спирали привариваются к медным кольцам, которые припаяны к фланцам. Спираль обезжиренная, навитая на оправку и закрепленная у концевых колец покрывается несколькими слоями стеклоткани, которая в процессе намотки пропитывается эпоксидной смолой. На полученную каркасную оболочку накладывается поглощающая оболочка из стеклоткани с прослойкой из окиси олова или ацетиленовой сажи, которая в процессе наложения пропитывается эпоксидной смолой. На поглощающую оболочку накладывается слоистая оболочка из стеклоткани, пропитанная эпоксидной смолой.

Для получения удовлетворительных допусков в готовом изделии по всей длине волновода необходимо поддерживать постоянным соотношение между весом стекла и эпоксидной смолы в оболочках, а также неизменность натяжения стеклоткани при наложении. Прочные оболочки получают при объемном содержании стекла в стеклоткани 70—75%. Большое значение для получения требуемых допусков имеет процесс отвердевания смолы, при котором температура должна быть равномерной по всей длине и периметру волновода, для предотвращения коробления волновода за счет возникновения в его стенках неуравновешенных внутренних напряжений. Поэтому отверждение смолы целесообразно проводить в термощафах. После этого оправку извлекают из волновода, усилие при этом не превышает 200 кг. Средняя овальность полученных волноводов лежит в пределах 0,02—0,05 мм.

Далее следует шлифование и полировка внутренней поверхности головкой, показанной на рис. 1.53.

Для изготовления волноводов из чередующихся металлических и диэлектрических колец, а также спиральных волноводов применяется фотохимический метод. В этом случае используется диэлектрическая трубка с металлизированной внутренней поверхностью. Металлизацию осуществляют химическим меднением с последующим увеличением толщины медного осадка гальваническим путем (см. § 5.1). Поверхность этого осадка покрывают светочувствительной эмульсией, по составу аналогичной эмульсии, используемой при производстве печатных схем. Сушка эмульсии ведется при непрерывном вращении заготовки вокруг оси, что позволяет получить равномерный слой эмульсии. Затем в полость волновода вводят стеклянную трубку-модель. На ее прозрачной поверхности нанесено изображение колец или спирали. Трубка-модель подсвечивается изнутри. После экспонирования, проявления и травления в хлорном железе на внутренней поверхности диэлектрической трубки образуется требуемый металлизированный рисунок. Точность при этом методе в пределах 5—6-го класса. Себестоимость таких волновых фильтров на 30—35% ниже, чем сборных фильтров.

§ 3.4. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ОСЛАБИТЕЛЕЙ

Плавно-переменные ослабители поляризационного типа необходимы при различных измерениях на СВЧ. Их основные особенности следующие:

- величина вводимого ослабления не зависит от частоты и может быть рассчитана по угловому повороту вращающейся секции ослабителя;

- ослабление мощности до очень больших величин не зависит от удельного поверхностного сопротивления поглощающих пластин;

- ослабитель не вносит фазового сдвига в волну, проходящую через него;

- погрешность установления ослабления относительно начального очень мала и обычно не превышает 2—3% от величины вводимого ослабления;

ослабитель можно легко выполнить со шкалой прямоотсчетной по величине ослабления.

Изготовление ослабителей поляризационного типа, предназначенных для работы в сантиметровом диапазоне, не вызывает технологических трудностей. При переходе к коротким волнам миллиметрового диапазона в связи с очень малыми внутренними размерами используемых волноводов изготовление этого ослабителя усложняется: во-первых, трудно изготовить волноводные сек-

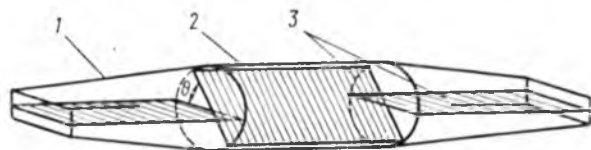


Рис. 3.20. Схематическое изображение поляризационного ослабителя:

1 — неподвижная секция; 2 — вращающаяся секция; 3 — поглощающие пластины

ции малого поперечного сечения и, во-вторых, разместить поглощающие пластины в неподвижных и вращающейся секциях поляризованного ослабителя.

Известно, что для получения малой величины начального затухания и кривой ослабления, близкой к расчетной, поглощающие пластины определенной длины с заданной величиной удельного поверхностного сопротивления должны быть точно размещены в диаметральных плоскостях неподвижных и вращающейся секций ослабителя, как показано на рис. 3.20.

Если ослабитель выполняется с выходами на прямоугольный волновод, то неподвижные секции представляют собой переход от волновода круглого сечения на прямоугольный. Смещение пластин от диаметральной плоскости увеличивает начальное ослабление и погрешность при установлении различных величин затухания.

Волноводные секции для поляризационных ослабителей, работающих в *сантиметровом* диапазоне, изготавливаются из двух половин и поглощающие пластины зажимаются между ними (рис. 3.21). Неподвижные или переходные секции изготавливают также отдельно, а продольные пазы для размещения пластин — протяжкой, как показано на рис. 3.22. При помощи режущей иглы

получаются продольные пазы в стенках волноводных труб.

В волноводах очень малого поперечного сечения применение секций сборной конструкции невозможно из-за больших потерь СВЧ мощности, а для получения пазов не удастся точно изготовить протяжку с иглой, так как их размеры становятся слишком малыми.

Изготовление поляризационного ослабителя, предназначенного для работы в миллиметровом диапазоне, состоит в следующем: вначале изготавливают керн с про-

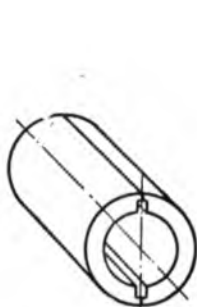


Рис. 3.21. Волноводная секция, выполненная из двух половин с пазом для поглощающей пластины

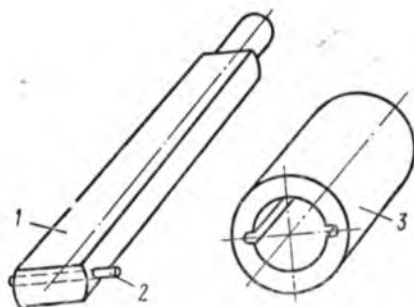


Рис. 3.22. Протяжка для изготовления продольных пазов:

1 — корпус протяжки; 2 — режущая игла;
3 — волноводная секция с продольными пазами

дольными выступами, расположенными точно по его центру. На керн надевается серебряная трубка и прокатывается. В результате получается волноводная секция с пазами, точно лежащими в диаметральной плоскости волновода, в которые затем вставляются слюдяные пластины. Точность размеров волноводной секции зависит от точности размеров керна. Для его изготовления используется пресс-форма, внутренняя поверхность которой представляет собой цилиндр (рис. 3.23) со впадинами, имеющими высоту (x) продольных пазов, получаемых в волноводной секции. Пресс-форма изготавливается из легированной стали ХВ1. Сопрягаемые поверхности ее деталей шлифуются. Для обеспечения их взаимной фиксации применяются штифты.

При изготовлении пресс-формы вначале обрабатывается цилиндрическое отверстие, равное внутреннему

диаметру вращающейся секции ослабителя. Оно должно быть строго симметрично относительно плоскости разъема. Затем заготовка пресс-формы разъединяется на две половины, каждую из которых сошлифовывают на величину $x/2$, где x — толщина поглощающей пластины, т. е. высота паза волноводной секции.

Заготовку керн закладывают в полость пресс-формы и обжимают на прессе. Заготовка керн при этом принимает форму круглого отверстия пресс-формы, а за счет зазора по всей ее длине на цилиндрическом керне образуется продольный выступ. Керн можно изготавливать из углеродистой стали (У8А).

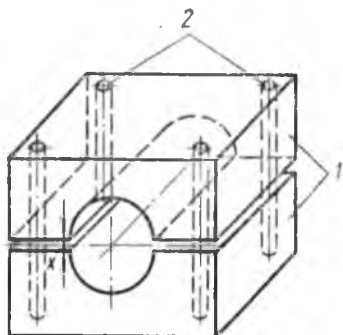


Рис. 3.23. Схематическое изображение пресс-формы: 1 — половины пресс-формы; 2 — шлифты

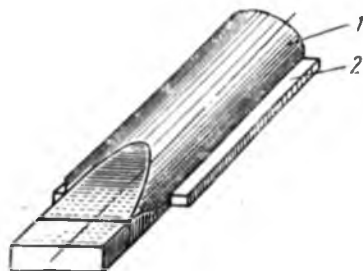


Рис. 3.24. Керн для изготовления неподвижной волноводной секции:

1 — корпус; 2 — продольный выступ

Для получения продольных выступов диаметр заготовки керн берется несколько больше диаметра вращающейся секции ослабителя. Излишки материала служат для образования продольных выступов на керне.

С помощью пресс-формы изготавливают два керн. Один используется для обкатки вращающейся секции, а второй — для обкатки неподвижных секций. В первом керне выступы, полученные после пресс-формы, обрабатываются по всей длине до получения необходимого размера.

Керн для изготовления деталей ослабителя в волноводе сечением $1,6 \times 0,8$ мм должен иметь выступ не более 0,1 мм. В керне для изготовления неподвижных секций шлифовкой выполняются переходы от волновода

прямоугольного сечения на круглый, как показано на рис. 3.24. Затем проводится термическая обработка и окончательная доводка обоих кернов.

Для изготовления неподвижной и вращающейся секций ослабителя берут цилиндрическую заготовку из серебра (ее длина выбирается

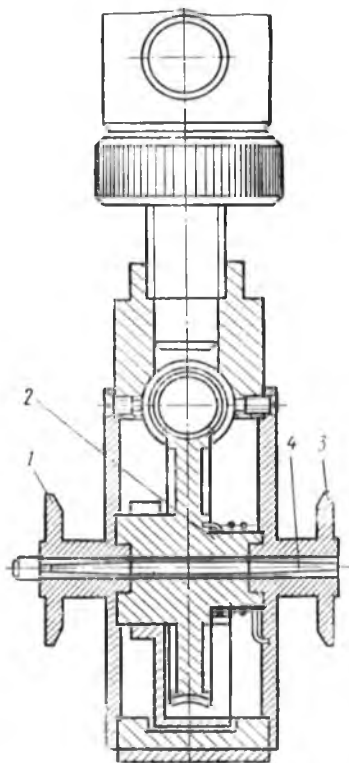


Рис. 3.25. Конструкция поляризованного ослабителя:

1, 3 — неподвижные секции; 2 — вращающаяся секция; 4 — поглощающая пластина

в зависимости от длины неподвижной и вращающейся секций ослабителя) и сверлят в ней сквозное отверстие, в которое свободно входит керна вместе с продольными выступами. Затем заготовка надевается на керна и производится обкатка ее на вальцах до полного обжатия керна, после чего заготовку с керна снимают. В полученный отрезок круглого волновода с двумя продольными пазами (рис. 3.25) вставляются слюдяные пластины, покрытые тонким слоем поглощающего материала. Волноводные секции при помощи кондуктора и оправок собираются в обоймы, служащие корпусом поляризационного ослабителя.

Этим способом пользуются при изготовлении поляризационных ослабителей на волноводах сечением $1,1 \times 0,55$ и $1,6 \times 0,8$ мм. Конструкция ослабителя показана на рис. 3.25. Поляризационные ослабители состоят из трех секций: двух неподвижных с длиной 14 мм и

одной вращающейся 18 мм. В качестве поглощающего материала использована телевизионная калиброванная слюда марки Ж, с толщиной примерно 30 мкм. С одной стороны она покрывается тонким слоем платины, величина поверхностного сопротивления такого слоя

300 ом/см². Для уменьшения КСВН пластины слюды, вставленные в ослабитель, имеют скосы с двух сторон под углом 45°. Для отсчета ослабления ослабитель имеет прямоотсчетную шкалу.

Аналогично можно изготовить ферритовые вентили, основанные на эффекте Фарадея, и эталонные нагрузки в коротковолновой части миллиметрового диапазона.

§ 3.5. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ВОЛНОВОДНЫХ ФЕРРИТОВЫХ УСТРОЙСТВ СВЧ

Технология изготовления устройств СВЧ, содержащих ферриты, заключается в установке в волноводный корпус ферритовых вкладышей и креплении на нем постоянных магнитов. Ферритовые вкладыши устанавливаются в канал волновода двумя способами: а) с помощью диэлектрической (фторопластовой, пенопластовой) арматуры; б) прикрепляют непосредственно к стенке волновода.

Первый способ сводится к изготовлению деталей арматуры, сборке ее с ферритом в пакет и установке его в канал.

Второй предусматривает приклеивание или пайку ферритовых вкладышей к стенкам волновода. При выборе клеев надо учитывать следующие требования:

1) соединение не должно существенно увеличивать потери СВЧ энергии в устройстве;

2) соединение должно сохранять механическую прочность при крайних рабочих температурах;

3) температурный коэффициент линейного расширения клея не должен существенно отличаться от ТКЛР материала стенок волновода;

4) клей должен иметь незначительную усадку;

5) желательно применять технологичные клеи, не требующие для получения качественных клеевых швов высоких температур и давлений.

При вклеивании ферритовых вкладышей необходимо обеспечить контролируемое и равномерное давление на феррит. При недостаточных давлениях клеевые швы получаются толстые, с пониженной теплопроводностью, неплотные.

При завышении давления могут возникнуть внутренние напряжения. Неравномерность давления на раз-

личных участках ферритового вкладыша ведет к его перекосу и смещению.

Постоянное и равномерное давление обеспечивается специальным пневматическим приспособлением.

Приспособление состоит из эластичного баллона, соединенного с магистралью сжатого воздуха через редуктор. Баллон устанавливается в базирующую кассету, в одной из стенок которой имеются окна для постановки ферритовых вкладышей. На поверхность ферритовых вкладышей наносится слой клея, кассета вдвигается в волновод и фиксируется в его фланце. После установки кассеты в баллоне создается повышенное давление. Вкладыши прижимаются к поверхности волновода. Усилие прижима остается неизменным в процессе склеивания. Приспособление обеспечивает высокую точность постановки ферритовых вкладышей в полости волновода. Во избежание прилипания к волноводу и ферритовым пластинам поверхность кассеты покрывается фторопластовым лаком.

Большое значение имеет способ нанесения клея на пластины. При слишком тонком слое шов получается неоднородным, содержит газовые включения. Излишек при толстом слое клея вытекает на поверхность волновода, затрудняя извлечение приспособления, вызывая рост потерь и уменьшение электропрочности. Поэтому необходима строгая дозировка клея.

Для крепления ферритов к стенкам волноводов кроме приклеивания используется пайка. Непосредственная пайка феррита с металлом невозможна. Поэтому поверхность феррита вначале металлизуют. Наиболее широко применяется металлизация поверхности феррита вжиганием. При этом на поверхность феррита наносится паста, содержащая химические соединения серебра (AgCO_3 или Ag_2O), легкоплавкое неорганическое стекло и органическую связку. Процесс вжигания серебра основан на том, что при нагревании серебро восстанавливается до металла и прочно сцепляется с поверхностью феррита легкоплавким стеклом (плавнем).

Технологический процесс металлизации вжиганием состоит в следующем. На поверхность феррита после очистки наносится паста и изделие помещается в печь.

После доведения температуры печи до $250\text{--}320^\circ\text{C}$ дается выдержка, необходимая для химического разло-

жения (выгорания) органической связки. Выдержка необходима для того, чтобы избежать бурного газоотделения при выгорании связки и сохранить целостность слоя пасты. Во второй стадии при $350\text{--}500^\circ\text{C}$ происходит восстановление серебра.

После десятиминутной выдержки температура печи повышается. При этом расплавляется вначале борат свинца, а затем окись висмута, входящие в плавень. Образуется коллоидное соединение металлического серебра с плавнем, имеющее температуру плавления ниже температуры плавления чистого серебра.

Вжигание серебра в феррит начинается при 600°C . Оптимальная температура вжигания — 750°C . Выше 850°C температуру поднимать нельзя, так как плавень вместе с серебром начинает испаряться, расплавленное серебро стягивается в капли за счет поверхностного натяжения и слой металлизации разрушается.

Сцепление достигается за счет проникновения металла в поры феррита.

Однократное вжигание дает слой металла толщиной в 5 мкм , которую можно увеличить до 20 мкм повторным вжиганием. Прочность такого слоя на отрыв достигает $30\text{--}35\text{ кг/см}^2$. Толщину слоя серебра увеличивают и электролитическим путем.

Пайка ферритовых вкладышей с металлизированной поверхностью к стенке волновода ведется с использованием фиксирующих оправок, прижимающих феррит к стенке волновода. При этом, чтобы избежать появления внутренних напряжений в феррите, желателен равномерный нагрев всей сборки до температуры пайки и постепенное ее остывание.

Большое число волноводных устройств содержат ферриты, работающие в постоянном магнитном поле, которое создается постоянными магнитами, закрепленными на волноводе. Магниты приклеивают к стенке волновода.

К склеиваемым веществам предъявляются следующие требования:

- 1) высокая прочность клеевого соединения;
- 2) способность сохранять прочность в заданном интервале температур и механических воздействий;
- 3) совместимость ТКЛР клея и соединяемых элементов. Для приклеивания магнитов хорошие результаты дает следующий состав, *вес. ч.*:

эпоксидная смола ЭД-5	150
полиэфир ненасыщенный МГФ9 . . .	100
карбоксилатный каучук СКН10-5 . .	100
полиэтиленполиамин	21

Эпоксидную смолу, полиэфир МГФ-9 и каучук, подогретые до 50° С, смешивают, вводят полиэтиленполиамин и тщательно перемешивают до однородной по цвету и консистенции массы. Присутствие каучука СКН10-5 в составе компаунда обеспечивает его эластичность, хорошую морозоустойчивость и устойчивость к резким колебаниям температуры.

Поверхность магнита тщательно обезжиривается. Изделие нагревается до 33—40° С в течение 1 ч, затем заливается компаундом, который отверждается при комнатной температуре в продолжение суток с последующим термостатированием при 50—60° С около двух суток. Этот компаунд не вызывает потемнения серебра при длительном контакте с ним и имеет незначительную (не более 0,5%) усадку. Однако затруднительна заливка в узкие отверстия и длителен процесс полимеризации.

После заливки для увеличения влагостойкости узлы покрывают лаком УР-231 или Э-4100.

При электрической регулировке узлов магниты перед заливкой устанавливаются в строго определенном положении с помощью оправок и крепятся эпоксидным клеем холодного отверждения. Для увеличения прочности шов армируется слоем стеклоткани.

Магниты можно закреплять намоткой стеклоткани, покрытой эпоксидным клеем следующего состава, *вес. ч*:

эпоксидная смола ЭД-6	100
диоксид титана	30
дибутилфталат	15
полиэтиленполиамин	10—12

Ленту стеклоткани шириной 20—30 мм, промазанную с одной стороны эпоксидным клеем, накладывают на внешнюю поверхность магнита в 3—4 слоя. После отверждения клея при 22—25° С в течение 2—3 ч, а затем при 60—70° С в продолжение 1,5—2 ч изделие подвергается механической обработке и окрашивается.

КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЯ ВОЛНОВОДНЫХ УСТРОЙСТВ

§ 4.1. КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Контроль геометрических размеров волноводных устройств ведется как в процессе производства, так и во время выпуска. Результаты контроля используются для корректирования и стабилизации технологического процесса изготовления с тем, чтобы обеспечить требуемые электрические параметры, зависящие от геометрических размеров волноводного устройства.

Контроль этих размеров состоит в следующем: а) контроль геометрических параметров канала волновода; б) контроль положения контактной поверхности волноводного фланца относительно оси волновода; в) контроль взаимного расположения фланцев волноводного устройства; г) контроль габаритов волноводного устройства.

Для контроля геометрических размеров волноводных устройств используются: а) калибры; б) индукционные датчики; в) воздушные калибры; г) индикаторные нутромеры; д) автоколлиматоры; е) шаблоны и макеты.

Наиболее распространен контроль геометрических размеров с использованием проходных и непроходных *калибров*. Однако он не дает сведений о действительной геометрии канала волновода, а убеждает лишь в том, что его размеры лежат в определенных пределах. Кроме того, его применение затруднительно при контроле волноводов большой протяженности.

Рассмотрим способ контроля прямоугольных волноводов с использованием *индуктивного датчика* (рис. 4.1),

который состоит из корпуса 1, катушки индуктивности 2, каркаса 3, подвижного сердечника 4 и пружины 5.

При перемещении датчика по волноводу и изменении контролируемого размера сердечник 4 вдвигается в катушку или выдвигается из нее. Результирующее изменение индуктивности можно легко зафиксировать. Этот способ дает более точные сведения о состоянии канала волновода, но контролирует относительно узкую область, обычно в середине стенок волновода.

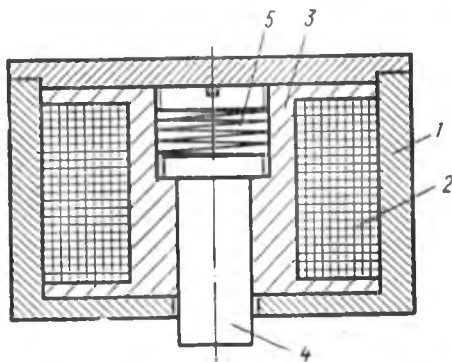


Рис. 4.1. Индуктивный датчик

Применение *воздушных калибров* (рис. 4.2) обеспечивает высокую точность измерений, с их помощью можно контролировать волноводы большой протяженности. Этот способ основан на изменении давления воздуха в шланге 10 при изменении зазора между калибром 11 с выходными соплами и стенками канала волновода 13. Изменение давления воздуха контролируется точным индикатором 6, проградуированным в единицах длины. Чувствительным элементом манометра является диафрагма 7, реагирующая на разность давления в подводящем канале и исходного (калиброванного) давления.

Этим способом легко достигается точность измерений порядка 0,001 мм в диапазоне $\pm 0,075$ мм.

На рис. 4.3 показан общий вид калибров. Действительными «калибровочными» точками, в которых воздух под давлением вводится в волновод, являются небольшие отверстия на поверхности калиброванных пробок.

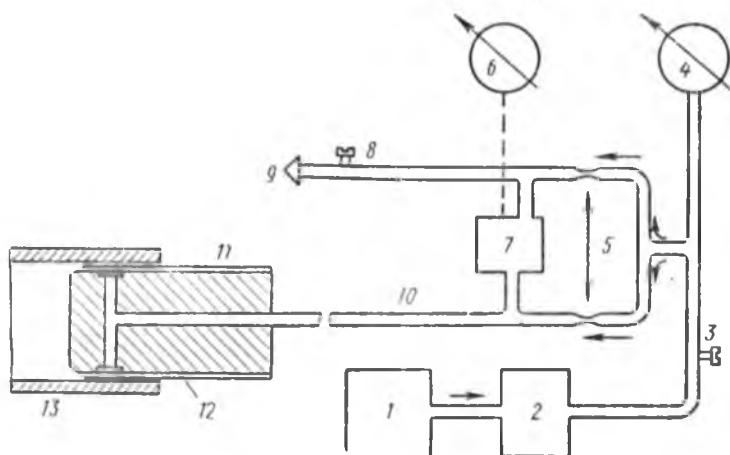


Рис. 4.2. Схема измерений размеров волновода с помощью воздушных калибров:

1 — компрессор; 2 — фильтр очистки воздуха; 3 — регулировочный винт; 4 — манометр; 5 — калиброванное отверстие; 6 — индикатор; 7 — диафрагма; 8 — калибровочный винт; 9 — выход в атмосферу; 10 — шланг; 11 — калибр; 12 — выпускной канал; 13 — волновод

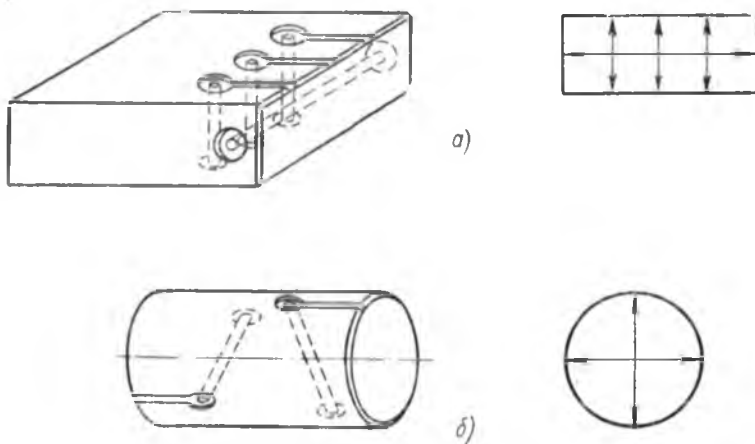


Рис. 4.3. Воздушные калибры для проверки:

а — прямоугольных волноводов; б — круглых волноводов

Для крупных круглых головок разработано специальное рычажное устройство (рис. 4.4), позволяющее расширить измеряемый диапазон до 0,25 мм. Рычажное устройство работает таким образом, что щупы Х-образного рычага соприкасаются с поверхностью, а калибр измеряет давление воздуха на противоположных концах рычагов. Конструкция щупов допускает их перемещение в довольно широких пределах.

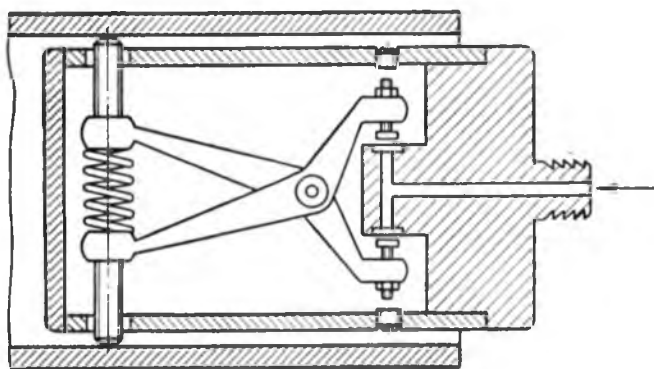


Рис. 4.4. Рычажное устройство для расширения диапазона измерений воздушных калибров

Все калибры для проверки размеров прямоугольных волноводов работают по принципу непосредственного измерения давления воздуха. Однако они отличаются от круглых головок тем, что одновременно измеряют несколько размеров. Это означает, что в каждой прямоугольной головке три-четыре независимые измерительные системы. Для прямоугольных калибров необходимо иметь три или четыре отдельных шланга с индикаторами. Круглые головки могут быть повернуты в любой точке на всем протяжении волновода для проверки его геометрии в различных сечениях.

Рассмотренные способы используются для контроля прямоугольных волноводов с размерами канала не менее $11 \times 5,5$ мм. При этом ограничивающим фактором является сложность датчиков и возрастающая погрешность измерений.

Для контроля каналов волноводов меньшего поперечного сечения (до миллиметрового диапазона) исполь-

зуются различные *индикаторные нутромеры*, с помощью которых можно измерять каналы диаметром до 3 мм на длине 400 мм и контролировать изогнутые секции при радиусе гибки до 20 мм. Общий вид нутромера показан на рис. 4.5. Перед введением датчика в полость волновода индикатор 1 устанавливают в нужном положении при ослаблении цапги 4, запрессованной одним

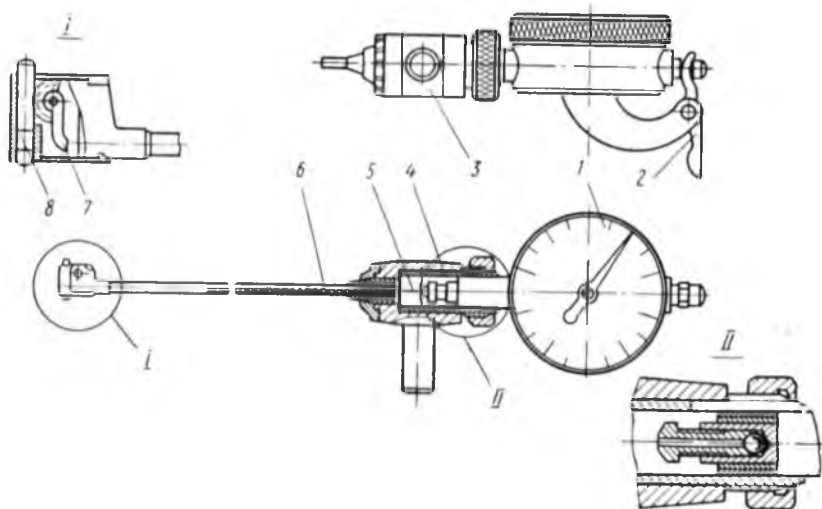


Рис. 4.5. Нутромер для контроля размеров полости волноводов миллиметрового диапазона

концом в корпус 3. Затем нажатием арретира 2 стержень 5, связанный с измерительным штифтом индикатора, перемещается вправо и выводится из соприкосновения с одним из плеч рычага 7, благодаря чему подвижный штифт 8 свободно утапливается в корпусе датчика. После введения измерительного датчика в волновод арретир 2 освобождается и подвижный штифт 8 упирается в стенку волновода, фиксируя его размер в данном сечении. Результаты измерения считываются с индикатора 1. Прибор арретируется при каждом перемещении датчика. При использовании индикатора с ценой деления 0,01 мм погрешность измерений составляет $\pm 0,005$ мм.

Для измерения изогнутых участков волновода стержень 5 помещается в эластичную трубку 6, изгибающуюся

щуюся при перемещении датчика. Прибор устанавливается на специальном штативе, на котором крепится измеряемый волновод.

Автоколлимационные способы контроля взаимного расположения элементов волноводного устройства основаны на возможности точного (до десятых долей секунды) измерения углов с помощью автоколлиматоров.

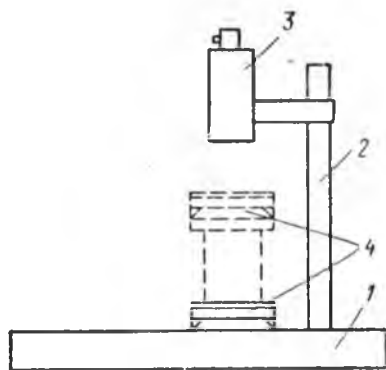


Рис. 4.6. Приспособление для контроля параллельности контактных поверхностей волноводных фланцев для секций малой протяженности

Контроль параллельности фланцев волноводов с габаритами порядка 200—300 мм удобно проводить на приспособлении, состоящем из плиты 1 со стойкой 2, на которой закреплен автоколлиматор 3 (рис. 4.6). На плиту устанавливается зеркало 4, а автоколлиматор выставляется перпендикулярно отражающей поверхности зеркала и закрепляется в этом положении. Затем на место накладного зеркала устанавливается контролируемое волноводное устройство, на фланце которого укрепле-

но накладное зеркало 4. Измеряется неперпендикулярность зеркала к оси автоколлиматора, которая равна контролируемой непараллельности фланцев.

Непараллельность фланцев контролируется сразу в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. В этом случае точность контроля определяется точностью измерения угла автоколлиматором (среднее квадратическое отклонение этой погрешности обозначим σ_φ), и точностью установки накладного зеркала и волновода на приспособлении. Она зависит от расстояния между опорами накладного зеркала, неплоскостности плиты 1 и фланцев. Полагая, что поверхности плиты и фланцев имеют минимальную неплоскостность, и отбрасывая погрешности установки, найдем суммарную погрешность σ_Σ контроля параллельности фланцев:

$$\sigma_\Sigma = \sigma_\varphi \sqrt{2}.$$

При контроле параллельности фланцев волноводов, имеющих длину от 300—400 и более миллиметров, на фланцы волновода укрепляются накладные зеркала 1 и 2 (рис. 4.7, а). Контролируемый волновод 3 укрепляется на плоской опоре 4 (размеры опоры и схему закрепления надо выбрать так, чтобы не возникали деформации волновода, которые могут исказить результат контроля). Автоколлиматор 5 выставляется перпендикулярно зеркалу 1 и закрепляется в этом положении. Затем зеркало удаляется и по автоколлиматору измеряется перпендикулярность зеркала 2 оси, этим определяется искомая непараллельность фланцев.

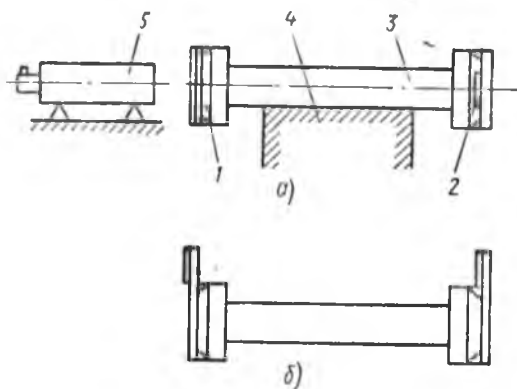


Рис. 4.7. Приспособление для контроля параллельности контактных поверхностей фланцев для волноводов:

а — с большими размерами поперечного сечения; б — с малыми размерами поперечного сечения

Если линейный размер канала волновода меньше 25—30 мм, то накладные зеркала целесообразно выполнять так, чтобы отражающая поверхность располагалась вне опор (рис. 4.7, б). Точность контроля по сравнению с предыдущим случаем (рис. 4.7) зависит и от точности изготовления накладных зеркал, отражающая поверхность которых должна быть параллельна плоскости касательной к опорам зеркала. Если принять, что погрешность изготовления накладного зеркала имеет максимальное значение Δ , то предельная ошибка контроля

$$\Delta_{\max} = 2\Delta + 3\sigma_z \approx 2\Delta + 4,5\sigma_z.$$

Точность контроля можно повысить, если использовать аттестованные накладные зеркала и в результате контроля вводить соответствующие поправки.

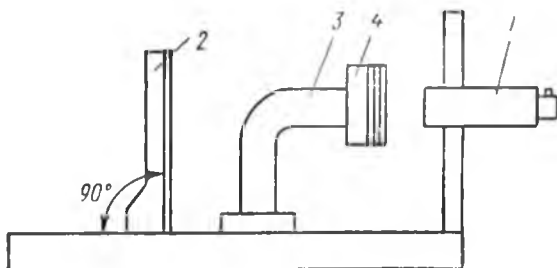


Рис. 4.8. Приспособления для контроля перпендикулярности контактных поверхностей фланцев секций малой протяженности

Контроль перпендикулярности фланцев небольших волноводов можно проводить на приспособлении для контроля параллельности (рис. 4.8). Для этого автоколлиматор 1 с помощью эталонного зеркального угольника

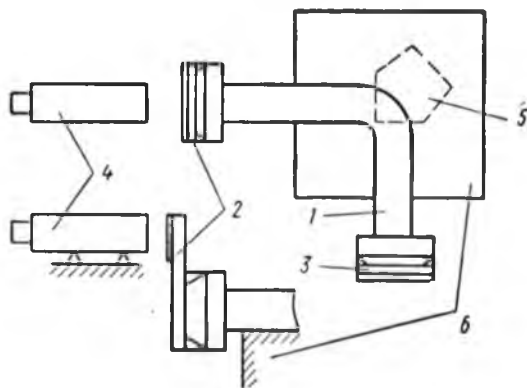


Рис. 4.9. Приспособление для контроля перпендикулярности контактных поверхностей фланцев секций большой протяженности

пика 2 выставляется параллельно рабочей поверхности приспособления. Затем на место угольника устанавливается контролируемый волновод 3, на фланце которого укреплено накладное зеркало 4. Искомая величина не-

перпендикулярности фланцев равна измеренной перпендикулярности зеркала 4 оси автоколлиматора.

Контроль перпендикулярности фланцев длинных волноводов можно вести, как показано на рис. 4.9. Волновод 1 с укрепленными на фланцах накладными зеркалами 2 и 3 крепится на опоре 6. Автоколлиматор 4 выставляется перпендикулярно зеркалу 2. Затем зеркало 2 снимается, в месте изгиба волновода помещается пентапризма 5, с помощью которой лучи из автоколлиматора направляются на зеркало 3, что позволяет измерить параллельность оси автоколлиматора. Измеренная величина непараллельности равна контролируемой перпендикулярности фланцев.

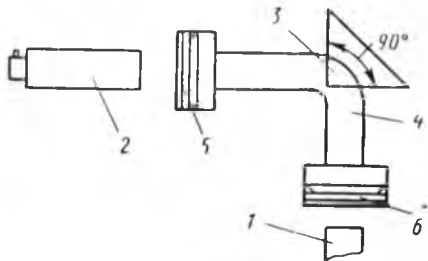


Рис. 4.10. Приспособление для контроля перпендикулярности контактных поверхностей фланцев с помощью двух автоколлиматоров

Более производительен контроль с двумя автоколлиматорами 1 и 2 (рис. 4.10), которые с помощью угловой меры 3 (или теодолита, точного поворотного стола с зеркалом, оптической делительной головки или другого угломерного прибора) выставляются под углом 90° . Затем вместо угловой меры 3 устанавливается волновод 4 с укрепленными на фланцах накладными зеркалами 5 и 6. Волновод выставляется так, чтобы зеркало 5 было перпендикулярно оси автоколлиматора 1. В этом положении волновода по автоколлиматору 2 измеряется перпендикулярность зеркала 6 оси автоколлиматора, которая является искомой перпендикулярностью фланцев.

Точность контроля перпендикулярности фланцев по схеме рис. 4.8, кроме погрешностей, вносимых автоколлиматором, зависит и от точности изготовления пентапризмы.

Для контроля любого плоского угла между фланцами волновода малых размеров можно воспользоваться приспособлением (см. 4.6) с той лишь разницей, что автоколлиматор 3 с помощью набора угловых мер вы-

ставляется на величину контролируемого угла относительно рабочей поверхности плиты приспособления.

Угол в плоскости между фланцами длинных волноводов удобно контролировать по схеме рис. 4.10. Для этого автоколлиматоры выставляются так, чтобы угол между их осями был равен контролируемому углу. Далее контроль не отличается от контроля перпендикулярности. Для контроля углов между фланцами, заданными в двух плоскостях, целесообразно использовать поворот-

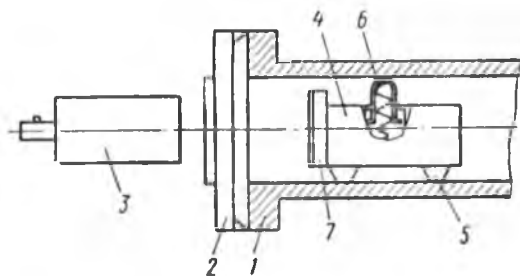


Рис. 4.11. Приспособление для контроля перпендикулярности контактной поверхности волноводного фланца к оси волновода

ные приспособления, дающие возможность поворота и измерения углов в двух плоскостях (например, универсальный поворотный стол координатно-расточного станка). В этом случае, контролируемый волновод закрепляется в приспособлении, на фланцах волновода укрепляются накладные зеркала.

Автоколлиматор выставляется перпендикулярно одному из зеркал, с угломерных шкал приспособления снимаются отсчеты. Затем поворотом приспособления добиваются такого положения волновода, при котором второй фланец займет положение, перпендикулярное оси автоколлиматора. В этом положении по шкалам приспособления снимаются отсчеты. Их разность по соответствующим шкалам определяет величину угла между фланцами.

Для контроля перпендикулярности оси канала к фланцу волновод 1 с укрепленным на фланце накладным зеркалом 2 неподвижно устанавливается на опоре, а автоколлиматор 3 выставляется перпендикулярно зеркалу (рис. 4.11). Затем зеркало 2 снимается, а в канал

волновода вводится оправка 4, состоящая из корпуса, трех плоских опор 5, зеркала 7 и прижима 6 (контакт опор с поверхностью волновода). Далее измеряется перпендикулярность зеркала оправки 4 оси автоколлиматора, которая равна перпендикулярности оси отверстия и фланца. При этом предполагают, что внутренняя поверхность волновода, на которую устанавливается оправка 4, параллельна оси канала волновода. Если канал имеет погрешности формы или геометрии, то для получения точного результата контроля надо после снятия первого замера вынуть оправку и, повернув на 180° , вновь ввести в канал и снять второй отсчет. Тогда искомая перпендикулярность будет равна полуразности этих двух замеров. При этом из результата контроля автоматически исключается погрешность изготовления оправки 4.

При выборе автоколлиматора необходимо учитывать два фактора: а) максимально возможное отклонение контролируемого параметра, определяющее поле зрения автоколлиматора, которое должно быть в 4—5 раз больше возможного отклонения; б) допустимую погрешность измерения, определяющую необходимую точность измерения угла по автоколлиматору. Если она не задана, то погрешность можно принять равной одной трети допустимого отклонения. Тогда необходимая для обеспечения точности контроля средняя квадратическая погрешность измерения углов по автоколлиматору определяется из следующего выражения

$$\sigma_{\varphi} < \frac{\delta}{3\sqrt{2}} \approx 0,2\delta,$$

где δ — допустимое отклонение контролируемого параметра.

Применение автоколлиматоров для контроля геометрических размеров волноводных устройств обеспечивает универсализм, позволяющий контролировать различные случаи расположения поверхностей отдельных волноводов и секций, состоящих из двух или более волноводов, простоту контроля, высокую точность и стабильность контроля, которые обуславливаются высокой точностью измерения углов с помощью автоколлиматора.

Недостатком является необходимость пересчета допустимых отклонений в угловые величины.

Расположение крепежных отверстий во фланце относительно канала волновода контролируется с помощью шаблона (рис. 4.12), который базируется по окну волновода. При этом проходные калибр-пробки должны войти во все крепежные отверстия.

При контроле внешней геометрии волноводного элемента используются шаблоны (рис. 4.13) и макеты. Макет представляет собой отображение того блока, куда устанавливается данное волноводное устройство. Точность изготовления проверяют постановкой контролируемого устройства в макет.

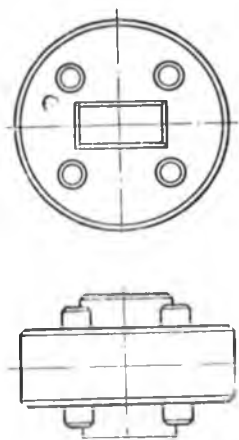


Рис. 4.12. Шаблон для контроля расположения крепежных отверстий во фланце

В процессе производства кроме прямого контроля геометрических размеров волноводных устройств используется и косвенный. Он заключается в периодической проверке шаблонов, оправок, инструмента, с помощью которых изготавливается или собирается устройство. Особенно важна такая проверка при изготовлении скруток, двойных тройников, плавных переходов, гибридных колец и т. д., так как их контроль непосредственным путем невозможен.

Окончательно судить о годности или браке волноводного устройства позволяет электрический контроль его параметров.

Основную группу устройств СВЧ составляют оконечные и проходные устройства — аналоги двухполюсников и четырехполюсников. К ним относятся всевозможные отрезки линий передачи, фильтры, аттенюаторы, нагрузки и т. д.; Т-образные разветвители, двойные тройники и направленные ответвители относятся к проходным элементам со многими подводщими линиями. Величинами, характеризующими передачу энергии по элементам устройств СВЧ, являются комплексные коэффициенты отражения $\rho = |\rho| e^{j\varphi}$ и передачи $\tau = |\tau| e^{j\varphi}$. Они определяют относительные величины отраженной и проходящей волн соответственно.

Для описания свойств двухполюсника достаточно знать волновое сопротивление линии передачи, на базе которой он построен (определяется геометрическими размерами), и комплексный коэффициент отражения от входа в рабочем диапазоне частот.

Большинство параметров, используемых в СВЧ для характеристики свойств двухполюсников и четырехполюсников, можно найти при известных комплексных

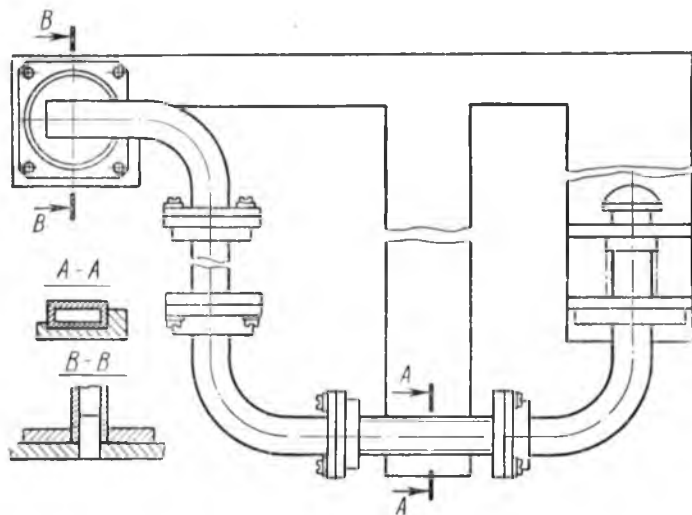


Рис. 4.13. Шаблон для контроля внешней геометрии волноводного тракта

коэффициентах отражения и передачи. Поэтому общим является измерение этих величин при электрическом контроле элементов устройств СВЧ.

Приборы, используемые для измерения комплексных коэффициентов передачи и отражения, можно разделить на три основных группы: *неавтоматические, полуавтоматические и автоматические*.

Неавтоматические приборы позволяют получать некоторые промежуточные данные и путем последующих расчетов требуемые значения, а полуавтоматические — непосредственно измеряемые значения, но перед каждым измерением они требуют специальной настройки.

Автоматические приборы не требуют специальной настройки, за исключением периодической калибровки.

Измерители параметров устройств СВЧ можно разделить на следующие группы:

1) использующие информацию электромагнитного поля в линии, т. е. измеряющие минимум и максимум поля и их положение в линии относительно некоторой опорной плоскости (измерительная линия с перемещающимся или неподвижным зондом, поляризационный измеритель с вращающимся зондом, многозондовая линия и т. д.);

2) отношения амплитуд падающей и отраженной волн (рефлектометры);

3) сравнивающие измеряемую нагрузку с образцовой (мостовые приборы);

4) основанные на принципе переноса измерения с диапазона СВЧ в диапазон низких частот (например, на промежуточную частоту).

Аппаратура для измерения электрических параметров СВЧ устройств делится на *переносную*, т. е. предназначенную для измерения в лабораторных, цеховых условиях и на полигонах; *встроенную*, т. е. жестко закрепленную в системах контроля устройств; *стационарную*, используемую в лабораториях проверки и контроля.

Приборы для измерения параметров в устройствах с распределенными постоянными (группа *P*) делятся на четыре подгруппы: а) линии измерительные; б) измерители коэффициента стоячей волны и коэффициента отражения; в) измерители полных сопротивлений и проводимостей; г) измерители затуханий.

Электрический контроль — основной вид контроля элементов высокочастотного тракта, дающий объективную характеристику функциональных параметров устройства.

§ 4.2. ИСПЫТАНИЯ ВОЛНОВОДНЫХ УСТРОЙСТВ

Под испытаниями волноводов понимается проверка устойчивости их эксплуатационных характеристик при воздействии механических (вибрации, линейные ускорения и удары) и климатических (температура, влажность, атмосферное давление, действие солнечных лучей и т. д.)

факторов. Поэтому испытания делятся на *механические* и *климатические*. Они необходимы для выявления ошибок при проектировании и изготовлении волноводных устройств, для определения и предотвращения причин отказов.

Механические испытания волноводных устройств служат для проверки их прочности. Их характер определяется условиями эксплуатации.

Проверку эксплуатационных характеристик устройства осуществляют в процессе механических испытаний и после них.

В табл. 4.1 приведены ориентировочные значения параметров механического воздействия на аппаратуру в процессе эксплуатации.

Таблица 4.1

Вид аппаратуры	Вибрация		Центробежное ускорение, g	Действие удара, g
	частота, $гц$	ускорение, g		
Передвижная на наземных транспортных средствах	2—80	4—1	До 6	До 10
Полустационарная	2—80	4—1	Нет	20—75
Выносная	2—80	6—3	»	100—120
Бортовая	3—400	2—10	6—9	5—10
Корабельная	5—35	До 1,5	Нет	7—12

Механические испытания предусматривают проверку устойчивости волноводного устройства к воздействию механических перегрузок. Под их воздействием возможно нарушение механической прочности волноводного устройства в местах пайки, самоотвинчивание гаек крепежных виштов, нарушение электрической и воздушной герметизации, отслаивание и растрескивание лакокрасочных покрытий.

При воздействии вибраций возможно совпадение собственной частоты колебаний устройства с частотой вибрации, что вызовет полное его разрушение.

Испытание на воздействие вибрации, проверка вибропрочности и виброустойчивости производятся на различных вибростендах. Наиболее простым является эксцентрикый вибростенд (рис. 4.14). При вращении эксцентрика развивается центробежная сила, под действием

которой платформа совершает возвратно-поступательное движение в вертикальной плоскости. Это движение через систему пружин передается на платформу, к которой прикрепляется испытуемый узел. Частота вибрации регулируется изменением числа оборотов эксцентрика и не превышает 100 гц, амплитуда — изменением рабочей длины передаточных пружин.

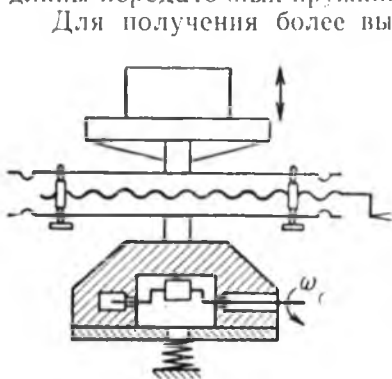


Рис. 4.14. Схема эксцентрикового вибростенда

Для получения более высоких частот вибрации используются центробежные вибростенды с неуравновешенными эксцентриками (рис. 4.15), которые вращаются с одинаковой скоростью в противоположные стороны. Вертикальные составляющие их центробежных сил вызывают колебание платформы в вертикальной плоскости. Амплитуда колебаний платформы может регулироваться смещением одного из эксцентриков вокруг оси от-

носительно его начального положения. Частота колебаний меняется за счет изменения числа оборотов эксцентриковой пары и достигает 500 гц.

Для получения колебаний в диапазоне от десятков до тысяч герц используются электродинамические вибростенды, основой которых является постоянный магнит в зазоре, между его полюсными наконечниками расположена катушка, скрепленная с платформой. При пропускании переменного тока через катушку в результате взаимодействия магнитных полей катушка приобретает возвратно-поступательное движение в вертикальной плоскости.

Ударные прочность и устойчивость аппаратуры проверяются на ударных стендах. Наиболее простым является эксцентриковый ударный стенд (рис. 4.16). Платформа *P* с испытуемым узлом *Q* периодически поднимается эксцентриком *Э* и падает на амортизаторы *L*. Платформа крепится на направляющих *N*. Перегрузка при ударе определяется высотой *H* свободного падения и упругими свойствами амортизаторов.

Испытания на воздействие линейных ускорений производятся на центрифугах.

Климатические испытания предназначены для определения степени влияния окружающей среды на эксплуатационные параметры волноводного устройства.

Под действием высокой и низкой температуры может происходить разрушение некоторых конструктивных материалов волноводного устройства или недопустимое

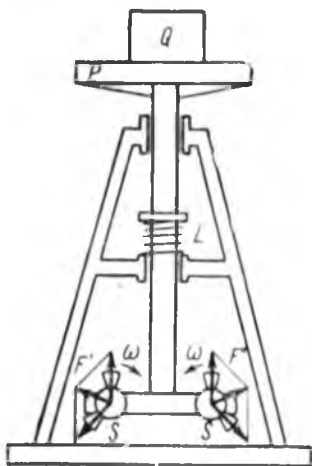


Рис. 4.15. Схема центробежного вибростенда: Q — испытуемый узел; P — платформа; L — демпфер; S — эксцентрики; ω — угловая скорость эксцентрика; F' и F'' — центробежные силы

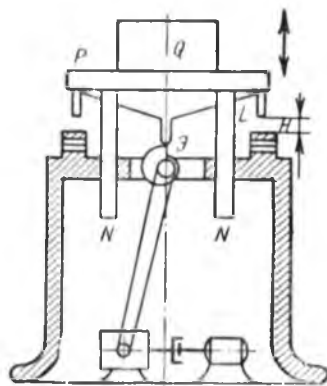


Рис. 4.16. Схема эксцентрикового ударного стенда

изменение их эксплуатационных характеристик. Особенно это справедливо в отношении диэлектриков.

На рис. 4.17, 4.18, 4.19 приведены кривые, характеризующие зависимость тангенса угла диэлектрических потерь и пробивной напряженности некоторых высокочастотных диэлектриков от температуры, а также зависимость ϵ воздуха от температуры. Из графиков видно, что рассматриваемые параметры диэлектриков значительно изменяются с изменением температуры; это отражается на электрических характеристиках волноводных устройств, в которые они входят.

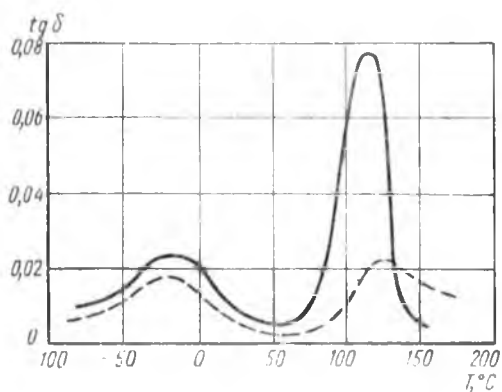


Рис. 4.17. Зависимость $\text{tg } \delta$ от температуры для полистирола (сплошная линия) и полиэтилена (пунктир)

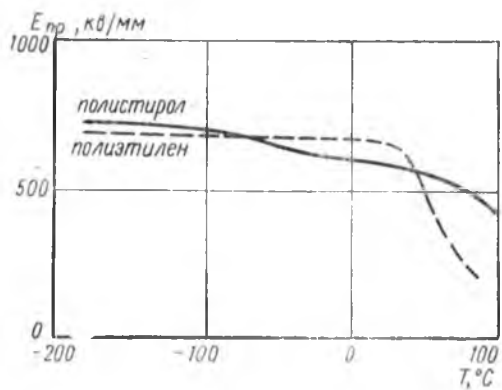


Рис. 4.18. Зависимость напряженности пробоя от температуры для полистирола (сплошная линия) и полиэтилена (пунктир)

Температурное изменение геометрических размеров волноводных устройств может быть причиной изменения электрических характеристик. Это относится к полым резонаторам.

При наличии в волноводе деталей с разными ТКЛР под влиянием изменения температуры возможно нарушение механической прочности устройства и выход его из строя.

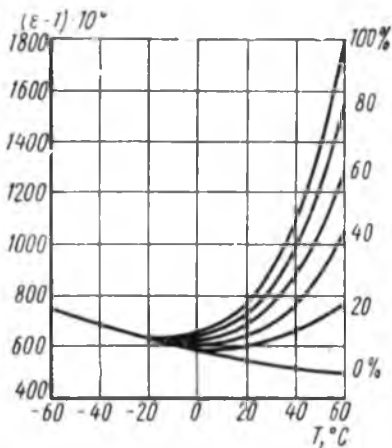


Рис. 4.19. Зависимость ϵ воздуха от температуры и влажности (в %)

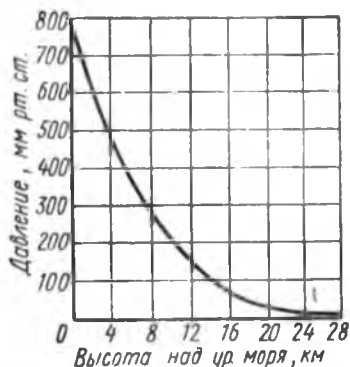


Рис. 4.20. Зависимость атмосферного давления от высоты над уровнем моря

Изменение температуры отрицательно влияет и на состояние резинового уплотнения волноводов, вызывая его растрескивание, что ведет к разгерметизации волноводного устройства.

Высокая влажность вызывает уменьшение поверхностного и объемного сопротивлений диэлектриков, это может быть причиной пробоя волновода.

Влага в атмосфере содержит растворы солей и кислот. Осаждаясь на поверхности металла, она образует пленку электролита, окисляющую металл. Коррозия ведет к росту поверхностного сопротивления и уменьшению прочности конструкции, особенно в местах пайки. Опасность коррозии увеличивается, если при эксплуатации волноводное устройство подвергается воздействию соленых брызг или морского тумана.

Пониженное атмосферное давление наблюдается на больших высотах. На рис. 4 20 приведен график зависимости атмосферного давления от высоты. Изменение давления увеличивает опасность пробоя. Ионизация воздуха солнечными лучами еще больше увеличивает опасность пробоя. Кроме того, под действием солнечного

света высокочастотные диэлектрики стареют, т. е. необратимо изменяют свои свойства.

Климатические испытания характеризуются их последовательностью, значением климатических факторов и временем их действия.

По условиям эксплуатации аппаратура СВЧ делится на группы и для каждой группы в нормалях указываются параметры климатических испытаний.

Программа климатических испытаний составляется так, чтобы возможно полнее воспроизвести наиболее тяжелые условия эксплуатации устройства.

Ввиду сложности одновременной регулировки нескольких кли-

матических факторов обычно ограничиваются отдельными испытаниями.

Проверка ведется на теплостойкость, влагостойкость и морозостойкость.

Климатические испытания производятся в специальных установках, которые предназначаются как для отдельных, так и для комплексных испытаний.

Камера для испытания на устойчивость к повышенной температуре представляет собой шкаф с двойными стенками и внешней термозоляцией (рис. 4.21). Воздух в нем циркулирует по замкнутому циклу. Из рабочего

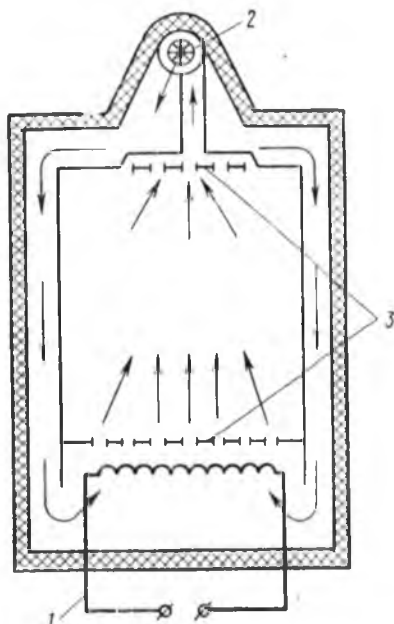


Рис. 4.21. Схема камеры для испытания на воздействие повышенной температуры

объема он отсасывается насосом 2, прогоняется мимо подогревателя 1 и попадает опять в рабочий объем через отверстия 3. Постоянство рабочей температуры в камере обеспечивается системой автоматической регулировки с термочувствительными датчиками.

Камеры холода представляют собой установку, рабочий объем которой имеет надежную теплоизоляцию. Его охлаждение до требуемой температуры осуществляется холодильным агрегатом, работающим на основе жидкого фреона. Постоянная рабочая температура поддерживается так же, как и в камере тепла.

Камера для комплексного испытания на воздействие высокой температуры и влажности (рис. 4.22) имеет системы подогрева и увлажнения воздуха, а также вентилятор, обеспечивающий его циркуляцию. Увлажнение воздуха осуществляется принудительной циркуляцией через слой воды увлажнителя. Требуемая влажность воздуха в камере достигается изменением температуры

воды в увлажнителе и количества пропущенного через нее воздуха. При испытании на действие пониженного давления разрежение в рабочем объеме камеры достигается с помощью вакуумных насосов (как форвакуумных, так и высоковакуумных).

Сложность оборудования для климатических испытаний и его стоимость зависят от величины требуемого рабочего объема, с ростом которого сложность изготовления и эксплуатации оборудования резко возрастает.

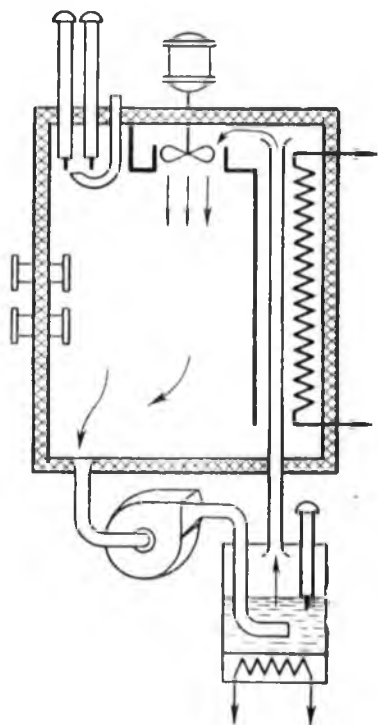


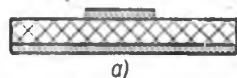
Рис. 4.22. Схемы камеры для комплексных испытаний на воздействие повышенной температуры и повышенной влажности

ПОЛОСКОВЫЕ ВОЛНОВОДЫ

§ 5.1. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПОЛОСКОВЫХ ВОЛНОВОДОВ

Для передачи энергии СВЧ применяются полосковые волноводы. Они более просты в изготовлении, имеют малый вес и габариты по сравнению с полыми и коаксиальными волноводами.

Двухмерная конфигурация полоскового проводника не только упрощает конструкцию, но и позволяет создать малогабаритные и более надежные устройства.



а)



б)

Рис. 5.1. Поперечное сечение несимметричного (а) и симметричного (б) полоскового волновода

Полосковые волноводы целесообразно применять в схемах, когда необходимо в малых объемах сконцентрировать большое число функциональных устройств, работающих на частотах 1—12 ГГц при среднем уровне мощности до 5 Вт. Использование таких узлов в приемопередающих устройствах СВЧ позволяет снизить их объем на 30—50% по сравнению с объемом устройств, выполненных на полых волноводах.

Поперечные сечения часто применяемых типов полосковых волноводов (несимметричного и симметричного) показаны на рис. 5.1.

Уменьшить линейные размеры полосковых волноводов можно, если использовать для заполнения рабочего объема твердый диэлектрик. Выбор диэлектрического материала определяется условиями работы аппаратуры: диапазоном частот, допустимыми весом и габаритами,

климатическими условиями и требуемой механической прочностью.

В табл. 5.1 приведены характеристики диэлектриков полосковых волноводов.

Для изготовления полосковых волноводов можно использовать способы, применяемые при производстве печатных схем. В табл. 5.2 приведены основные способы изготовления полосковых волноводов и их характеристики. При изготовлении необходимо обеспечить: 1) *минимальную шероховатость поверхностей и прямолинейность границ полосковых проводников*; 2) *минимальное и стабильное удельное сопротивление поверхностных слоев металла*; 3) *высокую точность воспроизведения рисунка*.

Широко применяется фотохимический способ с предварительной гальванохимической металлизацией поверхности диэлектрика. Схема технологического процесса приведена на рис. 5.2.

Вначале создают шероховатость на поверхности диэлектрической платы. Для этого можно использовать следующие виды обработки: пескоструйную, с помощью зернения и обработку ультразвуковыми колебаниями в водной суспензии абразива. Создание шероховатости необходимо для увеличения силы сцепления металла покрытия с поверхностью диэлектрика, способы химической и электрохимической металлизации которого не отличаются от используемых при производстве низкочастотных схем.

При металлизации поверхность металла полностью воспроизводит очертания поверхности диэлектрика. В результате токонесущая поверхность получается заведомо шероховатой, что ведет к росту активных потерь в полосковом волноводе.

Шероховатость поверхности диэлектрика влияет не только на величину активных потерь. Она определяет минимально достижимую ширину полоскового проводника, зазор между проводниками, регулярность границы и силу сцепления проводника с поверхностью диэлектрика. Качество изображения полосковых проводников при нанесении фотослоя на металлизированную и неметаллизированную поверхность диэлектрика определяется также их шероховатостью.

Неравномерная толщина фотослоя, обусловленная шероховатостью поверхности диэлектрика, является причиной нерегулярности границ полоскового проводника.

Характеристика материала	Материал							
	фольгированный фторопласт-4	стеклофторопласт ВФД-250	фольгированный стеклотекстолит СФ-2А	полистирол	САМ (сополимер альфа метилстирола со стиролом)	ПТ-3	ПТ-5	продукт 10
$\operatorname{tg} \delta$ при $f=10^6$ гц . . .	$(0,2-0,3) \times 10^{-3}$	$(0,7-1,4) 10^{-3}$	$0,025-0,035$	$(0,2-1,0) 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$(7-9) 10^{-4}$	$(7-9) 10^{-4}$	$(4-5) 10^{-4}$
ϵ при $f=10^6$ гц . . .	1,9—2,2	2,5—2,7	6,0	2,2—2,8	2,6	при $f=10^9$ гц 2,38—2,58	при $f=10^9$ гц 4,75—5,25	2,6—2,8
Рабочий интервал температур, °С . . .	—100—+200	—60—+250	—60—+80	—60—+60	—	—60—+85	—60—+85	—60—+100
Электрическая прочность 20°С, кВ/мм . . .	25—27	—	—	20—50	—	50	30	28
Удельное объемное сопротивление, Ом·см	$(1,1-1,9) 10^{16}$	—	$10^{11}-10^{13}$	$5 \cdot 10^{15}-10^{17}$	10^{16}	—	$2 \cdot 10^{15}$	10^{17}
Удельное поверхностное сопротивление, Ом	$(1,4-2,7) 10^{15}$	—	$10^{10}-10^{12}$	$10^{15}-10^{17}$	—	10 ¹⁷	—	$10^{14}-10^{15}$
ТКЛР, град ⁻¹	$(11-25) 10^{-15}$	—	—	$(6-10) 10^{-5}$	—	—	$(3,8-5,3) 10^{-5}$	$(10-12) 10^{-5}$
Теплостойкость по Мартенсу, °С . . .	—	—	—	80	100	80—85	80—85	100
Твердость по Бринеллю, кг/мм ²	3,5—4	—	—	20	—	20—30	24—30	16
Водопоглощение за 24 ч, %	0,00	0,00	0,03	0,01	—	0,00—0,05	—	0,0—0,5
Удельный вес, г/см ³	2,1—2,3	—	1,9—2,9	1,05—1,65	—	1,07	1,5—1,75	1,0—1,1
Временное сопротивление, кг/мм ² : растяжению	140—200	—	2000	300—500	—	—	270—360	—
изгибу	120—140	600	—	800—850	700	—	540—600	800

Таблица 5.2

Способ изготовления	Достоинства	Недостатки	Примечание
Фотохимический	Высокая точность и разрешающая способность Высокая производительность Равномерная толщина линий по сечению и длине Высокая прочность сцепления металлизации с основанием Легкость внесения изменений в схемы при доработках Возможность использования различных светочувствительных составов	Невозможность одновременной металлизации отверстий Отход металла при травлении	Фольгированный гетинакс Фольгированный фторопласт-4 Фольгированный стекло-текстолит ВФД-250
Фотохимический с электролитическим фольгированием диэлектрика	Возможность использования нефольгированных материалов Высокая точность воспроизведения Более равномерная толщина линий по сравнению с фотоэлектрохимическим способом Легкость внесения изменений в схемы при доработках	Необходимость создания шероховатости на поверхности диэлектрика	Полистирол, продукт ПТ, продукт 10, материал САМ
Фотоэлектрохимический	То же Возможность металлизации переходных отверстий	То же Недостаточно высокая точность и разрешающая способность Неравномерная толщина линий по длине и сечению	Материал ПТ

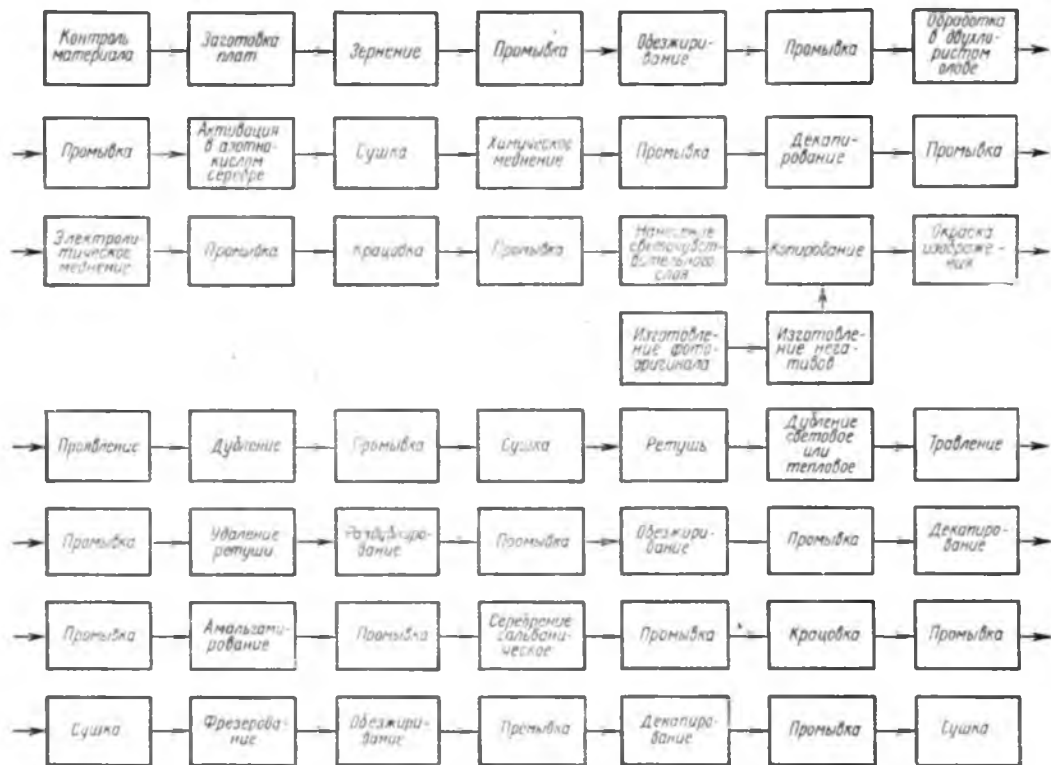


Рис. 5.2. Схема технологического процесса фотохимического метода изготовления полосковых

Глубина дефектов границы полоскового проводника (d) рассчитывается как функция наиболее вероятного угла при вершине микронеровностей (α) и их высота (R_a):

$$d = 2R_a \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}.$$

В табл. 5.3 приведены без учета подтравливания значения минимальной ширины полоскового проводника и зазора в зависимости от высоты микронеровностей на поверхности диэлектрика.

Таблица 5.3

Высота микронеровностей R_a , мкм	Минимальная ширина полоскового проводника, мкм	Минимальный зазор между полосковыми проводниками, мкм
0,6	150	175
0,25	62	75
0,05	25	37

Удаление металла травлением незащищенных участков металлизации связано с подтравливанием краев полоскового проводника. В результате подтравливания полосковый проводник приобретает трапецидальное поперечное сечение. При этом значения минимально достижимой ширины полоскового проводника и зазора зависят не только от высоты микронеровностей, но и от толщины металлизации (табл. 5.4).

Таблица 5.4

Высота микронеровностей R_a , мкм	Толщина металлизации, мкм	Минимальная ширина полоскового проводника, мкм
0,05	2,5	37
0,05	5	45
0,05	7,5	52
0,25	2,5	72
0,25	5	80
0,25	7,5	187
0,6	2,5	150
0,6	5	162
0,6	7,5	170

Сила сцепления металла покрытия с поверхностью диэлектрика определяется эффективной поверхностью металлизированного диэлектрика, т. е. микрогеометрией его поверхности. В табл. 5.5 приведены значения силы сцепления для различной микрогеометрии поверхности диэлектриков на основе полистирола.

Таблица 5.5

R_z , мкм	18÷20	13÷14	8 : 10	6,5÷7	5÷6
R_a , мкм	4	3	2,3÷2,4	2,2	0,8—1
Сила сцепления, кг/см ²	16,5	10÷12	8,3 : 8,5	8,3 : 8,5	4,2÷4,3
Класс чистоты	4	5	6	6	7

На рис. 5.3 приведена зависимость, характеризующая связь силы сцепления и высоты микронеровностей. Аналитически данную зависимость можно описать эмпирическим уравнением

$$R_a \approx 2,06 \lg P - 1,84.$$

С помощью этого уравнения можно определить по R_a силу сцепления металла с диэлектриком P в любой области платы до ее металлизации.

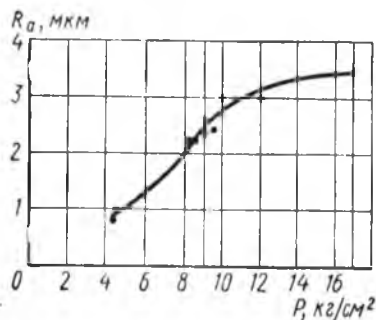


Рис. 5.3. Кривая, характеризующая связь силы сцепления и высоты микронеровностей

Следовательно, шероховатость, необходимая для увеличения силы сцепления, одновременно является причиной микронеровностей на поверхности плосковых проводников, дефектов их границы, уменьшает разрешающую способность. Поэтому при выборе режимов технологического процесса получения шероховатости на

поверхности диэлектрика следует исходить из предпосылки создания минимальной высоты R_a , обеспечивающей требуемую силу сцепления.

Полосковые проводники, полученные рассматриваемым способом, представляют собой сложную многослойную структуру (рис. 5.4). В результате активации на поверхности диэлектрика образуется каталитически активная пленка серебра, на которую нанесен слой химически восстановленной меди толщиной 3—5 мкм, затем — слои гальванической меди 25—35 мкм и гальванического серебра толщиной 10—15 мкм.

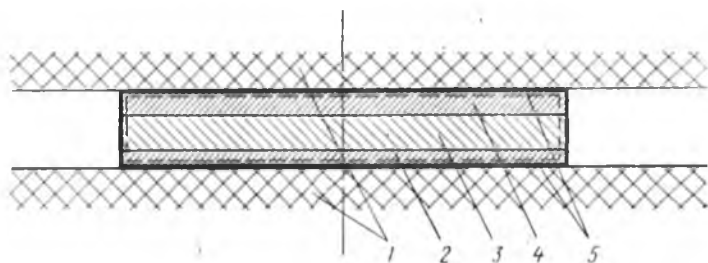


Рис. 5.4. Сечение центрального проводника:

1 — диэлектрик; 2 — химически осажденная медь; 3 — гальванически осажденная медь; 4 — гальванически осажденное серебро; 5 — токонесущие поверхности

Вследствие скин-эффекта токонесущими являются поверхностные слои полоскового проводника (см. рис. 5.4), т. е. слои химически восстановленной меди и гальванического серебра.

Поскольку слой химически восстановленной меди токонесущий, его удельное сопротивление существенно влияет на затухание в полосковом волноводе. Исследования показывают, что это сопротивление осадков химически восстановленной меди зависит от состава раствора, из которого она осаждается, и режимов осаждения.

На рис. 5.5 представлены кривые зависимости удельного сопротивления осадков химически восстановленной меди, полученных из растворов различных составов, от температуры, при которой протекает осаждение. Для всех растворов они имеют одинаковый характер.

При активации поверхности диэлектрика на ней появляется каталитически активная пленка серебра. При нанесении меди на границе раздела медь — серебро образуется сплав этих металлов. С ростом температуры рас-

твора скорость образования сплава, а следовательно, и толщина промежуточной пленки увеличиваются. В результате возрастает удельное сопротивление осадка.

Взаимное смещение кривых $\rho = f(t^\circ \text{C})$ для осадков 1, 2 и 3 вызвано изменением зернистости и напряжений II рода. Наиболее мелкозернисты осадки 1, в осадках 2

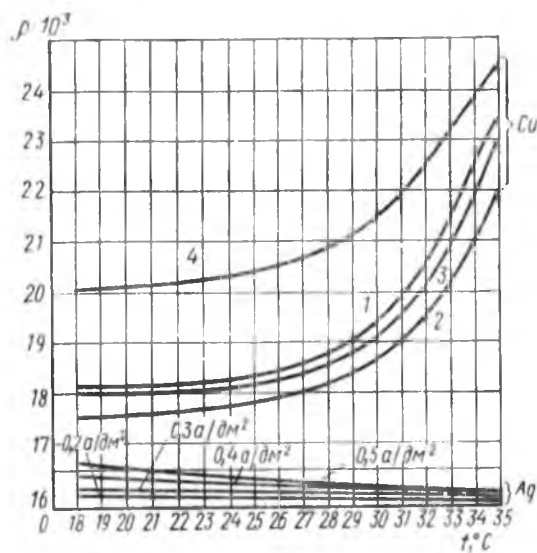


Рис. 5.5. Зависимость удельного сопротивления осадков химически восстановленной меди и гальванического серебра от режимов осаждения

и 3 размер зерен возрастает (причем максимальной величины зерна достигают в осадках 2). Заметное отличие удельного сопротивления осадков 4, обусловлено их пористостью значительно большей, чем у осадков 1, 2 и 3.

На рис. 5.5 показаны зависимости изменения удельного сопротивления серебряных осадков, полученных из цианистого электролита от плоскости тока и температуры, при которой протекает процесс осаждения. С изменением плотности тока незначительное изменение удельного сопротивления осадков отмечается лишь при минимальных температурах (18—20°C). В условиях же по-

вышенных температур наблюдается тенденция к уменьшению величины удельного сопротивления.

Для получения минимального и воспроизводимого удельного сопротивления токонесущих поверхностей надо выбирать составы растворов и режимы осаждения меди, при которых осадки получают плотными беспористыми. Режимы осаждения должны поддерживаться постоянными. Удельное сопротивление осадков серебра меньше зависит от постоянства режимов осаждения.

Изготовление полосковых волноводов отличается от производства низкочастотных печатных схем необходимостью обеспечения высокой точности размеров полоскового проводника.

Основные причины неточности изготовления полосковых проводников фотохимическим способом: неточность фотооригинала; изменение размеров изображения полоскового проводника на рабочем негативе при изготовлении его с фотооригинала; несоответствие размеров маски и рабочего негатива, а также размеров проводников и маски.

Применение фоторепродукционного способа для изготовления фотооригинала искажает размеры полосковой системы. Искажения могут быть вызваны деформацией фотооригинала при изменении окружающих условий (температура, влажность).

Так, уже при изменении температуры полиэфирной подложки эталонных чертежей в пределах $\pm 7^\circ\text{C}$ на длине 750 мм набегают ошибки 0,25 мм. Такие же искажения возникают при изменении влажности на 20%.

При изготовлении полосковых волноводов фотохимическим способом лучшее качество фотооригинала достигается при вырезании его в масштабе 1:1 на силикатном стекле, покрытом тонкой лаковой пленкой.

Рабочий негатив изготавливают контактной печатью с фотооригинала.

Однако ширина изображения полоскового проводника на рабочем негативе даже при контактной печати с фотооригинала зависит от характеристик используемого фотоматериала, экспозиции и факторов проявления.

На рис. 5.6 показана экспериментальная зависимость ширины изображения проводника на рабочем фотонегативе от времени экспозиции.

Граница изображения полоскового проводника на рабочем фотонегативе определяется так называемой по-

граничной кривой, характеризующей распределение оптической плотности между экспонированными участками светочувствительного слоя и его неэкспонированной частью.

Пограничная кривая почернения показана на рис. 5.7. Форма пограничной кривой, кроме диффузного рассеяния света в светочувствительном слое, являющегося главной причиной нерезкости изображения, зависит также от условий экспонирования и проявления.

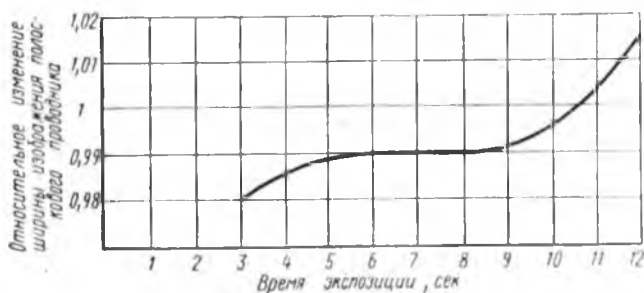


Рис. 5.6. Зависимость относительного изменения ширины изображения полоскового проводника на рабочем фото-негативе от времени экспозиции

При печати с рабочего негатива на металлизированном диэлектрике, покрытом светочувствительной эмульсией, размеры получаемой маски зависят от свойств светочувствительной эмульсии, качества негатива, экспозиции и факторов проявления.

Все это затрудняет получение точного соответствия рисунков маски и фотооригинала.

При правильном выборе времени экспозиции можно получить высокую точность. Для этого необходимо знать пограничную кривую, так как она определит распределение количества освещения на поверхности защитной эмульсии.

Изменение оптической плотности в граничной области рабочего негатива эквивалентно тому, что на разные участки этой области действует различное количество освещения. Для расчета распределения количества освещения в граничной области используем показатель плотности S_s , позволяющий определить эффект диффузного рассеяния света в фотослое рабочего негатива. Он имеет

размерность длины, выражается в микронах, зависит от свойств фотослоя и длины волны света, которым осуществляется экспонирование. Величина C_S не зависит от состава проявителя и экспозиции, получаемой фотографическим материалом. Последние факторы могут быть учтены с помощью характеристических кривых используемого фотоматериала.

Для фотоматериалов средней чувствительности $C_S = 30$ мкм. Особомелкозернистые низкочувствительные фотоматериалы характеризуются величиной $C_S = 20$ мкм.

Для граничной области изображения проводника на фотонегативе количество освещения, действующее на фотослой, определяется выражениями:

$$I(x)/I_0 = 1/2 \cdot 10^{-2x/C_S} \quad x \leq 0;$$

$$I(x)/I_0 = 1 - 1/2 \cdot 10^{-2x/C_S} \quad x \geq 0.$$

В экспонированной части слоя $x < 0$, в неэкспонированной его части $x > 0$.

При $x=0$, т. е. на границе проводника, в результате диффузного рассеяния будет действовать $1/2$ количества освещения, действующего на неэкранированную часть рабочего негатива. Это соотношение справедливо для любых значений C_S , значит и для различных фотоматериалов. Пользуясь характеристиками кривых фотоматериала, при известных параметрах фотокопировального оборудования можно рассчитать оптическую прочность в граничной точке рабочего фотонегатива (точке $x=0$).

Зная плотность фотонегатива в граничной точке, можно подбором времен экспозиции и проявления при печати на диэлектрике добиться того, чтобы эта плот-

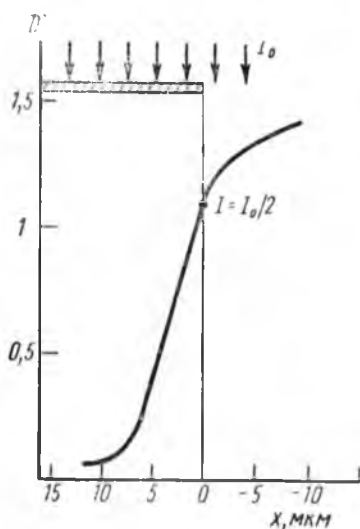


Рис. 5.7. Кривая распределения плотности D фотонегатива на краю изображения

ность была граничной при проявлении фотослоя, нанесенного на диэлектрик, т. е. чтобы светочувствительный слой на диэлектрике задубливался под воздействием света лишь при этой и меньших плотностях рабочего фотонегатива.

Получить защитную маску, размеры которой точно соответствовали бы размерам изображения на фотооригинале, можно следующим образом.

Изготавливается тест-негатив, состоящий из ряда нейтральных полей различной оптической плотности, причем плотность каждого последующего поля отличается от плотности предыдущего на 10%. Разность оптических плотностей участков негатива достигается изменением времени экспозиции при их получении. Затем производится экспонирование металлизированного диэлектрика с нанесенным светочувствительным слоем с полученного тест-негатива. Печать ведется для образцов при различных выдержках, после чего следует операция проявления. Время проявления для всех образцов должно быть постоянно. После их обработки выбирается время экспозиции, при котором граничной областью проявления является участок тест-негатива, оптическая плотность которого определяется $1/2$ количества освещения, действовавшего на фоточувствительный слой относительно величины освещения, подействовавшего на защищенную часть экспонируемой пластины.

При таком времени экспозиции граница маски определяется плотностью граничной области фотонегатива, соответствующей оптической плотности в граничной точке тест-негатива.

Для стандартного фотокопировального оборудования можно определить величину I_0 в зависимости от времени экспозиции. Известно, что освещенность связана с количеством освещения зависимостью

$$I_0 = Et,$$

где I_0 — количество освещения, лк·сек; E — освещенность, лк; t — время освещения, сек.

Задавшись временем экспозиции при печати рабочего негатива (t) и измерив величину освещенности, можно определить величину количества освещения.

Зная величину I_0 и пользуясь характеристическими кривыми, найдем при выбранной выдержке t необходимое

время проявления для получения искомой плотности при количестве освещения $I_0/2$, т. е. в граничной точке рабочего негатива.

Взаимосвязь времени экспозиции при изготовлении рабочего фотонегатива и маски с временем их проявления позволяет получить соответствие размеров маски и фотооригинала без промежуточного контроля размеров изображения проводника.

§ 5.2. СБОРКА ПОЛОСКОВЫХ УСТРОЙСТВ

Полосковые устройства на основе симметричных полосковых волноводов состоят из двух пластин. На поверхности одной пластины (платы-схемы) выполнен рисунок полосковых проводников, противоположная ее поверхность полностью металлизирована. Другая пластина (плата-крышка) имеет только одну полностью металлизированную поверхность. Навесные элементы располагаются на плате-схеме. Плата-крышка неметаллизированной поверхностью накладывается на полосковые проводники платы схемы.

Для размещения навесных элементов в плате-схеме и плате-крышке имеются углубления. Вводы и выводы энергии СВЧ выполняются в виде коаксиально-полосковых переходов, устанавливаемых по периметру плат, залитых пенопластом, образующим корпус устройства. Технологический процесс сборки этих устройств следующий:

- 1) монтаж навесных элементов и предварительная сборка;
- 2) настройка;
- 3) окончательная сборка;
- 4) экранирование;
- 5) контроль электрических параметров;
- 6) заливка пенопластом;
- 7) контроль электрических характеристик;
- 8) окраска и маркировка;
- 9) выходной контроль.

При наличии навесных деталей, входящих в полосковое устройство, выводы их предварительно залуживаются легкоплавким припоем ПОСК-50 с использованием 30% спирто-канифольного флюса и формуются. Формовку производят таким образом, чтобы выводы плотно

прилегал к поверхности полоскового проводника. Затем на места паяк выводов навесных элементов наносится спирто-канифольный флюс, который выдерживается на воздухе для удаления спирта. Иначе при пайке возможно его кипение, что приведет к отслоению полоскового проводника.

Время контакта жала паяльника с проводником при пайке не должно превышать 2—5 сек. Для пайки используется припой ПОСК-50. Нельзя давить жалом паяльника на проводник, так как образуются вмятины в диэлектрической плате и разрыв полоскового проводника. После напайки навесных элементов устанавливают нагрузочные сопротивления, которые приклеиваются к плате.

Поверх нагрузочного сопротивления накладывается конденсаторная бумага, размеры которой несколько больше размеров сопротивления. Эта бумага приклеивается по периметру к плате. Сушка ведется на воздухе при комнатной температуре.

Следующий этап сборки — установка коаксиально-полосковых переходов, которые крепятся к плате с полосковыми проводниками так, чтобы контактный лепесток располагался симметрично относительно оси полоскового проводника, не выходил за его границы и плотно прилегал к его поверхности.

После этого на плату с полосковыми проводниками накладывается плата-крышка, сборка закрепляется соединительными винтами и в гнезда сборки устанавливаются детектородержатели.

На этом предварительную сборку полоскового устройства заканчивают. Последующая настройка производится на универсальных измерительных стендах. Настроенное полосковое устройство поступает на окончательную сборку. При этом плата-крышка снимается вместе с детектородержателями. Контуры навесных элементов заливаются клеем. Затем плата-крышка выдерживается в парах этилбензола.

Под действием паров этилбензола поверхность диэлектрика размягчается. При наложении платы-крышки на плату с полосковыми проводниками и выдержке под давлением происходит их неразъемное соединение. Полосковые проводники располагаются внутри монолитного диэлектрика. Такое соединение устраняет влияние воздушных зазоров на электрические характеристики ус-

тройства, возможное при стягивании их винтами, и увеличивает механическую прочность.

Для экранирования собранного полоскового устройства торцы пакета промазывают токопроводящим клеем, состоящим из этилцеллозольва с мелкодисперсным серебром в качестве наполнителя.

Собранное полосковое устройство после экранирования поступает на контроль электрических характеристик. Затем осуществляют заливку пенополиуританом ПУ-3. Обезжиренный и высушенный узел покрывают тонким слоем клея ПУ-2.

Перед заливкой форма и узел прогреваются до 50°C . Залитая форма помещается в термостат и выдерживается там при 60°C в течение 8—10 ч, после чего охлаждается на воздухе.

Завершается процесс сборки контролем электрических характеристик.

Рассмотренный процесс сборки характерен для конструкций полосковых устройств с диэлектрическими пластинами, внешняя поверхность которых залита пенополиуретаном. Существует и другое конструктивное оформление полосковых устройств — скрепленные винтами платы с металлическими пластинами или пластинами из стеклотекстолита, расположенными на внешних поверхностях узла для обеспечения его механической прочности (рис. 5.8). В этом случае процесс сборки упрощается и сводится к комплектации пакета пластин и их взаимной фиксации винтами.

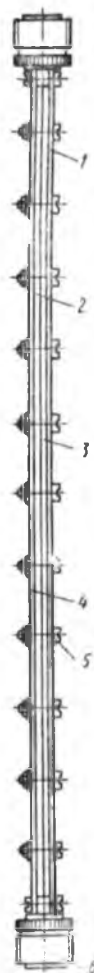


Рис. 5.8. Симметричный полосковый волновод:

1, 4 — металлические пластины; 2, 3 — диэлектрические пластины; 5 — крепежные винты; 6 — коаксиально-полосковый переход

§ 5.3. КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МИКРОМИНИАТЮРНЫХ ПОЛОСКОВЫХ ВОЛНОВОДОВ

Размеры полосковых волноводов удастся сделать малыми, если использовать для заполнения пространства между полосковыми проводниками диэлектрик с высокой диэлектрической проницаемостью. К материалу диэлектрической подложки микроминиатюрных полосковых волноводов предъявляются следующие требования:

- 1) малые потери на СВЧ;
- 2) хорошая адгезия с проводниками;
- 3) высокая диэлектрическая проницаемость;
- 4) воспроизводимость диэлектрической проницаемости от партии к партии и в пределах каждой подложки;
- 5) высокий класс чистоты поверхности ($\nabla 13 - \nabla 14$) и малое количество пор;
- 6) подложка не должна деформироваться при циклическом изменении температуры при изготовлении микросхемы;

7) материал должен обладать высокой теплопроводностью для рассеивания больших мощностей.

В микроминиатюрных полосковых волноводах электромагнитное поле сосредоточено в диэлектрической подложке. Поэтому диэлектрическая проницаемость должна быть однородной в пределах одного волновода и от партии к партии, чтобы не нарушать однородность волновода. Следовательно, в диэлектрике недопустимы раковины и поры.

Если температура микроминиатюрного полоскового волновода меняется в широких пределах, то при использовании материалов с высокой диэлектрической проницаемостью и низкой точкой Кюри значительно изменяются электрические характеристики. Так, изменение резонансной частоты четвертьволнового полоскового резонатора

$$\frac{\Delta f}{f_0} \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon},$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость.

Если термические коэффициенты линейного расширения материала проводника и диэлектрика резко различаются, то с изменением температуры возможно разрушение полоскового волновода.

При выборе диэлектрика следует предусмотреть его устойчивость к воздействию растворов, применяемых для изготовления полоскового волновода.

Из этих требований следует, что выбор материала для подложки сильно ограничен. В табл. 5.6 приведены характеристики диэлектриков, применяемых при производстве микроминиатюрных полосковых волноводов в качестве материала подложек.

Таблица 5.6

Материал подложки	ϵ 10 ГГц при 20 °С	$\operatorname{tg} \delta$ 10 ГГц при 20 °С	Теплопроводность, кал/см·град
Сапфир	9,9	$1 \cdot 10^{-4}$	0,06
Поликор 99,8% Al_2O_3 . . .	9,8	$1 \cdot 10^{-4}$	$0,06 \div 0,09$
Сапфирит 98% Al_2O_3 . . .	$9,3 \div 9,6$	$1 \cdot 10^{-4}$	$0,05 \div 0,06$
Керамика ГМ 99,6% Al_2O_3	9,8	$1 \cdot 10^{-4}$	$0,04 \div 0,06$
Керамика 22ХС 94,4% Al_2O_3	9,5	$5 \cdot 10^{-4}$	0,032
Керамика А-995 99,8% Al_2O_3	9,8	$1 \cdot 10^{-4}$	—
Микролит 99,4% Al_2O_3 . . .	9,8	$4 \cdot 10^{-4}$	0,042
Брокерит 99,7% Be_2O_4 . . .	6,8	$6 \cdot 10^{-4}$	0,4
Кварц	3,78	$1 \cdot 10^{-4}$	—
Ситалл КП-10	10	$5 \cdot 10^{-4}$	0,007
Ситалл КП-15	15	$5 \cdot 10^{-4}$	0,007
Кремний	11,7	0,015	0,37
Арсенид галлия	13,3	—	0,1
Ферриты	9—4	$0,01 - 0,001$	—

Выбор материала проводников производится одновременно с выбором материала подложки с учетом адгезии проводника к подложке. Проводники должны иметь:

- 1) малое удельное сопротивление;
- 2) толщину, равную 3—5 скин-слоям, для уменьшения потерь в волноводе;
- 3) коррозионностойкость;
- 4) плотность и беспористость;
- 5) постоянные свойства в диапазоне температур;
- 6) возможность присоединения внешних проводников сваркой или пайкой.

Лучший проводник — серебро (табл. 5.7) имеет высокую степень миграции атомов по поверхности подложки и быстро покрывается пленкой сернистых соединений.

Таблица 5.7

Материал проводников	Сопротивление по отношению к меди	Скин-слой на частоте 2 ГГц, мкм	Поверхностное сопротивление, ом 10^{-7}	TKЛР, град $^{-1}$ $\times 10^{-6}$	Адгезия к подложкам
Ag	0,95	1,4	2,5	21	Плохая
Cu	1,0	1,5	2,6	18	Очень плохая
Au	1,36	1,7	3,0	15	То же
Al	1,60	1,9	3,3	26	Очень хорошая
W	3,2	2,6	4,7	4,6	Хорошая
Mo	3,3	2,7	4,7	6,0	То же
Cr	7,6	4,0	7,2	9,0	»
Ta	9,1	4,4	7,9	6,6	Очень хорошая

Серебро применяется в основном в составе проводящих паст при толсто пленочной технологии (шелкографии). При этом высокая миграционная способность атомов серебра способствует созданию высокопроводящих, хорошо сцепленных с подложкой проводников. Когда требуется создать схему, имеющую малые зазоры, серебро не применяется, так как на ней с течением времени появляются дендриты серебра (особенно при циклическом изменении окружающей температуры), которые могут привести к короткому замыканию проводников.

Медь характеризуется плохой адгезией к подложке. Для улучшения адгезии меди применяется подслои из хрома, ванадия, титана и других материалов, имеющих хорошую адгезию к подложке, но высокое электрическое сопротивление. Толщина такого подслоя выбирается равной нескольким сотням ангстрем, с тем чтобы не увеличивать заметно сопротивление проводника рис. 5.9. Медь легко окисляется на воздухе, поэтому при ее использовании необходимо применять защитные покрытия.

Золото тоже имеет плохую адгезию и применяется с подслоем. Оно отличается очень высокой коррозионной стойкостью, легко паяется, сваривается. Однако создавать проводники толщиной в 3—5 скин-слоев, что дает на частоте в 1 ГГц толщину 8—13 мкм, сложно и дорого.

Электрическое сопротивление алюминия всего в 1,6 раза больше, чем у меди. Между тем адгезия у алюминия к керамике на основе Al_2O_3 очень хорошая. Но вопросы создания толстых слоев алюминия недостаточно изучены.

Поэтому используют только два материала: медь и золото.

В качестве резисторов применяются пленки хрома, нихрома, тантала, керметов и т. д.

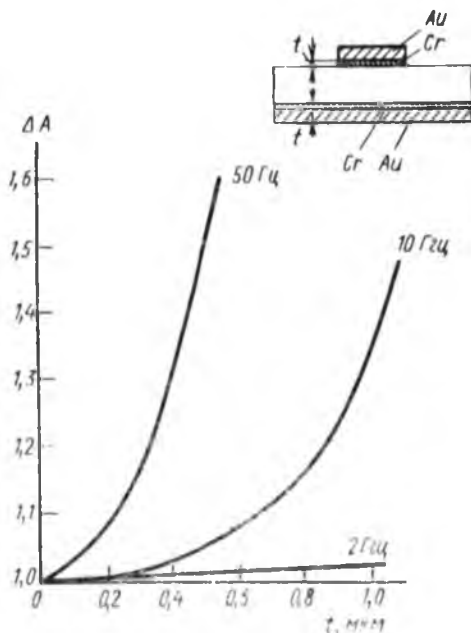


Рис. 5.9. Приращение затухания в несимметричном полосковом волноводе в зависимости от толщины подслоя хрома

Характеристики резистивных пленок приведены в табл. 5.8.

Таблица 5.8

Материал резистор	Сопротивление, Ом/□	ТКС, %/°С	Стабильность
Cr	10—1000	−0,1— +0,1	Плохая
NiCr	40—400	+0,002— +0,1	Хорошая
Ta (ПКР в N ₂)	5—100	−0,01— +0,01	Отличная
Ti	5 до 2000	−0,1— +0,1	Отличная
МЛТ-3	50	+0,02— −0,02	Хорошая

Для изготовления микроминиатюрных полосковых волноводов используется несколько способов.

Трафаретная печать и вжигание проводящих паст:

а) непосредственная печать проводящего рисунка; б) фотолитография после печати и вжигания паст; в) фотолитография гальванического серебра, нанесенного на пасту.

Существуют высокопроизводительные автоматы для нанесения паст и туннельные печи непрерывного действия для их вжигания, т. е. имеются возможности для создания автоматизированных поточных линий. Однако полосковые волноводы, изготовленные трафаретной печатью, не отвечают современным требованиям к точности создания проводящего рисунка и допустимым потерям, которые предъявляются к схемам СВЧ диапазона. Фотография улучшает точность рисунка, но при этом потери остаются высокими. Поэтому трафаретная печать (шелкография) для изготовления микроминиатюрных полосковых волноводов используется ограниченно.

Химическое осаждение металла с последующим гальваническим покрытием и вытравливанием рисунка полосковых проводников, нашедшее широкое применение при изготовлении полосковых волноводов, для производства микроминиатюрных полосковых волноводов применяется ограниченно. Еще не разработаны способы химической металлизации большинства диэлектриков (табл. 5.6), при которых сила сцепления металла с основанием была бы достаточно большой (более $8 \div 10$ кГ/см²) для гладкой поверхности диэлектрика ($\nabla 10$). Химическое осаждение применяется для металлизации керамик (ГМ, 22ХС и т. д.), где адгезия увеличивается за счет пористости подложки. Однако при этом микроминиатюрные волноводы характеризуются низкой точностью размеров полосковых проводников и большими потерями.

Термическое вакуумное испарение материала в сочетании с последующим электрохимическим наращиванием проводящего слоя, при котором нанесят тонкую пленку металла, толщина которого увеличивается электрохимическим наращиванием, сочетает хорошую адгезию, достигаемую при термическом вакуумном испарении, с высокой электропроводностью толстого проводника, полученного гальванопластикой. Наилучшая разрешающая способность достигается при использовании нанесенного покрытия, когда в просветах негативной

маски из фоторезиста (т. е. на участках, где будет создан полосковый проводник) наращивается слой золота необходимой толщины, а уже затем удаляется слой фоторезиста и металла на всех остальных участках схемы. Разрешающая способность составляет 25 мкм для линий и 40 мкм для зазоров. Для создания волноводов с малыми потерями приходится выращивать слои золота толщиной 30 мкм.

Термическое вакуумное испарение материалов на всю подложку с последующей фотолитографией позволяет изготовить микроминиатюрные полосковые волноводы с высокой точностью размеров полосковых проводников и малыми потерями на СВЧ.

§ 5.4. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПОЛОСКОВЫХ МИКРОМИНИАТЮРНЫХ ВОЛНОВОДОВ

Процесс изготовления полосковых микроминиатюрных волноводов, термическим вакуумным испарением материалов, разработанный под руководством Блинова Г. А. и Бутузова С. С., следующий:

- 1) обработка подложек;
- 2) напыление резистивного слоя и контактных площадок;
- 3) термоотжиг резисторов и контроль сопротивления;
- 4) металлизация подложки;
- 5) фотолитография;
- 6) нанесение антикоррозионного покрытия;
- 7) сборка;
- 8) контроль.

Перед созданием проводящих слоев производится тщательная очистка подложек промывкой в спирте, кипячением в воде и обработкой в парах спирта. Загрязнения подложек ухудшают адгезию, которая определяется атомными связями. Загрязнения, особенно жировые, создают между пленкой и подложкой очень тонкие, вплоть до мономолекулярных, слои, не дающие возможности атомам пленки и подложки сблизиться на расстоянии, необходимые для проявления сил сцепления.

Следующий этап — напыление резистивного слоя. Для уменьшения влияния неоднородностей поверхности подложки наносится достаточно толстая рези-

стивная пленка, после чего ее окисляют до необходимой величины удельного поверхностного сопротивления. Процесс окисления можно совместить с процессом искусственного старения пленки, которое проводится для стабилизации ее параметров. По этому принципу строят процесс напыления резистивных пленок с большим удельным сопротивлением.

Нанесение резистивного слоя проводится через металлическую маску. Заканчивается процесс напыления при достижении контрольным образцом определенного сопротивления.

Так, для получения резистивной пленки с $\rho_s = 50 \text{ ом}/\square$ необходимо напылить ее до величины $\rho_s \approx 44 \text{ ом}/\square$. После напыления резисторы отжигаются в вакууме при 360°C в течение 30 мин.

Следующая операция — напыление контактных площадок.

Материалом для контактных площадок берется высокочистое золото. Для улучшения его адгезии к подложке применяется подслой из хрома. Напыление проводится через металлическую маску. Для испарения материалов используются ленточные испарители. Толщина контролируется по удельному сопротивлению напыляемой пленки. Напыление проводится при вакууме не хуже $5 \cdot 10^{-5} \text{ тор}$. Подложки подогреваются до $230 \pm 20^\circ \text{C}$. Хром напыляют до удельного сопротивления $\rho_s = 50 \pm 20 \text{ ом}/\square$. Затем проводится напыление золота.

Последующий термоотжиг проводится на воздухе, в термостате при 250°C в течение 6 ч. В процессе термоотжига происходит окисление пленки резистора и стабилизация ее свойств. При этом величина сопротивления резисторов доводится до номинальной.

После этого напыляют проводящий слой, который выполняется из меди. Для улучшения адгезии меди вначале напыляют подслой титана.

Титан напыляется тонким слоем, порядка 100 Å, и проверяется по сопротивлению контрольного образца. Этой толщине соответствует удельное поверхностное сопротивление $\rho_s = 200 \text{ ом}/\square$.

Перед напылением титана производится очистка поверхности подложек в тлеющем разряде в среде остаточных газов с давлением $p = 10^{-1} - 10^{-2} \text{ тор}$. После ее окончания создают вакуум, необходимый для начала напыления титана.

Напыление титана производят примерно через 10 сек после его расплавления, так как титан — геттер и в начале его испарения идет интенсивное газовыделение, что загрязняет осаждаемую пленку молекулами газов.

Чтобы исключить влияние остаточных газов, адсорбирующихся медью на воздухе перед напылением на подложку, как и при напылении титана, производится «отпыл» на заслонку в течение 10 сек. После окончания испарения меди диффузионный насос продолжает работать при действующей азотной ловушке еще примерно 5—10 мин. Это вызвано тем, что при напылении подложка разогревается до температуры 100—160° С, при которой медь легко окисляется даже при небольшом количестве остаточных газов. После охлаждения подложки подача жидкого азота на ловушку и откачка прекращаются. Разгерметизация установки происходит после того как температура подложек снизится до 40—50° С.

Металлизацию обратной стороны подложек производят аналогично.

Для микроминиатюрных полосковых волноводов, где диэлектрики — материалы с малым $\text{tg}\delta$, доминирующее влияние на величину активных потерь оказывают потери в проводниках. Их величина зависит от структуры проводящей пленки, ее однородности, плотности, удельного сопротивления, внутренних напряжений в пленке, чистоты токонесущей поверхности.

На рис. 5.10, а и б даны графики зависимостей внутренних напряжений в медных пленках от их толщины и скорости осаждения. Видно, что величина внутренних напряжений уменьшается с повышением скорости осаждения и увеличением толщины слоя. Внутренние напряжения возникают из-за различия ТКЛР пленки и подложки, проявляющегося, когда температура подложки при нанесении пленки и измерении неодинакова.

Уменьшение внутренних напряжений в пленках меди при увеличении скорости осаждения объясняется, во-первых, тем, что при фиксированной толщине с ростом скорости осаждения и сокращением времени напыления пленки уменьшается температура поверхности подложки. Это уменьшает термическую составляющую внутренних напряжений. Во-вторых, увеличение кинетической энергии испаряемых атомов повышает плотность пленок, совершенствует их структуру, т. е. снижает «собственную» составляющую внутренних напряжений.

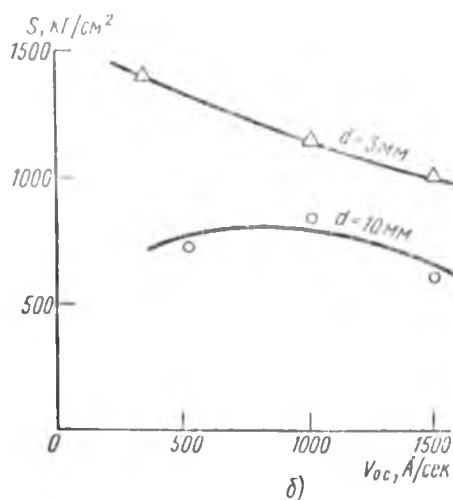
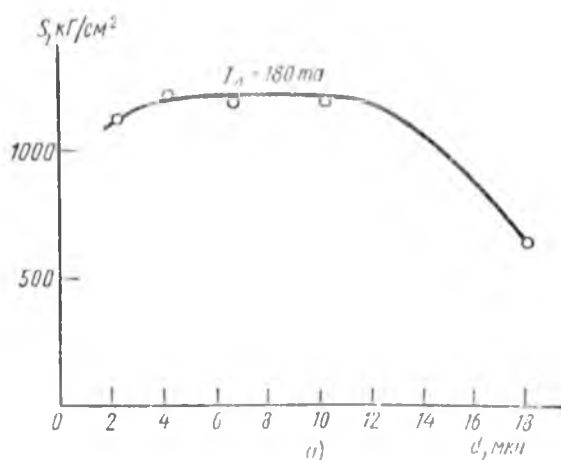


Рис. 5.10. Зависимость внутренних напряжений в пленках меди:
а — от толщины; б — от скорости осаждения

Постоянство величины внутренних напряжений (см. рис. 5.10, а) в широком диапазоне толщины при фиксированной скорости осаждения соответствует общим закономерностям кинетики формирования тонких пленок. Наблюдаемый спад величины внутренних напряжений при толщине пленки более 10 μm связан с уменьше-

нием адгезии, т. е. ослаблением связи атомов пленки и подложки.

Плотность медных пленок мало зависит от скорости осаждения и в интервале $U_{ос} = 100 \div 1600$ Å/сек, при толщине пленки $6 \div 7$ мкм она равна $8,4 \div 8,9$ г/см³. Микроструктура же пленки очень чувствительна к скорости осаждения (рис. 5.11). Высота зерна определяет чистоту поверхности пленки.

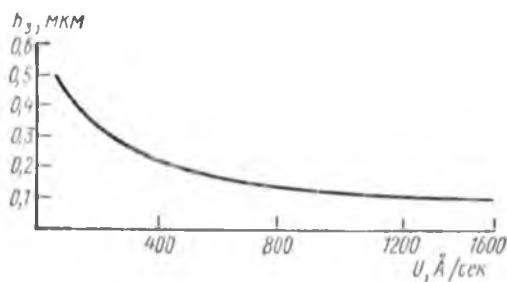


Рис. 5.11. Зависимость микроструктуры медных пленок от скорости осаждения

С увеличением скорости осаждения высота микронеровностей на поверхности пленки уменьшается, несмотря на то, что размер кристаллитов в горизонтальной плоскости растет.

Затухание в несимметричном полосковом волноводе для дециметрового диапазона (рис. 5.12) сопровождается уменьшением потерь с ростом скорости осаждения. Кривая получена для полоскового проводника толщиной 8 ± 1 мкм.

Для получения необходимой конфигурации полосковых проводников используется двойная фотолитография по слоям меди и титана, т. е. избирательное химическое травление пленки медь — титан там, где остаются места незащищенные маской из фоторезиста.

Процесс фотолитографии следующий:

- 1) декапирование;
- 2) промывка;
- 3) нанесение фоторезиста;
- 4) сушка в термостате;
- 5) совмещение и экспонирование;
- 6) проявление;

- 7) промывка;
- 8) сушка в сухом азоте;
- 9) контроль качества защитного слоя;
- 10) ретуширование;
- 11) термозадубливание;
- 12) защита обратной стороны подложки;
- 13) травление слоя меди;
- 14) промывка;
- 15) травление титана;
- 16) удаление фоторезиста;
- 17) промывка и сушка в сухом азоте.

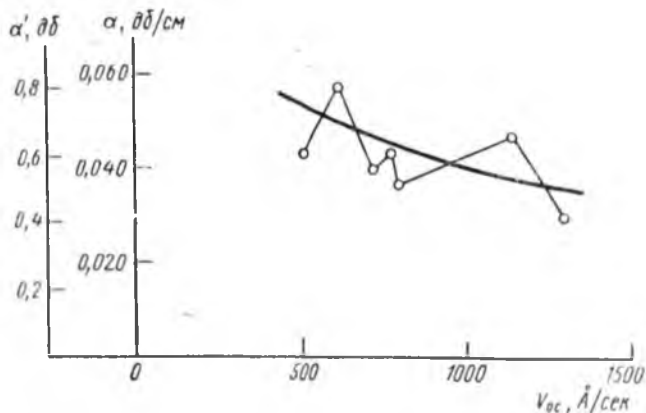


Рис. 5.12. Зависимость затухания в несимметричном микрополосковом волноводе от скорости осаждения пленки меди при толщине полоскового проводника 8 мкм

Декапирование обеспечивает снятие окислов меди, возникших из-за разгерметизации камеры, оно происходит при повышенной температуре в 1%-ном растворе соляной кислоты.

Промывкой удаляют результаты реакции и остатки кислоты. Она производится дистиллированной (или деионизованной) водой, затем этиловым спиртом. Фоторезист наносят на центрифуге и высушивают в термостате при 90°С в течение 30 мин.

Высушенную подложку помещают в приспособление для совмещения и экспонирования. На нее укладывают фотошаблон эмульсионным слоем вниз и под микроско-

пом производят совмещение его с подложкой. Когда совмещение достигнуто, фотошаблон прижимается к подложке и фоторезист экспонируется и проявляется в растворе тринатрийфосфата Na_3PO_4 0,9%.

При последующей промывке в дистиллированной воде с поверхности подложки удаляются продукты реакции и остатки раствора тринатрийфосфата. Сушка ведется током осушенного азота.

При экспонировании и проявлении могут быть проколы в рисунке микросхемы из-за пузырьков воздуха в фоторезисте, а также при наличии мелких, незаметных дефектов в фотошаблоне. Поэтому необходим контроль качества защитного слоя. Подложку просматривают под микроскопом и ретушируют лаком.

Термозадубливание проводят в два этапа. Вначале подложки выдерживают в течение 30 мин в термостате при 100°C , затем при 180°C .

После задубливания фоторезиста обратную сторону подложки, покрытую металлизацией, защищают от воздействия травителей лаком.

Подготовленную подложку передают на операцию травления меди. Оно ведется при комнатной температуре и стационарном положении подложки без перемешивания электролита, в состав которого входит:

хромовый ангидрит CrO_3	150 г/л
азотная кислота HNO_3	35 мл/л
соляная кислота HCl	10 мл/л

Окончание процесса травления определяют по изменению цвета подложки с розового на темно-серый.

Травление титана производят в другом травителе. Для того чтобы его состав не изменился за счет остатка травителя для меди, подложку промывают в дистиллированной воде.

Титановый подслон травится в разбавленном растворе серной кислоты (1×1) при $80-90^\circ\text{C}$. Затем подложку промывают дистиллированной водой и смывают фоторезист 10%-ным раствором NaOH и нейтрализуют в 1—2%-ном растворе соляной кислоты. После этого еще раз тщательно промывают в дистиллированной воде и этиловом спирте, высушивают в струе сжатого, осушенного азота и передают на операцию химической защиты меди.

Антикоррозионное покрытие на медь создается химическим способом на основе системы никель — золото. Общая толщина покрытия составляет 2,5—3 мкм.

В основе процесса химического золочения лежит реакция восстановления золота из его комплексных солей гипофосфитом натрия. Данный процесс идет на поверхности металлов, способных каталитически влиять на реакцию восстановления (например, никель, серебро, медь).

Лучшим катализатором является никель, его пленка обеспечивает дополнительную защиту меди от коррозии.

Подложки с напыленными резистивными и проводящими пленками подвергаются тщательной очистке (обезжириванию).

При обезжиривании пленки меди слегка окисляются. Частичное окисление меди происходит при удалении фоторезистивного слоя. Поэтому при декапировании снимают окислы меди с пленки, обрабатывая ее в растворе персульфата аммония (30 г/л) и серной кислоты (5 г/л) при комнатной температуре в течение 5 сек.

Поскольку медь не является катализатором реакции восстановления атомов никеля из его солей, приходится производить активацию медной поверхности для создания центров кристаллизации при осаждении никеля. Для этого подложки помещают в раствор хлористого палладия (1 г/л) и соляной кислоты (10 мл/л) при 25—30°С на 1—3 сек.

После этого производится химическое никелирование при $\text{pH}=4,9\text{—}5,2$, и 83—87°С в течение 10—15 мин в следующем растворе (г/л):

никель хлористый $\text{NiCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$	30
натрийфосфат NaH_2PO_4	10
натрий уксуснокислый CH_3COONa	10

На поверхности меди осаждается пленка никеля толщиной 1,7—2,5 мкм, которая является хорошей защитой от коррозии, но, во-первых, она имеет микротрещины и поры, во-вторых, к ней можно присоединять контакты только с помощью импульсной пайки. Поэтому пленка никеля покрывается золотом, которое закрывает все поры и трещины, имеющиеся в пленке.

Химическое золочение производится в следующем растворе г/л:

дицианоаурат калия $K[Au(CN)_2]$. .	2—4
лимоннокислый калий $C_6H_5O_2K_3H_2O$. .	50
хлористый аммоний NH_4Cl	75
гидрофосфат натрия NaH_2PO_2	10

Причем pH раствора должна поддерживаться в пределах 4—4,5, а температура 85—90° С, длительность процесса 10 мин. При таких параметрах раствора процесс будет интенсивным. В результате на поверхности никеля осаждается пленка золота толщиной 0,5—0,8 мкм, и суммарная толщина антикоррозионного покрытия достигает 2,5—3,0 мкм.

После золочения подложку кипятят в дистиллированной воде в течение 1 ч. Для устранения образования подтеков при высыхании воды на подложке ее промывают в этиловом спирте и высушивают в струе осушенного азота.

Осадки, полученные химическим способом, имеют аморфную структуру и нестабильны во времени. Для повышения их твердости и прочности, улучшения сцепления с основным металлом и друг с другом используется термоотжиг. При этом структура осадков из аморфной превращается в кристаллическую, характеристики пленок стабилизируются.

После химической защиты поверхности медных пленок, образующих проводящий рисунок на подложке, и металлизации ее обратной стороны пассивная часть микросхемы СВЧ готова. Установив ее в специальную армировку, можно произвести на ней все измерения, чтобы выяснить характеристики и степень пригодности к эксплуатации.

Для использования в аппаратуре микросхема герметизируется, стыкуется с помощью коаксиально полосковых переходов и коаксиальных кабелей с другими в единый блок.

При сборке на основание корпуса укрепляется металлизированное основание подложки. Для этого применяют токопроводящий клей, или галлиевомедный припой (амальгама меди в галлии). Иногда такого рода амальгамы называют металлическим клеем (мекладиш). Такой клей затвердевает при 25° С в течение 4 ч. При этом образуются интерметаллические соединения, устойчивые

в широком интервале температур (до 900°C). Причем ТКЛР его практически совпадает с ТКЛР корпуса.

После затвердевания клея к корпусу присоединяют предварительно разделанные и облуженные кабели. Каждый из них вставляется в гнездо-держатель, выштампованное в корпусе так, чтобы язычок-трансформатор, образованный из центральной жилы кабеля, приходился своей плоской частью на соответствующую ему полосковую линию, а зачищенный от внешней изоляции участок оплетки кабеля вошел в гнездо. В этом положении оплетка кабеля обжимается по кругу специальными усиками на концах держателей. Затем этот участок тщательно пропаивается так, чтобы не расплавить изоляцию кабеля. Для этого лучше применять легкоплавкие припой (например, ПОСК-50, ПОСВ-33, ПОСИС-1 ПОС-61). При необходимости используют флюсы. После пайки, надев шайбу из диэлектрика, служащую трансформатором, припаивают центральный проводник. Пайку ведут микропаяльником мощностью не более 4 вт, с острозаточенным жалом.

Затем корпус закрывают крышкой и пропаивают по всему контуру и в местах присоединения кабелей. Для повышения общей жесткости конструкции корпус иногда заполняют компаундом. Перед запайкой внутрь корпуса помещается несколько гранул пенополиуретана. После герметизации корпуса его прогревают, вспенивая пенополиуретан.

§ 5.5. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ СВЧ

При изготовлении гибридных интегральных схем СВЧ (ГИССВЧ) активные приборы (транзисторы, диоды) выполняются в виде навесных элементов и присоединяются к проводникам пассивных пленочных цепей. Пассивные элементы ГИССВЧ: конденсаторы, индуктивности, резисторы — изготавливаются на общей подложке и могут быть как распределенными, так и сосредоточенными. Для изготовления пассивных элементов используется реактивное катодное распыление на постоянном токе с осаждением на всю подложку с последующим гальваническим наращиванием или избирательным травлением. Реактивное катодное распыление позволяет со-

здать на подложке все пассивные элементы схемы путем комбинации в различной последовательности одних и тех же операций — распыления тантала в кислороде (Ta_2O_5) или азоте (TaN), анодирования тантала, напыления слоев хрома и золота, фотолитографии по различным слоям, электрохимического наращивания слоев золота.

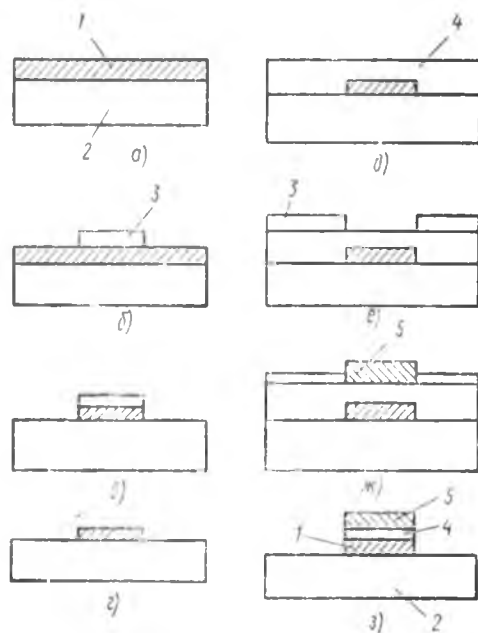


Рис. 5.13. Порядок изготовления пленочных проводников:

1 — тантал; 2 — керамика; 3 — фоторезист; 4 — хром и золото; 5 — золото

При нанесении *проводников* на подложку вначале осаждается слой тантала (рис. 5.13, а), затем наносится маска из фоторезиста (рис. 5.13, б), тантал травится (рис. 5.14, в), а фоторезист удаляется (рис. 5.13, г). После этого на всю поверхность подложки наносится слой хрома и золота (рис. 5.13, д), маска из фоторезиста (рис. 5.13, е) и производится гальваническое осаждение золота на незащищенные маской участки (рис. 5.13, ж). После удаления фоторезиста слой хрома и золота тра-

вится и на поверхности диэлектрической подложки остается многослойный проводник (рис. 5.13, з).

Резисторы ГИССВЧ получают из тантала, нитрида тантала или хромоникелевых пленок. В схемах, где применяются конденсаторы на основе окиси тантала, предпочтительно использовать для создания резисторов тантал, так как этапы создания резисторов и конденсаторов будут выполняться одновременно и резистивные элементы могут быть покрыты защитным слоем окиси тантала. Никельхромовые пленочные резисторы защищают слоем напыленной моноокиси кремния, это улучшает стабильность их характеристик во времени.

Для получения сопротивления требуемой величины используют анодирование слоя нитрида тантала. Толщина проводящего слоя изменяется за счет образования на поверхности слоя пентокиси тантала. Обычно вначале получают сопротивление, равное $20\text{--}30\text{ ом/мм}^2$, затем при помощи анодирования — сопротивление требуемой величины. При этом пентокись тантала будет и защитным покрытием.

Для создания *контактных площадок* на поверхность резистивного слоя наносится слой хрома и золота, на который осаждается материал проводника.

На рис. 5.14 приведена последовательность операций при создании тонкопленочных резисторов: *а* — нанесение пленки нитрида тантала; *б* — нанесение маски из фоторезиста; *в* — травление пленки нитрида тантала; *г* — удаление фоторезиста; *д* — нанесение маски из фоторезиста и вскрытие областей анодирования; *е* — анодирование нитрида тантала; *ж* — удаление фоторезиста; *з* — напыление слоя хрома и золота; *и* — нанесение маски из фоторезиста; *к* — вскрытие областей контактов; *л* — осаждение золота на области контактов; *м* — удаление фоторезиста и травление слоя хрома и золота.

Конденсаторы ГИССВЧ должны выполняться на основе диэлектрических материалов, имеющих малый тангенс угла диэлектрических потерь. В качестве диэлектриков используются моноокись кремния, имеющая добротность около 30, а двуокись кремния — около 50. Емкость пленки двуокиси кремния составляет $30\text{--}80\text{ пф/мм}^2$. Пленки моноокиси и двуокиси кремния можно получить термическим вакуумным испарением. Конденсаторы на основе пентокиси тантала получают с использованием анодирования слоя нитрида тантала. Технологический

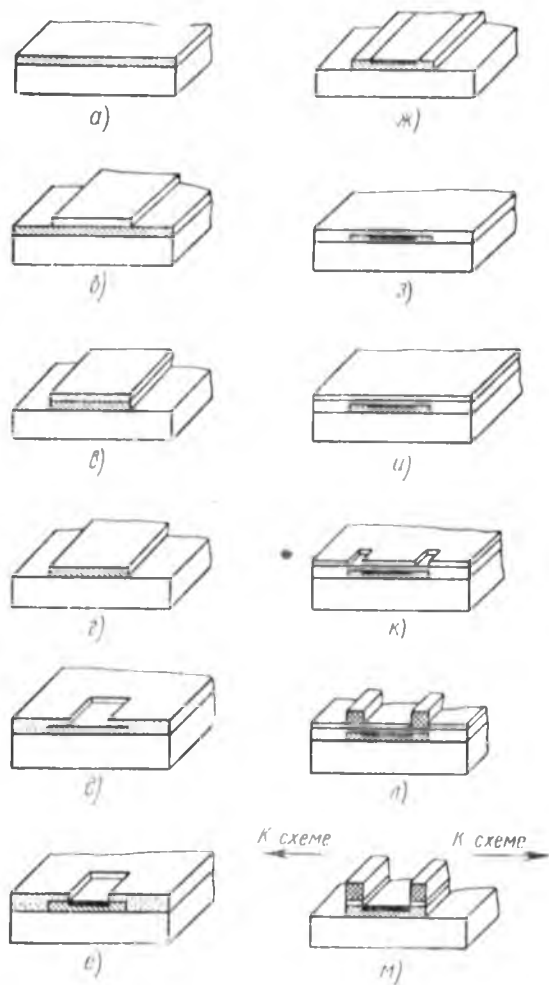


Рис. 5.14. Порядок изготовления тонкопленочных резисторов

процесс при этом предусматривает создание нижней обкладки конденсатора толщиной $1,5\text{--}2\text{ мкм}$ из алюминия, нанесение на нее слоя нитрида тантала, его анодирование для получения диэлектрической пленки пентаоксида тантала и осаждение верхней обкладки из слоя хрома и золота. Порядок изготовления тонкопленочного конден-

сатора схематически показан на рис. 5.15: *а* — напыление алюминия на подложку; *б* — нанесение маски из фоторезиста; *в* — травление алюминия; *г* — удаление фоторезиста; *д* — напыление тантала; *е* — нанесение маски из фоторезиста; *ж* — травление тантала; *з* — удаление

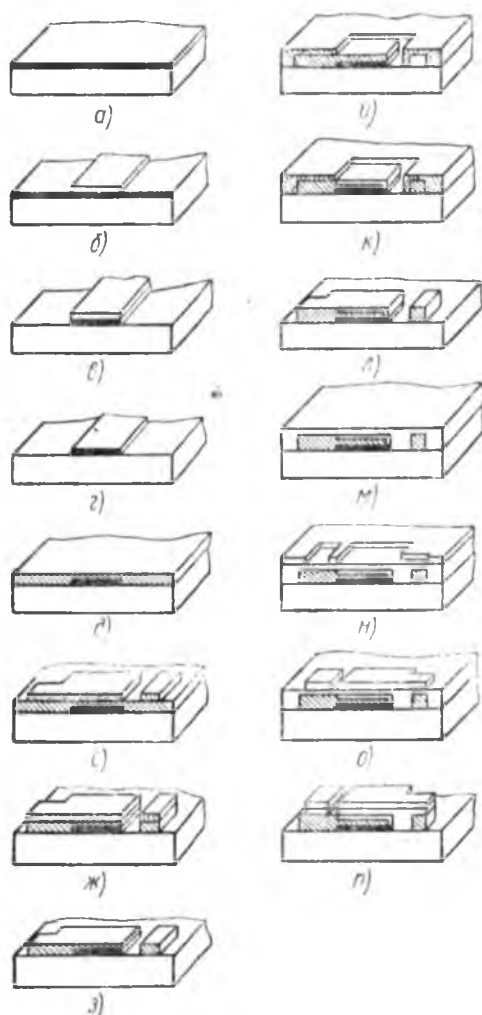


Рис. 5.15. Порядок изготовления тонко-
пленочных конденсаторов

фоторезиста; *и* — нанесение маски из фоторезиста и вскрытие областей анодирования тантала; *к* — анодирование тантала для образования диэлектрика; *л* — удаление фоторезиста; *м* — напыление хрома и золота; *н* — нанесение маски из фоторезиста; *о* — гальваническое наращивание контактов и удаление фоторезиста; *п* — травление слоя хрома и золота.

Пятоокись тантала имеет электрическую прочность, равную $6,5 \cdot 10^6$ в/см. Ее диэлектрическая постоянная равна 22, что затрудняет изготовление конденсаторов с величиной емкости, равной нескольким сотням микрофарад или менее. Размеры конденсатора можно увеличить до приемлемой величины добавлением пленки монооксида кремния ($\epsilon=6$). Удельная емкость конденсатора регулируется толщиной диэлектрика.

Схемы, содержащие конденсаторы, при изготовлении должны иметь очень гладкую поверхность подложки, во избежание короткого замыкания между обкладками. При использовании в качестве диэлектрика керамики, которая пориста и не имеет гладкую поверхность, применяется глазурирование тех участков ее поверхности, на которых будут изготовлены конденсаторы.

Селективное глазурирование ведется сектографией с последующей термообработкой подложки в тоннельной печи. В первой зоне обжига из глазури удаляются все летучие компоненты, во второй глазурь оплавляется.

Катушки индуктивности для ГИССВЧ представляют собой плоские спирали из металлической пленки с высокой проводимостью. Спираль с толщиной проводника в 2-3 скин-слоя обладает высокой добротностью, дальнейшее увеличение толщины снижает собственную резонансную частоту из-за дополнительной межвитковой емкости. Спираль изготавливается так же, как пленочный проводник (см. рис. 5.14).

Соединения с землей минимальной длины существенны в ГИССВС, получение их связано со сверлением отверстий в подложке перед нанесением проводников. В процессе нанесения проводников стенки отверстия металлизированы. Для сверления используется ультразвуковая обработка подложки свободным абразивом.

Технологический процесс изготовления ГИССВЧ состоит в следующем. Подложка тщательно очищается и участки, предназначенные для конденсаторов, глазурируются. Затем на нее напыляется слой алюминия толщи-

ной 1,5 мкм. Для избирательной металлизации поверхности подложки используется травление с применением микрофотографии. Алюминий остается на участках, предназначенных для конденсаторов. Затем на подложку напыляется нитрид тантала (или тантал) до требуемой расчетной толщины для резистивных пленок и диэлектрика конденсаторов. Тантал избирательно удаляется с поверхности подложки. Его пленка остается на участках конденсаторов и резисторов. Резистивные участки анодируются для получения требуемого сопротивления и защиты резисторов. После чего селективно анодируют участки конденсаторов и получают переходные отверстия в диэлектрической плате, на обе поверхности которой наносится затем тонкий слой хрома и золота. Толщина этой пленки около 1200 Å. На поверхность подложки наносится фотомаска, открытыми остаются участки проводников, катушек индуктивности и контактных площадок. Обе стороны пластины электролитически покрываются слоем золота толщиной от 4 до 10 мкм. Затем маска удаляется, слой хрома и золота стравливается, и подложка проходит термообработку при 180°С в течение 40 ч для стабилизации свойств пленок. После термотренировки ведется проверка сопротивления резисторов, тока утечки и емкости конденсаторов и защита поверхности ГИССВЧ от климатических воздействий. Каждая схема повторно проверяется по тем же параметрам, проходит визуальный контроль и передается на сборку.

Активными элементами для ГИССВЧ схем служат бескорпусные приборы, использующие барьер Шоттки, *p-n*-переход, *p-i-n*-структуру.

В низкочастотных цепях ГИССВЧ применяются и обычные транзисторы и диоды, а в качестве навесных — бескорпусные конденсаторы и толстопленочные резисторы. Так как пассивные элементы монтируются в схему с активными элементами, которые могут выйти из строя при температуре выше 200°С, надо использовать такую технологию сборки, которая не требует нагревания схемы выше данной температуры. Для монтажа используются способы соединения проводников, применяемые при производстве низкочастотных микросхем (термокомпрессия, точечная микросварка и т. д.). Навесной элемент приклеивается к диэлектрической подложке.

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛОСКОВЫХ ВОЛНОВОДОВ

При решении вопроса о серийном выпуске устройств СВЧ на основе полосковых волноводов необходимо учитывать влияние на электрические параметры погрешностей, обусловленных технологическим процессом их изготовления: геометрии полоскового волновода (погрешности размера полоскового проводника, формы его поперечного сечения, толщины диэлектрика); микрогеометрии (шероховатость токонесущей поверхности), а также погрешности удельного сопротивления металла проводников. Степень влияния этих погрешностей будет рассмотрена далее.

§ 6.1. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ НА ВЕЛИЧИНУ ПОТЕРЬ В ПОЛОСКОВОМ ВОЛНОВОДЕ

В полосковом волноводе существуют в общем случае два вида потерь: а) в проводниках; б) в диэлектрической среде, заполняющей волновод. Результирующее затухание рассматривается как сумма затуханий, вызванных потерями в проводниках и в диэлектрике. При этом фактическое значение затухания существенно превышает расчетное. Причина несовпадения в том, что при расчете не учитываются технологические погрешности при изготовлении полосковых волноводов, ведущие к росту затухания.

К таким погрешностям относятся: шероховатость токонесущих поверхностей полосковых проводников; отли-

чие сопротивлений металла проводников и «массивного» металла, на которые обычно ведется расчет затухания; многослойность полосковых проводников, состоящих из слоев металлов с разной проводимостью.

Технологический процесс изготовления плат полосковых волноводов заключается в металлизации одной поверхности платы и получении на другой рисунка полосковых проводников.

При получении волноводов на органическом диэлектрике с использованием электрохимической металлизации для увеличения адгезии на поверхности диэлектрика создаются микронеровности. Тот же метод используется при создании полосковых схем на СВЧ керамике, не содержащей стеклофазы, при металлизации с использованием вжигания.

Наносимые в вакууме металлические пленки сцепляются с диэлектриком за счет химических связей оксида, который образуется между проводником и подложкой в тонком слое металла с относительно высоким удельным сопротивлением, например хрома, титана или тантала, а химические связи образуются на очень гладкой поверхности подложки. На высокоомный промежуточный слой наносится металл, образующий собственно проводник.

Таким образом, шероховатость токонесущей поверхности и многослойность полосковых проводников обусловлены требованиями процесса изготовления полосковых волноводов. Структура металла, зернистость, пористость, величина внутренних напряжений и, следовательно, удельное сопротивление зависят также и от способа и режимов металлизации.

Для количественной оценки степени влияния микронеровностей поверхности на величину затухания можно использовать коэффициент потерь

$$k = 1 + k_{\lambda}(K - 1),$$

где k_{λ} — частотная поправка, зависящая от рабочей длины волны в волноводе,

$$k_{\lambda} = \operatorname{th} \frac{R_a}{1,8d},$$

R_a — среднеарифметическое отклонение микропрофиля; d — условная глубина проникновения; K — коэффициент шероховатости (отношение длины микропро-

филя к длине идеально гладкой токонесущей поверхности).

Коэффициент потерь показывает, во сколько раз увеличивается эффективная поверхность шероховатого проводника по сравнению с абсолютно гладким проводником, учитывает чистоту токонесущей поверхности и рабочую длину волны. Увеличение эффективной поверх-

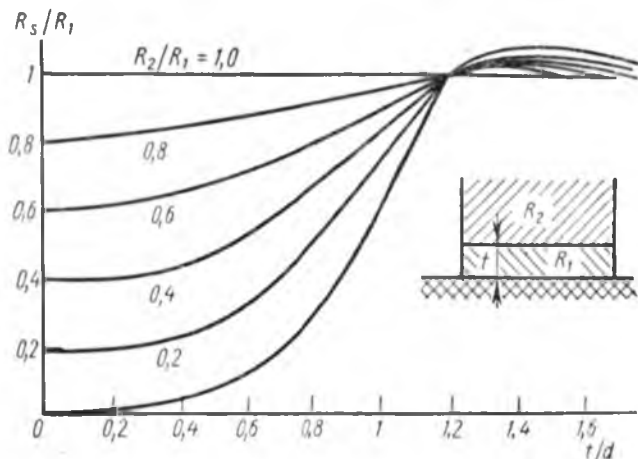


Рис. 6.1. Зависимость поверхностного сопротивления многослойной токонесущей поверхности от сопротивления слоев, их толщины и условной глубины проникновения

ности, без изменения линейных размеров проводников полоскового волновода, можно рассматривать как результирующее увеличение поверхностного сопротивления при абсолютно гладких токонесущих поверхностях. Значение поверхностного сопротивления токонесущих поверхностей возрастает в k раз.

Вещественная часть поверхностного сопротивления двухслойной токонесущей поверхности (рис. 6.1) определяется выражением

$$R_s = R_1 \times \frac{\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)^2 \exp(4t/d) + 2 \left[\left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2 - 1\right] \sin \frac{2t}{d} \exp 2t/d - \left(\frac{R_2}{R_1} - 1\right)^2}{\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)^2 \exp(4t/d) - 2 \left[\left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2 - 1\right] \cos \frac{2t}{d} \exp 2t/d + \left(\frac{R_2}{R_1} - 1\right)^2}, \quad (6.1)$$

где R_1 — удельное сопротивление поверхностной пленки; R_2 — удельное сопротивление материала проводника; t — толщина поверхностной высокоомной пленки металла; d — глубина скин-слоя для материала поверхностной пленки.

Следовательно, технологический процесс влияет на величину потерь в проводниках полоскового волновода, а значит, и на величину затухания.

Величина затухания в полосковом волноводе, обусловленного потерями в проводниках при известном распределении тока

$$\alpha_c = \frac{R_{s1}}{2Z_0} \int_c \frac{|J_1|^2}{|I|^2} dx + N \frac{R_{s2}}{Z_0} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|J_2|^2}{|I|^2} dx, \quad (6.2)$$

где Z_0 — характеристическое сопротивление полоскового волновода; $R_{s1} = (\pi f \mu_1 \rho_1)^{1/2}$ и $R_{s2} = (\pi f \mu_2 \rho_2)^{1/2}$ — поверхностное сопротивление в омах на квадрат для полоскового проводника и заземленных пластин соответственно; $J_1(x)$ и $J_2(x)$ — распределение плотности поверхностного тока; I — величина общего тока, проходящего через проводник. Величины μ_1 , μ_2 , ρ_1 , ρ_2 характеризуют магнитную проницаемость и удельное сопротивление материала проводника и заземленных пластин, f — рабочая частота. Множитель N зависит от типа полоскового волновода. Для симметричного полоскового волновода $N=1$, для несимметричного $N=1/2$. Интеграл первого слагаемого берется по контуру проводника, второго — по поверхности заземленной пластины.

Расчет величины затухания по (6.2) затруднен ввиду сложности аналитических выражений, характеризующих распределение плотности тока в полосковом проводнике и заземленной пластине. Для определения затухания в несимметричном и симметричном полосковых волноводах используют приближенный метод, основанный на «правиле приращения индуктивности». Общее выражение для сопротивления передающей линии

$$R = \frac{1}{\mu_0} \sum_j R_{sj} \frac{\partial L}{\partial n_j}, \quad (6.3)$$

где R — сопротивление линии, ом/м; R_s — поверхностное сопротивление, ом/м²; μ — магнитная проницаемость диэлектрической среды, н/м (для немагнитных диэлектри-

ков $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ н/м): ∂L — бесконечно малое приращение индуктивности, обусловленное бесконечно малым равномерным уменьшением размера ∂n всех проводников в направлении, перпендикулярном их поверхности.

Так как $a_c = \frac{R}{2Z_0}$, то из (6.3) запишем

$$a_c = \frac{1}{2\mu_0 Z_0} \sum_i R_{sj} \frac{\partial L}{\partial n_j}. \quad (6.4)$$

Это выражение используется для вывода формул величины затухания в несимметричном и симметричном полосковых волноводах, обусловленного потерями в проводниках.

Несимметричный полосковый волновод

Для несимметричного полоскового волновода (рис. 6.2) равномерное уменьшение размеров проводников выражается так:

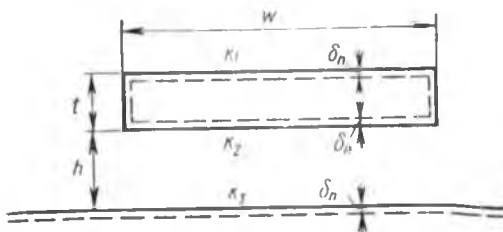


Рис. 6.2. Поперечное сечение несимметричного полоскового волновода

$$\delta n_j \left\{ \begin{array}{l} = \partial h - \text{смещение поверхности заземленного проводника;} \\ = \partial h - \text{смещение нижней поверхности проводника;} \\ = -\partial w - \text{смещение краев проводника;} \\ = -\partial t - \text{смещение нижней и верхней поверхностей проводника.} \end{array} \right.$$

Учитывая это, из (6.4) найдем:

$$a_c = \frac{1}{2\mu_0 Z_0} \left[R_{s1} \left(\frac{\partial L}{\partial h} - 2 \frac{\partial L}{\partial w} - 2 \frac{\partial L}{\partial t} \right) + R_{s2} \frac{\partial L}{\partial h} \right]. \quad (6.5)$$

Здесь R_{s1} — поверхностное сопротивление полоскового проводника; R_{s2} — поверхностное сопротивление заземленной пластины.

Учитывая что коэффициенты потерь поверхностей полоскового проводника внешней (K_1), внутренней (K_2) и поверхности заземленной пластины (K_3) в общем случае не равны, то

$$\alpha_\epsilon = \frac{1}{2\mu_0 Z_0} \left[\frac{R_{s1}}{2} \left(\frac{\partial L}{\partial h} - 2 \frac{\partial L}{\partial w} - 2 \frac{\partial L}{\partial t} \right) (k_1 + k_2) + k_3 R_{s2} \frac{\partial L}{\partial h} \right]. \quad (6.6)$$

Выражение для индуктивности следующее:

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\ln \frac{8h}{w'} + \frac{1}{32} \left(\frac{w'}{h} \right) \right] \quad \text{для } w/h \leq 2; \quad (6.7)$$

$$L = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{1}{\frac{w'}{2h} + \frac{1}{\pi} \left[2\pi e \left(\frac{w'}{h} + 0,94 \right) \right]} \quad \text{для } w/h > 2, \quad (6.8)$$

где $w' = w + \Delta w$; $\Delta w = \frac{t}{\pi} \ln \left(\frac{4\pi w}{t} + 1 \right)$ для $w/h \leq 1/2\pi$;

$$\Delta w = \frac{t}{\pi} \ln \left(\frac{2h}{t} + 1 \right) \quad \text{для } w/h > \frac{1}{2\pi}. \quad (6.9)$$

Используя выражения (6.7) и (6.8) с учетом (6.9), вычислим частные производные в (6.5). Дифференцируя, получим

$$\frac{\partial L}{\partial h} = -\frac{\mu_0}{2l^2} \cdot \frac{1}{2h} \left[1 + \frac{1}{\pi \left(\frac{w'}{2h} + 0,94 \right)} \right] \times$$

$$\times \left[\frac{2h}{\pi \left(\frac{2h}{t} + 1 \right)} - w' \right] h^{-1};$$

$$\frac{\partial L}{\partial w} = -\frac{\mu_0}{2l^2} \cdot \frac{1}{2h} \left[1 + \frac{1}{\pi \left(\frac{w'}{2h} + 0,94 \right)} \right];$$

$$\frac{\partial L}{\partial t} = -\frac{\mu_0}{2l^2} \cdot \frac{1}{2h} \left[1 + \frac{1}{\pi \left(\frac{w'}{2h} + 0,94 \right)} \right] \frac{1}{\pi} \left[\ln \left(\frac{2h}{t} + 1 \right) - \frac{2h}{2h+t} \right],$$

$$\text{где } I = \frac{w'}{h} + \frac{1}{\pi} \ln \left[2\pi e \left(\frac{w'}{2h} + 0,94 \right) \right].$$

Для $w/h \geq 2$

$$\frac{\partial L}{\partial h} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{1}{16h^2} - \frac{1}{(w')^2} \right] \frac{w'}{h} \left[\frac{2h^3}{\pi \left(\frac{2h}{t} + 1 \right)} - w' \right];$$

$$\frac{\partial L}{\partial w} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{1}{16h^2} - \frac{1}{(w')^2} \right] w';$$

$$\frac{\partial L}{\partial t} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{1}{16h^2} - \frac{1}{(w')^2} \right] \frac{w'}{\pi} \left[\ln \left(\frac{2h}{t} + 1 \right) - \frac{2h}{2h+t} \right].$$

Для $2 \geq w/h > \frac{1}{2\pi}$

$$\frac{\partial L}{\partial h} = -\frac{\mu_0}{2\pi} \left[1 - \left(\frac{w'}{4h} \right)^2 \right] \frac{1}{h};$$

$$\frac{\partial L}{\partial h} = -\frac{\mu_0}{2\pi} \left[1 - \left(\frac{w'}{4h} \right)^2 \right] \frac{1}{w'} \left(1 + \frac{4t}{4\pi w + t} \right);$$

$$\frac{\partial L}{\partial t} = -\frac{\mu_0}{2\pi} \left[1 - \left(\frac{w'}{4h} \right)^2 \right] \frac{1}{w'} \left[\frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{4\pi w}{t} + 1 \right) - \frac{4w}{4\pi w + t} \right].$$

Для $w/h \leq \frac{1}{2\pi}$,

подставляя значения производных в (6.5), имеем для $w/n \geq 2$

$$\begin{aligned} a_c = & \frac{R_s \left[1 + \frac{1}{\pi (w' / 2h + 0,94)} \right]}{8Z_0 h \left\{ \frac{w'}{2h} + \frac{1}{\pi} \ln \left[2\pi e \left(\frac{w'}{h} + 0,94 \right) \right] \right\}^2} \times \\ & \times \left\{ (k_1 + k_2) \left[1 + \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{2h}{t} + 1 \right) - \frac{2h}{\pi (2h+t)} \right] - \right. \\ & \left. - \left[\frac{2h^2}{\pi (2h+t)} - \frac{w'}{h} \right] \left(\frac{k_1 + k_2}{2} + k_3 \right) \right\}; \quad (6.10) \end{aligned}$$

для $2 \geq \frac{w}{h} > \frac{1}{2\pi}$

$$a_c = \frac{R_s w'}{4\pi Z_0} \left(\frac{1}{16h^2} - \frac{1}{w'^2} \right) \left\{ \frac{1}{h} \left[\frac{2h}{\pi(2h+t+1)} - w' \right] \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{k_1 + k_2}{2} + k_3 \right) - \frac{k_1 + k_2}{2} \left[2 - \frac{1}{2\pi} \left(\ln \frac{2h}{t} + 1 \right) - \frac{2h}{2h+t} \right] \right\}; \quad (6.11)$$

$$\text{Для } w/h \leq \frac{1}{2\pi}$$

$$a_c = \frac{R_s}{4\pi Z_0} \left[1 - \left(\frac{w'}{4h} \right)^2 \right] \left\{ \left[\frac{w'}{2h} + \left(1 + \frac{4t}{4\pi w + t} \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{4\pi w}{t} + 1 \right) - \frac{4w}{4\pi w + t} \right] \frac{k_1 + k_2}{w'} + k_3 \frac{1}{h} \right\}. \quad (6.12)$$

Симметричный полосковый волновод

В симметричном полосковом волноводе смещение токонесущих поверхностей δn (рис. 6.3) надо рассматривать на внутренних поверхностях двух заземленных плоскостей и на четырех поверхностях полоскового провод-

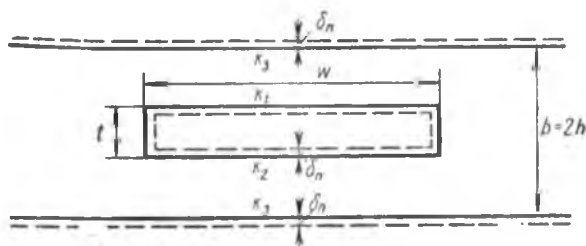


Рис. 6.3. Поперечное сечение симметричного полоскового волновода

ника. Выраженное через размеры поперечного сечения изменение δn , перпендикулярное к поверхностям заземленных плоскостей, требует изменения расстояния между ними на $\delta b = 2\delta n$. Необходимые изменения в размерах полоскового проводника будут при $\delta w = -2\delta n$ и $\delta t = -2\delta n$.

Выражение (6.4) можно для симметричного волновода преобразовать

$$\alpha_e = \frac{R \sqrt{\epsilon_r}}{2 \cdot 376,6 Z_0} \left(\frac{\partial Z_0}{\partial n} \right), \quad (6.13)$$

где R — сопротивление линии ом/м; ϵ_r — эффективная диэлектрическая проницаемость.

Полное изменение величины Z_0 за счет равномерного изменения δn с учетом коэффициентов потерь принимает вид:

$$\frac{\partial Z_0}{\partial n} = 2 \frac{\partial Z_0}{\partial b} k_3 - \left(\frac{\partial Z_0}{\partial w} + \frac{\partial Z_0}{\partial t} \right) (k_1 + k_2), \quad (6.14)$$

где k_1 и k_2 — коэффициенты потерь поверхностей полоскового проводника; k_3 — коэффициент потерь поверхностей заземленных пластин.

При широком полосковом проводнике, когда справедливо неравенство $w/(b-t) \geq 0,35$ и $t/b \geq 0,25$,

$$Z_0 = \frac{94,15}{\sqrt{\epsilon_r} \left(\frac{w}{1-t} \frac{b}{b} + \frac{C_f'}{0,0885 \epsilon_r} \right)}, \quad (6.15)$$

где C_f' — краевая емкость между одним краем полоскового проводника и заземленной плоскостью.

Используя это выражение, найдем частные производные выражения (6.14):

$$\frac{\partial Z_0}{\partial b} = \frac{\sqrt{\epsilon_r} Z_0^2}{94,15 b} \left(\frac{w/b}{1+t/b} + \frac{wt/b^2}{(1+t/b)^2} - \frac{b}{0,0885 \epsilon_r} \cdot \frac{\partial C_f'}{\partial b} \right);$$

$$\frac{\partial Z_0}{\partial w} = - \frac{\sqrt{\epsilon_r} Z_0^2}{94,15 b} \left(\frac{1}{1-t/b} + \frac{b}{0,0885 \epsilon_r} \cdot \frac{\partial C_f'}{\partial b} \right);$$

$$\frac{\partial Z_0}{\partial t} = - \frac{\sqrt{\epsilon_r} Z_0^2}{94,15 b} \left[\frac{w/b}{(1-t/b)^2} + \frac{b}{0,0885 \epsilon_r} \cdot \frac{\partial C_f'}{\partial t} \right];$$

$$\frac{\partial C_f'}{\partial x} = \frac{0,0885 \epsilon_r}{\pi} \ln \left(\frac{x+1}{x-1} \right), \quad \text{где } x = \frac{1}{1-t/b}.$$

Поскольку $\frac{\partial C_f'}{\partial b} = \frac{\partial C_f'}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial b}$ и аналогично для w и

t , то найдем значение $\frac{\partial C_f'}{\partial x}$, учитывая, что

$$\frac{\partial x}{\partial w} = 0; \quad \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{1}{b(1-t/b)^2}; \quad \frac{\partial x}{\partial b} = - \frac{t/b}{b(1-t/b)^2};$$

подставив эти соотношения в уравнение (6.13), получим

$$\alpha_c = \frac{\epsilon_r Z_0 R}{2 \cdot 376,6 \cdot 94,15} \left\{ 2k_a \left[w - \frac{b}{\pi} \ln(2b-t) \right] + \right. \\ \left. + (k_1 + k_2) \left[b - t + w + \frac{b}{\pi t} \ln(2b-t) \right] \right\}. \quad (6.16)$$

С помощью этих выражений можно рассчитать на этапе разработки величину затухания α_c в симметричном и несимметричном полосковых волноводах с учетом потерь, обусловленных технологическим процессом, или по допустимой величине затухания выбрать технологический процесс изготовления.

При изготовлении полосковых волноводов с предварительной гальванохимической металлизацией поверхности диэлектрика или с использованием термического вакуумного испарения металла, токонесущие поверхности полоскового проводника получают заведомо шероховатыми.

Поверхность нанесенного на диэлектрик металла воспроизводит ее микрогеометрию, т. е. шероховатость микрогеометрии токонесущих поверхностей полоскового проводника определяется микрогеометрией поверхности диэлектрика. Если его поверхность предварительно обрабатывается абразивами для создания на ней определенного микрорельефа, то для микрогеометрии поверхности диэлектрика определяющим фактором является величина зерна абразива.

Таблица 6.1

Применяемый абразив	Коэффициент шероховатости	Высота микронеровностей, мкм, R_z	Класс точности
16	1,23—1,35	25—35	4
12	1,3 —1,33	14—18	5
10	1,47—1,5	8—10	6
8	1,88—1,9	6,5—7	7

Значения коэффициентов шероховатости близки по величине для одинаковых абразивов и изменяются аналогично изменению размеров зерна рабочего абразива.

В табл. 6.1 приведены усредненные значения коэффициентов шероховатости поверхности диэлектриков в за-

висимости от применяемого абразива. Наиболее стабильные значения коэффициентов шероховатости имеют место при обработке поверхности диэлектрика зернением. При пескоструйной обработке необходимо стабилизировать ее режимы для получения полосковых волноводов с воспроизводимыми параметрами. То же относится и к обработке поверхности диэлектриков ультразвуковыми колебаниями в водной суспензии абразива.

Из табл. 6.1 видно, что величина коэффициента шероховатости возрастает с ростом класса чистоты обрабатываемой поверхности.

Форма и высота микронеровностей на поверхности диэлектрика случайны, так как зависят от различных факторов, не подчиняющихся определенной функциональной зависимости (колебание давления воздуха в сети, направление и сила удара частицы о поверхность диэлектрика при пескоструйной обработке; форма частицы и давление на нее при зернении и т. д.). Используя микрофотографии поперечного сечения полосковых систем, можно построить кривые распределения величин углов при вершине микронеровностей. При этом каждому абразиву соответствует вполне определенный наиболее вероятный угол при вершине микронеровностей. Значения этих углов приведены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Применяемый абразив	α , град	$\operatorname{cosec} \frac{\alpha}{2}$
16	104	1,3
12	96	1,32
10	82	1,5
8	60	1,9

Приняв наиболее вероятное значение угла одинаковым для всех микронеровностей, можно показать, что

$$K = \frac{L_{\text{ломаной}}}{L_{\text{прямой}}} = \operatorname{cosec} \frac{\alpha}{2}. \quad (6.17)$$

Причем вычисленные значения K весьма близки к экспериментальным значениям.

При повышении чистоты поверхности шлифованием или притиркой ее микрогеометрия изменяется за счет изменения высоты микронеровностей, что уменьшает значения K . При обработке же поверхности диэлектрика зернированием с применением абразивов различной зернистости изменяется и угол при вершине микронеровностей, значения K при уменьшении величины зерна растут.

Из выражения (6.17), табл. 6.1 и 6.2 видна связь

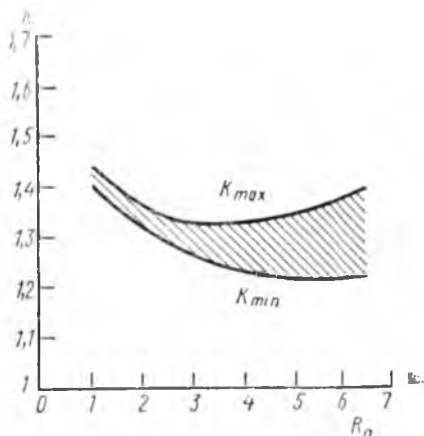


Рис. 6.4. Зависимость коэффициента шероховатости от высоты микронеровностей

между коэффициентом шероховатости и высотой микронеровностей.

Учитывая, что для определения R_a существуют специальные приборы, с помощью уравнения $K=f(R_a)$ можно контролировать значения коэффициента шероховатости токонесущих поверхностей непосредственно в процессе их изготовления.

Зависимость $K=f(R_a)$ приведена на рис. 6.4. Кривые K_{max} и K_{min} соответствуют верхнему и нижнему значениям высоты микронеровностей для дан-

ного класса чистоты поверхности.

Для упрощения анализа влияния шероховатости токонесущей поверхности на величину затухания в симметричном полосковом волноводе по результатам расчетов и экспериментов построена номограмма (рис. 6.5). С ее помощью можно определить значения $a_{ш}/a_c$ и K , зная в качестве исходной только величину зерна рабочего абразива.

На шкалах 1 и 8 номограммы отложен номер применяемого абразива (размер зерна), на шкалах 2 и 5 — крайние значения коэффициента шероховатости, на шкалах 3 и 7 — крайние значения $a_{ш}/a_c$, шкалы 4 и 6 дополнительные и используются при изменении величины зерна абразива в процессе обработки поверхности диэлектрика.

Для оценки значений коэффициента шероховатости и изменения затухания, вызванного потерями в металле, с учетом K надо соединить точки шкал 1 и 8, соответствующие применяемому абразиву: пересечение с со-

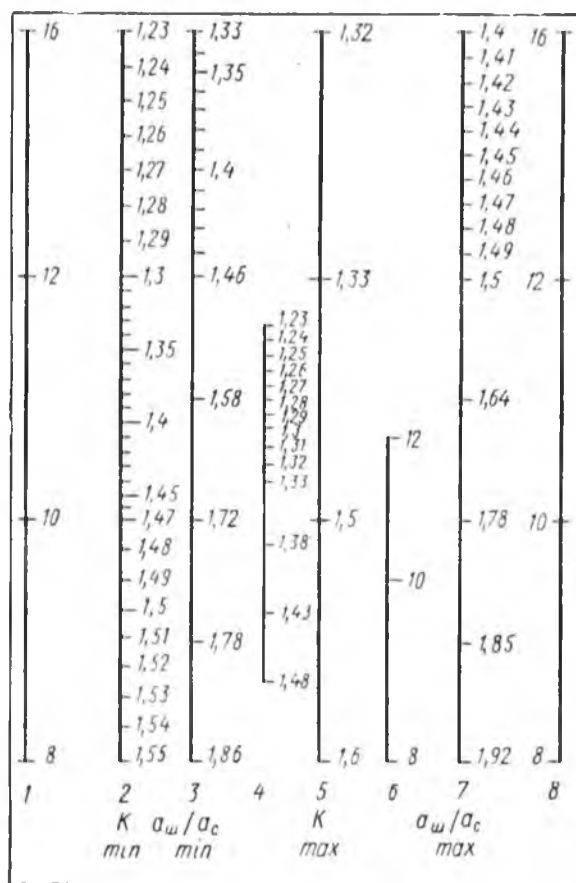


Рис. 6.5. Номограмма для определения степени влияния шероховатости на величину затухания

ответствующими шкалами дает искомые величины. При изменении величины зерна абразива в процессе обработки значения K можно найти соединением точек на шкале 1, соответствующих исходному абразиву, с точками

на шкале 6, которые соответствуют конечной величине зерна. Пересечение со шкалами 4 и 5 дает искомые значения K . Для определения $a_{\text{ш}}/a_c$ найденные на шкале 4 величины перенести на шкалу 2 и провести из них и точек на шкалах 5 горизонтальные линии до пересечения со шкалами 3 и 7. Как видно из номограммы, влияние микрогеометрии токонесущих поверхностей на величину затухания в симметричном полосковом волноводе, обусловленного потерями в металле проводников, значительно и при изменении величины K в пределах 1,2—1,5 значение $a_{\text{ш}}$ изменяется в пределах (1,2—1,92), a_c для $w/h=0,1-3$.

§ 6.2. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛОСКОВЫХ ВОЛНОВОДОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ

При изготовлении полосковых волноводов неизбежен разброс геометрических размеров (ширины полоскового проводника w , толщины диэлектрика h) относительно номинальных величин. При определении статистических параметров волнового сопротивления для полосковых волноводов необходимо определить плотность вероятности этого сопротивления при нормальном законе распределения геометрических размеров.

Рассмотрим случай *несимметричного* полоскового волновода с $w/h \leq 1$. Для этого используется выражение

$$Z_0 = \frac{1}{2\pi} (\mu/\varepsilon)^{1/2} \ln \frac{8h}{w}; \quad \mu = 1,26 \cdot 10^{-6}; \quad \varepsilon = 8,85 \cdot 10^{-12} \varepsilon_{\text{эф.н.}} \quad (6.18)$$

Для *симметричного* полоскового волновода с $\frac{w'}{2h-t} < 0,35$ выражение (6.18) принимает вид:

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{\text{эф.н.}}}} \ln \frac{16h}{\pi w}, \quad (6.18a)$$

где w и h — случайные величины, распределение которых подчиняется нормальному закону. Для определения плотности вероятности волнового сопротивления необходимо найти плотность вероятности логарифма отношения двух случайных величин w и h , имеющих нормальные законы распределения вероятностей.

Выражение для плотности вероятности случайной величины $\eta = f(\xi_1, \dots, \xi_n)$, если известна совместная функция распределения $w(x_1; x_2; \dots; x_n)$ случайных величин $\xi_1; \xi_2; \dots, \xi_n$, следующее:

$$W_1(y) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \delta[f(x_1; x_2; \dots; x_n)] w_n(x_1 \dots x_n) \times \\ \times dx_1 \dots dx_n. \quad (6.19)$$

Для функционального преобразования двух величин ($n=2$) выражение (6.19) имеет вид:

$$W_1(y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \delta[f(x_1; x_2) - y] w_2(x_1; x_2) dx_1 dx_2. \quad (6.20)$$

Вначале рассмотрим случай $\eta = \xi_1/\xi_2$, т. е. $z = f(x_1; x_2) = x_1/x_2$. Заменяя x_2 его выражением через x_1 и z и интегрируя по z , обозначив $x_1 = u$, получим

$$W_1(y) = \int_{-\infty}^{\infty} w_2\left(u; \frac{u}{y}\right) \frac{|u|}{y^2} du. \quad (6.21)$$

Запишем двумерную плотность вероятности отношения совместно нормальных и случайных величин в (6.21):

$$w_2(x_1; x_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-R^2}} \exp\left\{-\frac{1}{2(1-R^2)} \times \right. \\ \times \left[\frac{(x_1-h)^2}{\sigma_1^2} - 2R\frac{(x_1-h)(x_2-w)}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{(x_2-w)^2}{\sigma_2^2}\right]\Bigg\}, \quad (6.22)$$

где $h, \sigma_1^2, w, \sigma_2^2$ — средние значения случайных величин ξ_1 и ξ_2 соответственно; R — коэффициент корреляции между ξ_1 и ξ_2 .

Подставив (6.22) в (6.21), получим выражение для плотности вероятности случайной величины $\eta = \xi_1/\xi_2$.

$$W_1(y) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2 y^2 \sqrt{1-R^2}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{-\frac{1}{2(1-R^2)} \times \right. \\ \times \left[\frac{(u-h)^2}{\sigma_1^2} - \frac{2R(u-h)\left(\frac{u}{y}-w\right)}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{\left(\frac{u}{y}-w\right)^2}{\sigma_2^2}\right]\Bigg\} |u| du. \quad (6.23)$$

Преобразуем показатель степени в подынтегральном выражении. Раскрыв скобки и обозначив

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{\sigma_2^2 y^2 - 2R\sigma_1\sigma_2 y + \sigma_1^2}{2(1+R^2)\sigma_1^2\sigma_2^2 y^2}; \\ B &= \frac{(b\sigma_1^2 - h\sigma_1\sigma_2 R) + (h\sigma_2^2 - h\sigma_1\sigma_2 R)y}{2(1-R^2)\sigma_1^2\sigma_2^2 y}; \\ C &= \frac{h^2\sigma_2^2 - 2Rwh\sigma_1\sigma_2 + w^2\sigma_1^2}{2(1-R^2)\sigma_1^2\sigma_2^2}; \end{aligned} \right\} \quad (6.24)$$

имеем

$$W_1(y) = \frac{\exp(-C)}{2\pi\sigma_1\sigma_2 y^2 \sqrt{1-R^2}} \int_{-\infty}^{\infty} |u| \exp[-(Au^2 - 2Bu)] du. \quad (6.25)$$

Дополним показатель экспоненты в этом выражении до полного квадрата:

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{\infty} |u| \exp\left[-\left(Au^2 - 2Bu + \frac{B^2}{A} - \frac{B^2}{A}\right)\right] du = \\ & = \exp\left(\frac{B^2}{A}\right) \int_{-\infty}^{\infty} |u| \exp\left[-\left(\sqrt{A}u - \frac{B}{\sqrt{A}}\right)^2\right] du. \end{aligned} \quad (6.26)$$

Произведем замену переменных $t = u\sqrt{A} - B/\sqrt{A}$

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{\infty} |u| \exp[-(Au^2 - 2Bu)] du = \frac{1}{\sqrt{A}} \exp\left(\frac{B^2}{A}\right) \times \\ & \times \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{B}{A} + \frac{t}{\sqrt{A}} \right| \exp(-t^2) dt = \frac{2B}{A\sqrt{A}} \exp\left(\frac{B^2}{A}\right) \times \\ & \times \int_0^{\infty} \exp(-t^2) dt + \frac{2}{A} \exp\left(\frac{B^2}{A}\right) \int_0^{\infty} \exp(-t^2) t dt. \end{aligned} \quad (6.27)$$

Заменяя переменную интегрирования $z=t^2$, вычислим интегралы уравнения (6.27):

$$\begin{aligned}\int_0^{\infty} \exp(-t^2) dt &= \frac{1}{2} \int_0^{\infty} z^{-\frac{1}{2}} \exp(-z) dz = \\ &= \frac{1}{2} \Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{\sqrt{\pi}}{2}; \\ \int_0^{\infty} t \exp(-t^2) dt &= \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \exp(-z) dz = \frac{1}{2}.\end{aligned}$$

Подставляя вычисленные значения интегралов в (6.25), получим

$$W_1(y) = \frac{\exp\left(\frac{B^2}{A} - C\right)}{2\pi\sigma_1\sigma_2 y^2 A \sqrt{1-R^2}} \cdot \left(1 - \frac{B\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}\right). \quad (6.28)$$

Заменяя A, B, C их значениями из (6.24), найдем выражение для плотности вероятности отношения размеров поперечного сечения полоскового волновода:

$$\begin{aligned}W_1(y) &= \frac{\sqrt{1-R^2}}{\pi} \cdot \frac{\sigma_1\sigma_2}{\sigma_1^2 - 2R\sigma_1\sigma_2 y + \sigma_2^2 y^2} \exp \times \\ &\times \left[\frac{-(h-by)}{2(\sigma_1^2 - 2R\sigma_1\sigma_2 y + \sigma_2^2 y^2)} \right] \left[1 + \sqrt{\frac{\pi}{2(1-R^2)}} \times \right. \\ &\times \left. \frac{\sigma_1(\omega\sigma_1 - Rh\sigma_2) + \sigma_2 y(h\sigma_2 - R\omega\sigma_1)}{\sigma_1\sigma_2 (\sigma_1^2 - 2R\sigma_1\sigma_2 y + \sigma_2^2 y^2)^{\frac{1}{2}}} \right]. \quad (6.29)\end{aligned}$$

Для нормированных значений вариаций случайных величин $\sigma_1/h = \gamma_1$, $\sigma_2/\omega = \gamma_2$ и $h/\omega = q$ это выражение примет вид:

$$W_1(y) = \frac{q\sqrt{1-R^2}}{\pi} \cdot \frac{\gamma_1\gamma_2}{\gamma_1^2 q^2 - 2R\gamma_1\gamma_2 q y + \gamma_2^2 y^2} \times$$

$$\times \left[1 + \sqrt{\frac{\pi}{2(1-k^2)}} \cdot \frac{q\gamma_1(\gamma_1 - \gamma_2 R) + \gamma_2 y(\gamma_2 - \gamma_1 R)}{\gamma_1 \gamma_2 (\gamma_1^2 q^2 - 2R\gamma_1 \gamma_2 qy + \gamma_2^2 y^2)^{\frac{1}{2}}} \right] \times \\ \times \exp \left[\frac{-(q-y)^2}{2(\gamma_1^2 q^2 - 2R\gamma_1 \gamma_2 qy + \gamma_2^2 y^2)} \right]. \quad (6.30)$$

Рассмотрим теперь закон распределения случайной величины Z_0 , связанной со случайными величинами ξ_1 и ξ_2 соотношением

$$\xi = a \ln \left(k \frac{\xi_1}{\xi_2} \right) = a \ln(k\eta). \quad (6.31)$$

Выражение для плотности вероятности отношения двух случайных величин определяется соотношением (6.21), а плотность вероятности случайной величины определяется соотношением

$$W_1(Z_0) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta[f(y) - Z_0] w_1(y) dy = \\ = w_1[f(Z_0)] \left| \frac{dy}{dz} \right|. \quad (6.32)$$

Для рассматриваемого случая

$$Z_0 = a \ln ky = f(y); \\ y = f(Z_0) = \frac{1}{k} \exp \left(\frac{Z_0}{a} \right); \\ \frac{dy}{dZ_0} = \frac{1}{ak} \exp \left(\frac{Z_0}{a} \right).$$

$$\text{Тогда } W_1(Z_0) = W_1 \left[\frac{1}{k} \exp \left(\frac{Z_0}{a} \right) \right] \frac{1}{ak} \exp \left(\frac{Z_0}{a} \right).$$

Подставив в (6.21) вместо y его значения через Z_0 , получим

$$W_1(Z_0) = \frac{k}{a} \exp \left(-\frac{Z_0}{a} \right) \times \\ \times \int_{-\infty}^{\infty} |u| w_2 \left[u; ku \exp \left(-\frac{Z_0}{a} \right) \right] du. \quad (6.33)$$

Подставляя (6.29) в (6.33), определим плотность вероятности логарифма отношения размеров полоскового волновода. После подстановки и некоторых преобразований

$$\begin{aligned}
 W_1(Z_0) = & \frac{k \sqrt{1-R^2}}{a\pi} \times \\
 & \times \frac{\sigma_1 \sigma_2 \exp\left(\frac{Z_0}{a}\right)}{k^2 \sigma_1^2 - 2Rk\sigma_1 \sigma_2 \exp\left(\frac{Z_0}{a}\right) + \sigma_2^2 \exp\left(\frac{2Z_0}{a}\right)} \times \\
 & \times \left\{ 1 + \sqrt{\frac{\pi}{2(1-R^2)}} \times \right. \\
 & \times \frac{k\sigma_1(w\sigma_1 - Rh\sigma_2) + \sigma_2(h\sigma_2 - R w\sigma_1) \exp\left(\frac{Z_0}{a}\right)}{\sigma_1 \sigma_2 \left[k^2 \sigma_1^2 - 2Rk\sigma_1 \sigma_2 \exp\left(\frac{Z_0}{a}\right) + \sigma_2^2 \exp\left(\frac{2Z_0}{a}\right) \right]^{\frac{1}{2}}} \left. \right\} \times \\
 & \times \exp \left\{ - \frac{\left| kh - w \exp\left(\frac{Z_0}{a}\right) \right|^2}{2 \left[k^2 \sigma_1^2 - 2Rk\sigma_1 \sigma_2 \exp\left(\frac{Z_0}{a}\right) + \sigma_2^2 \exp\left(\frac{2Z_0}{a}\right) \right]} \right\}.
 \end{aligned} \tag{6.34}$$

Для нормированных значений, учитывая (6.30), выражение (6.34) можно переписать:

$$\begin{aligned}
 W_{1n}(Z_0) = & \frac{kq \sqrt{1-R^2}}{a\pi} \times \\
 & \times \frac{\gamma_1 \gamma_2 \exp\left(\frac{Z_0}{a}\right)}{k^2 \gamma_1^2 q^2 - 2R\gamma_1 \gamma_2 kq \exp\left(\frac{Z_0}{a}\right) + \gamma_2^2 \exp\left(\frac{2Z_0}{a}\right)} \times \\
 & \times \left\{ 1 + \sqrt{\frac{\pi}{2(1-R^2)}} \times \right.
 \end{aligned}$$

$$\times \frac{k\gamma_1(\gamma_1 - \gamma_2 R) + \gamma_2(\gamma_2 - \gamma_1 R) \exp\left(\frac{Z_0}{a}\right)}{\gamma_1 \gamma_2 \left[k^2 \gamma_1^2 q^2 - 2Rk\gamma_1 \gamma_2 q \exp\left(\frac{Z_0}{a}\right) + \gamma_2^2 \exp\left(\frac{2Z_0}{a}\right) \right]^{\frac{1}{2}}} \times$$

$$\times \exp \left\{ - \frac{\left[kq - \exp\left(\frac{Z_0}{a}\right) \right]^2}{2 \left[k^2 \gamma_1^2 q^2 - 2Rk\gamma_1 \gamma_2 q \exp\left(\frac{Z_0}{a}\right) + \gamma_2^2 \exp\left(\frac{2Z_0}{a}\right) \right]} \right\} \quad (6.34a)$$

На рис. 6.6 показаны кривые распределения, построенные из (6.34a) в предположении, что коэффициент корреляции $R = 0$, а на рис. 6.7, а, б и в даны зависимость, характеризующие величину поля допуска на волновое сопротивление полоскового волновода при нулевой, десятипроцентной и двадцатипроцентной вероятности брака.

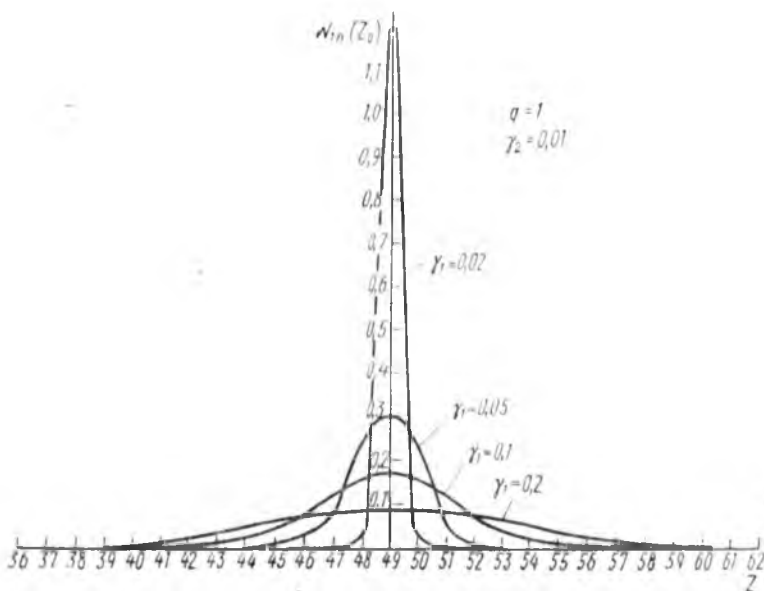
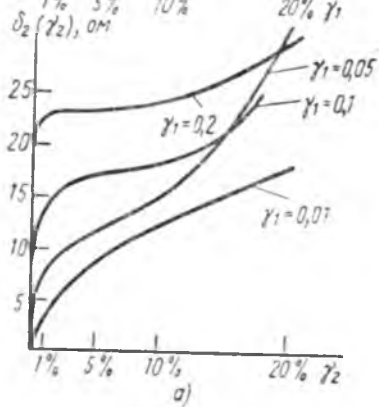
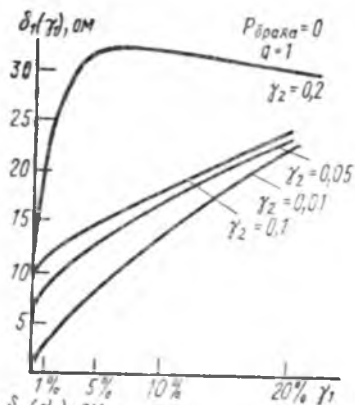
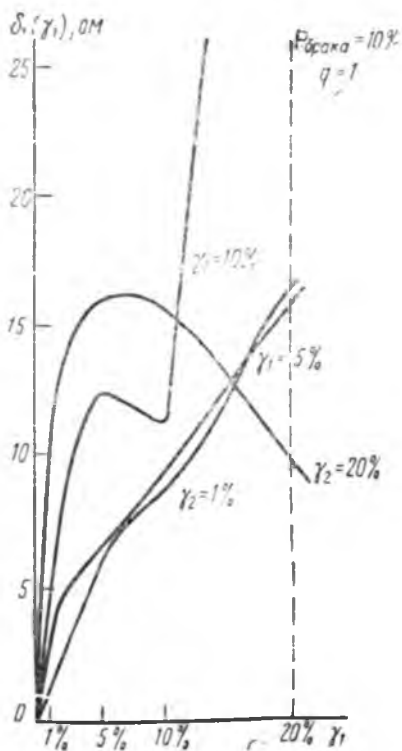
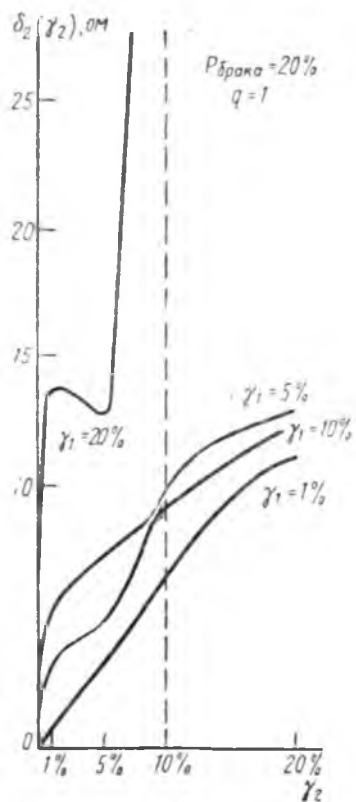


Рис. 6.6. Плотность вероятности волнового сопротивления полоскового волновода





б)

Рис. 6.7

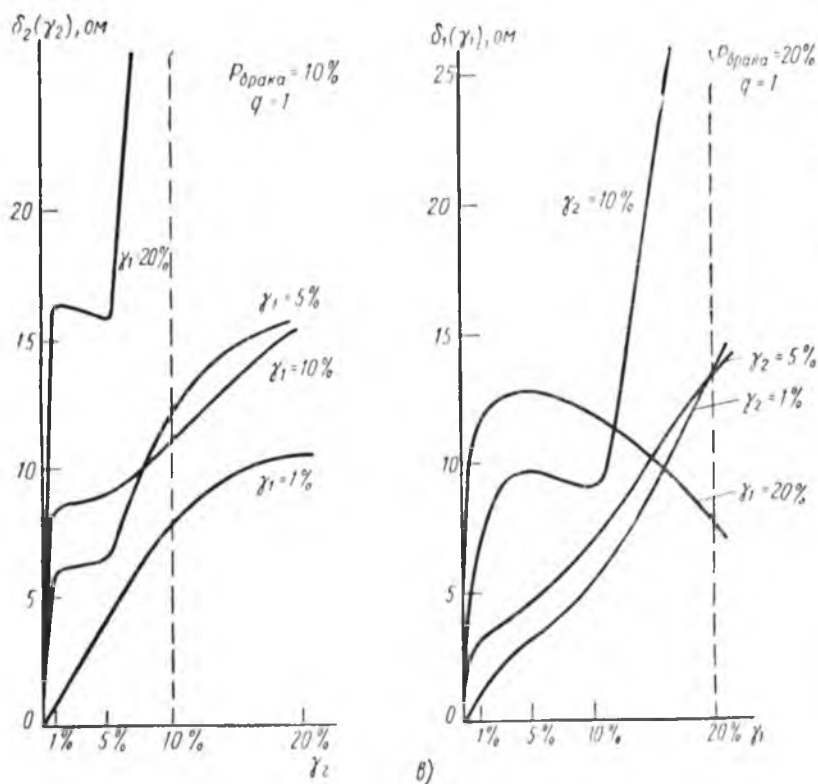


Рис. 6.7 (продолжение). Поле допуска $\delta_1(\gamma_1)$ и $\delta_2(\gamma_2)$ на волноводе сопротивление $Z_0 = 50$ ом полоскового волновода при вероятности брака, равной нулю (а); 10% и 20% (б, в)

С помощью выражения плотности вероятности волнового сопротивления можно определить оптимальные значения номинальных размеров при данном процессе производства (при заданном разбросе), для которых вероятность нахождения Z_0 в требуемых пределах будет максимальной.

Возможно и решение обратной задачи — по допустимому разбросу определить значения допусков на ω и h , при которых вероятность попадания Z_0 в допуск будет заданной.

Пусть задана область допустимых значений Z_0 , равноценная во всех точках. Воспользовавшись выражением

для плотности вероятности Z_0 (6.34), можно вычислить вероятность нахождения Z_0 в области допустимых значений при разбросе w и h , характерном для данного технологического процесса:

$$\beta = \iint_B M(Z_0) dw dh, \quad (6.35)$$

где B — область допустимых значений w и h .

Необходимо найти такой вектор $\bar{M}_0(Z_0) \in B$, для которого вероятность, вычисленная из (6.35), была бы максимальной.

Поскольку область B определяется двумя независимыми переменными w и h , выражение (6.35) будет

$$\beta = \int_{\min w}^{\max w} dw \int_{\min h}^{\max h} M(Z_0) dh. \quad (6.36)$$

Для определения оптимальных номинальных значений параметров w и h возьмем частные производные этой формулы и приравняем их нулю:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \Delta h} \int_{\min w}^{\max w} dw \int_{\min h}^{\max h} M(Z_0) dh &= 0; \\ \frac{\partial}{\partial \Delta w} \int_{\min w}^{\max w} dw \int_{\min h}^{\max h} M(Z_0) dh &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6.37)$$

Учитывая, что

$$\begin{aligned} \max w - \min w &= l_1, \\ \max h - \min h &= l_2, \end{aligned} \quad (6.38)$$

подставив в (6.37) выражение (6.34), после дифференцирования и некоторых преобразований имеем систему из двух уравнений с двумя неизвестными для определения Δw и Δh :

$$\left. \begin{aligned} & \frac{L}{2} \left[\frac{8\sigma_2}{\sigma_1} \ln \frac{\sigma_1^2 N^2 + \sigma_2^2 L^2}{\sigma_1^2 P^2 + \sigma_2^2 L^2} + \frac{V\sqrt{2\pi}}{\sigma_1^2} \left(\sqrt{\sigma_1^2 N^2 - \sigma_2^2 L^2} - \right. \right. \\ & \left. \left. - \sqrt{\sigma_1^2 P^2 + \sigma_2^2 L^2} \right) \right] - \frac{Q}{2} \left[\frac{8\sigma_2}{\sigma_1} \ln \frac{\sigma_1^2 N + \sigma_2^2 Q^2}{\sigma_1^2 P + \sigma_2^2 Q^2} + \frac{V\sqrt{2\pi}}{\sigma_1^2} \times \right. \\ & \left. \times \left(\sqrt{\sigma_1^2 N^2 + \sigma_2^2 Q^2} - \sqrt{\sigma_1^2 P^2 + \sigma_2^2 Q^2} \right) \right] = 0; \end{aligned} \right\} \quad (6.39)$$

$$\begin{aligned} & \frac{N}{2} \left[\frac{8\sigma_1}{\sigma_2} \ln \frac{\sigma_1^2 N^2 + \sigma_2^2 L^2}{\sigma_1^2 N^2 + \sigma_2^2 Q^2} + \frac{V\sqrt{2\pi}}{\sigma_2^2} \left(\sqrt{\sigma_1^2 N^2 - \sigma_2^2 L^2} - \right. \right. \\ & \left. \left. - \sqrt{\sigma_1^2 N^2 - \sigma_2^2 Q^2} \right) \right] - \frac{P}{2} \left[\frac{8\sigma_1}{\sigma_2} \ln \frac{\sigma_1^2 P^2 + \sigma_2^2 L^2}{\sigma_1^2 P^2 + \sigma_2^2 Q^2} + \right. \\ & \left. + \frac{V\sqrt{2\pi}}{\sigma_2^2} \left(\sqrt{\sigma_1^2 P^2 + \sigma_2^2 L^2} - \sqrt{\sigma_1^2 P^2 + \sigma_2^2 Q^2} \right) \right] = 0, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \min w + l_1 + \Delta w &= N; \\ \min h + l_2 + \Delta h &= L; \\ \min w + \Delta w &= P; \\ \min h + \Delta h &= Q. \end{aligned} \quad (6.40)$$

Сказанное ранее справедливо тогда, когда в пределах партии полосковых волноводов имеется разброс геометрических размеров, которые строго постоянны в пределах одного волновода, т. е. для случая регулярных полосковых волноводов. Если имеется разброс и в пределах одного волновода, то возможны: колебания ширины полоскового проводника и толщины диэлектрика и сосредоточенные изменения размеров полоскового волновода. Оба вида погрешностей могут присутствовать одновременно, вызывая в полосковом волноводе отраженную волну.

Для малых неоднородностей, обусловленных разбросом, справедлив статистический подход.

Если предположить, что комплексные коэффициенты отражения по напряжению малы и аддитивны, то

$$\rho = \sum_{l=1}^N \rho_l e^{j2\varphi_l},$$

где ρ_l — коэффициент отражения от i -ой неоднородности; N — количество неоднородностей.

Далее предполагаем, что длины линий между неоднородностями не зависят друг от друга, а все углы Θ в пределах $0-2\pi$ являются равновероятными и общее число неоднородностей велико. При этих допущениях и замене плавного изменения размера ступенчатым со сколь угодно малой величиной ступенек известно, что общий коэффициент отражения имеет распределение Релея:

$$W(\rho) = \left(\frac{\rho}{\rho_m} \right)^2 e^{-\rho^2 / 2\rho_m^2},$$

где ρ_m — наиболее вероятное значение ρ .

Если ρ_0 — среднеквадратичное значение ρ' , то $\rho_m = \rho_0 \sqrt{N/2}$. Вероятность $P(\rho)$ того, что коэффициент отражения меньше ρ , определяется выражением

$$P(\rho) = \int_0^\rho W(\rho) d\rho = 1 - e^{-\rho^2 / 2\rho_m^2}. \quad (6.41)$$

Этот результат можно выразить через КСВН следующим образом:

$$P(S) = 1 - \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{S-1}{S+1} \right)^2 \left(\frac{S_m+1}{S_m-1} \right)^2 \right],$$

где S — коэффициент стоячей волны (КСВН).

Появление отраженной волны в полосковом волноводе эквивалентно работе регулярного полоскового волновода на несогласованную нагрузку. Эффект малых неоднородностей на волновое сопротивление линии учитывается через полное сопротивление Z регулярного полоскового волновода с волновым сопротивлением Z_0 при наличии отраженной волны и коэффициенте отражения ρ :

$$Z = Z_0 \frac{1 + \rho}{1 - \rho} = Z_0 S. \quad (6.42)$$

Первый сомножитель выражает влияние регулярного, а второй — нерегулярного изменения размеров полоскового волновода. При известных выражениях для плотности вероятностей сомножителей в выражении (6.42) можно найти, во-первых, вероятность того, что при заданных регулярных изменениях ширины полоскового проводника и толщины диэлектрика значения Z лежат в требуемых границах и, во-вторых, что при заданных

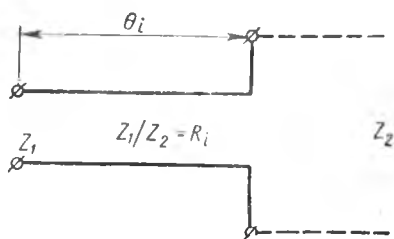


Рис. 6.8. Схема скачка волнового сопротивления линии передачи

нерегулярных изменениях этих размеров значения КСВН не превысят заданную величину. Тогда вероятность того, что Z лежит в заданных границах, будет равна произведению вероятностей для Z_0 и S . Таким образом, при заданном технологическом процессе, характеризующемся опреде-

ленными погрешностями, и конструкторских допусках, назначенных на размеры полоскового волновода, определяют вероятность того, что значение его полного сопротивления будет соответствовать заданным требованиям. По результатам расчетов можно судить о необходимости корректировки либо допусков на размеры, либо технологического процесса.

Оценить значения p_m можно, используя матрицу передачи участка полоскового волновода, содержащего скачок волнового сопротивления. Она представляет собой произведение нормированной волновой матрицы передачи отрезка однородной линии длиной θ_i на матрицу скачка волновых сопротивлений (рис. 6.8)

$$[T]_i = \begin{bmatrix} e^{j\theta_i} & 0 \\ 0 & e^{-j\theta_i} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{R_i + 1}{2\sqrt{R_i}} & \frac{R_i - 1}{2\sqrt{R_i}} \\ \frac{R_i - 1}{2\sqrt{R_i}} & \frac{R_i + 1}{2\sqrt{R_i}} \end{bmatrix}. \quad (6.43)$$

Выражения, характеризующие величину волнового сопротивления полоскового волновода в области резкого изменения его геометрических размеров, имеют вид:

$$\frac{\Delta Z_0}{Z_0} = (0,164 + N) \left(\frac{\Delta h}{h} - \frac{\Delta w}{w} \right),$$

где

$$N = \frac{0,836}{1 + 1,735 \epsilon^{-0,0784} \left(\frac{w}{h} \right)^{-0,826}}. \quad (6.44)$$

Из (6.43) и (6.44) можно определить коэффициент отражения от одной неоднородности, а зная количество неоднородностей N и их величину, нетрудно найти и ρ_m .

§ 6.3. ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ КРАЯ ПОЛОСКОВОГО ПРОВОДНИКА НА ВОЛНОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОЛОСКОВОГО ВОЛНОВОДА

Исследование влияния нарушений геометрии края проводника будет производиться для несимметричного полоскового волновода.

Распределение токов в полосковом проводнике имеет сложный характер. Большая часть общего тока протекает по краям проводника (рис. 6.9).

Из графика рис. 6.9 видно, что плотность тока на краях полоскового проводника более чем в три раза превышает среднюю плотность тока в проводнике. Значит, местная деформация края проводника приведет к значительному перераспределению плотности тока в нем, большему, чем для низкочастотных печатных схем. Интересен вывод аналитической зависимости плотности тока на

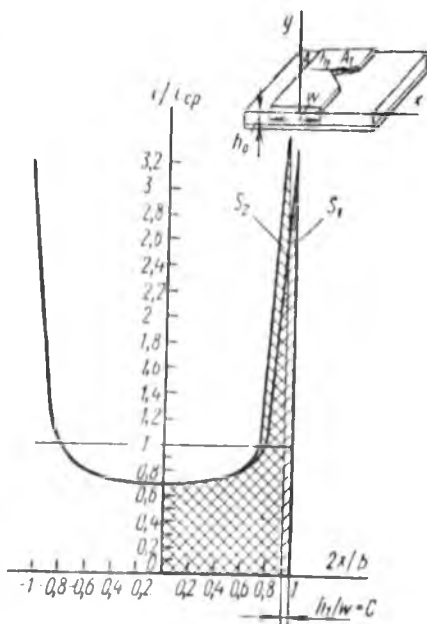


Рис. 6.9. Распределение плотности тока в поперечном сечении полоскового проводника

краю проводника в месте его максимальной деформации от глубины вырыва. За исходное принимается выражение для распределения тока в полосковом проводнике

$$i(\zeta) = \frac{I}{\pi \sqrt{1-\zeta^2}} [A\zeta^4 - B\zeta^2 + C_1], \quad (6.45)$$

для $0,33 \leq h/w \leq \infty$.

При выводе зависимости плотности тока на краю полоскового проводника от глубины вырыва использовались следующие допущения:

а) в деформированной части проводника изменение плотности тока по его ширине происходит по тому же закону, что и в недеформированной;

б) при деформации проводника плотность тока в его середине остается постоянной.

Для незначительных деформаций эти допущения справедливы. Решение находим из условий, что ток, протекающий в деформированной и недеформированной частях проводника, одинаков по величине, т. е. $S_1 = S_2$ (см. рис. 6.9):

$$S_1 = \int_0^1 \frac{1}{\pi \sqrt{1-\zeta^2}} (A\zeta^4 - B\zeta^2 + C_1) d\zeta; \quad (6.46)$$

$$S_2 = \int_0^{1-C} \frac{1}{\pi \sqrt{1-\zeta^2}} (A_1\zeta^4 - B_1\zeta^2 + C_2) d\zeta. \quad (6.47)$$

Для определения S используем подстановку

$$\zeta = \sin \alpha; \quad d\zeta = \cos \alpha d\alpha.$$

Производя интегрирование и учитывая значения постоянных, имеем при $A = 0,03$, $B = 0,308$, $C_1 = 1,143$

$$S_1 = \frac{3}{16} A - \frac{1}{4} B + \frac{1}{2} C_1 = 0,5. \quad (6.48)$$

Аналогично определяем, что

$$S_2 = \frac{1}{\pi} \left[\left(\frac{3}{8} A_1 - \frac{1}{2} B_1 + C_2 \right) \arcsin(1-C) + \right. \\ \left. + \frac{B_1 - A_1}{2} (1-C) \sqrt{2C - C^2} + \right]$$

$$+ \frac{A_1}{8} (1-C)(4C-1-2C^2) \sqrt{2C-C^2} \Big]. \quad (6.49)$$

Учитывая, что $S_1 = S_2$, найдем значения A_1 , B_1 и C_2 . Для этого примем $B_1 = 0$, а $C_2 = C_1 = 1,143$.

Тогда

$$\frac{1}{\pi} \left[\left(\frac{3}{8} A_1 + C_2 \right) \arcsin(1-C) - \frac{A_1}{2} (1-C) \sqrt{2C-C^2} + \right. \\ \left. + \frac{A_1}{8} (1-C)(4C-1-2C^2) \sqrt{2C-C^2} \right] = 0,5. \quad (6.50)$$

После некоторых преобразований этого выражения

$$A = \frac{8 [1,57 - C_2 \arcsin(1-C)]}{3 \arcsin(1-C) + (1-C) \sqrt{2C-C^2} (4C-5-2C^2)} \quad (6.51)$$

При этом функция, характеризующая распределение тока в полосковом проводнике, имеет вид:

$$i(\zeta) = \frac{1}{\pi \sqrt{1-\zeta^2}} (A_1 \zeta^4 + C_2). \quad (6.52)$$

В эту формулу входит $A_1 = f(C)$, т. е. она представляет собой зависимость распределения плотности тока в проводнике от глубины деформации и позволяет определить зависимость плотности тока на краю проводника от глубины деформаций. Расчет (6.51) дан в виде табл. 6.3.

Таблица 6.3

C	0,01	0,02	0,03	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3
A_1	-0,145	0,07	0,157	0,485	1,16	3	5,45	18,4

На основании (6.51) и (6.52) были произведены расчеты плотности тока на краю полоскового проводника в зависимости от глубины его деформаций, результаты которых даны на рис. 6.10.

Для экспериментальной проверки степени влияния вырывов на перераспределение тока в полосковом проводнике можно использовать его моделирование с по-

мощью электролитической ванны, что обеспечивает точную аналогию электрического поля в любом поперечном сечении проводника и применяется для получения численных результатов, точность которых зависит только от точности проведения эксперимента.

На одном из электродов ванны создается распределение плотности тока, соответствующее распределению тока в полосковом проводнике. Затем длина этого электрода ступенями уменьшается и одновременно деформируется слой электролита введенным в него диэлектриче-

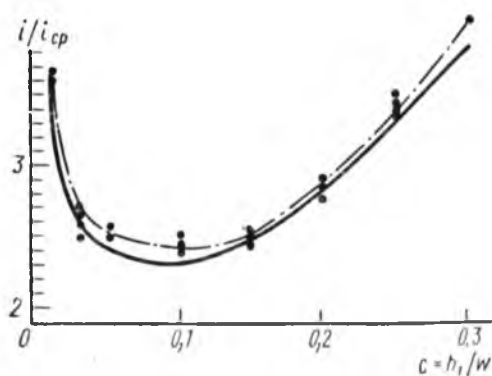


Рис. 6.10. Зависимость плотности тока на краю полоскового проводника:

— — — теоретическая кривая;
 — • — экспериментальная кривая

ских клиньев, располагаемых возле деформируемого электрода (рис. 6.11). В процессе эксперимента изменяется распределение плотности тока на деформируемом электроде и общий ток, текущий через электролит. Данная модель выбирается следующим образом.

При рассмотрении модели деформированного полоскового проводника наибольший интерес представляет картина токов в плоскости поперечного сечения AA_1 , т. е. плоскости максимальной деформации.

Токонесущую поверхность можно смоделировать в виде некоторого проводящего слоя равномерной толщины и ширины с заданным распределением плотности тока в нем. Таким проводящим слоем в данном случае является электролит. Распределение плотности тока в любой плоскости его поперечного сечения, перпендику-

лярной к слою, остается постоянной, в том числе и на электроде, который будет условно именоваться анодом. Деформация проводящего слоя ведет к перераспределению токов в области деформации, аналогичному перераспределению в плоском проводнике, тогда, когда факторы, вызывающие первоначальное распределение токов в электролите, характерное для полоскового проводника, остаются неизменными. Это справедливо для незначительных деформаций полоскового проводника.

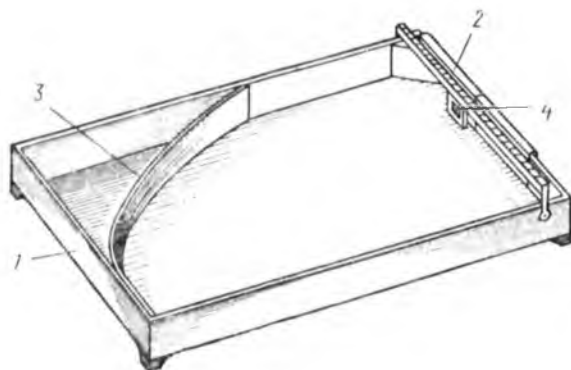


Рис. 6.11. Ванна для моделирования распределения плотности тока в поперечном сечении деформированного полоскового проводника

Деформацию проводящего слоя можно осуществить на любом его участке и с таким расчетом, чтобы плоскость AA_1 совпала с анодом. При этом конструкция анода должна предусматривать возможность изменения его длины, а диэлектрические клинья, деформирующие электролит, надо помещать так, чтобы вершина их касалась края анода.

Электролитическая ванна для снятия рассматриваемых характеристик (рис. 6.11) состоит из прямоугольного корпуса 1, плоского анода 2, катода 3, конфигурация которого рассчитывалась таким образом, чтобы получить заданное распределение тока по поверхности анода и прибора 4, измеряющего плотность тока. Форма катода рассчитывается следующим образом. Известно, что при постоянной разности потенциалов между двумя плоскими пластинами, помещенными в электролит, плотность

тока будет зависеть от расстояния между ними:

$$\frac{E_k - E_a}{\rho l} = J, \quad (6.53)$$

Следовательно, изменение l (расстояния между электродами) позволит получить изменение плотности тока на аноде. При этом для облегчения замеров желательно, чтобы анод был плоским, а сложную форму имел катод. За исходное принимается распределение плотности тока (см. [6.45]). Поскольку такое распределение тока необходимо получить на аноде, уравнение (6.53) можно переписать для новой координатной системы так:

$$i(h_1) = \frac{1}{\pi \sqrt{1 - h_1^2}} (Ah_1^4 - Bh_1^2 + C_1). \quad (6.54)$$

Отсюда, обозначив $E_k - E_a = U_{ак} = \text{const}$, получим

$$\frac{U_{ак}}{\rho} = \frac{l}{\pi \sqrt{1 - h_1^2}} (Ah_1^4 - Bh_1^2 + C_1).$$

Разность потенциалов между катодом сложной формы и плоским анодом поддерживается постоянной.

Для того чтобы изменялась длина анода, его делают раздвижным состоящим из двух половин — неподвижной и подвижной — электрический контакт которых осуществляется с помощью проводника. Распределение плотности тока на поверхности анода измеряется специальным устройством (рис. 6.12), состоящим из амперметра I ; трубки 2, изолирующей проводники от электро-

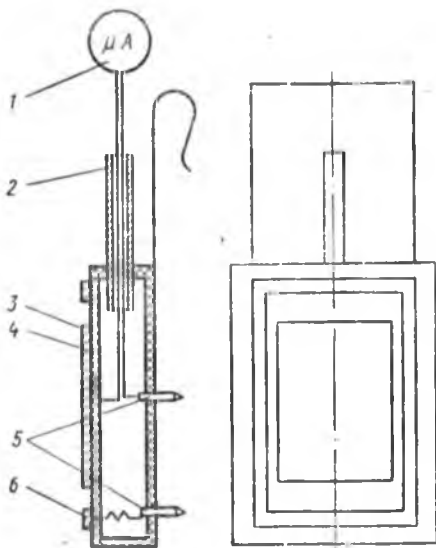


Рис. 6.12. Прибор для измерения плотности тока на аноде ванны

лита; медной пластины 3; корпуса прибора 4; двух контактных штырей 5 и экранирующего кольца 6. Контактный штырь замыкает электрическую цепь от пластины 3 через амперметр на исследуемую точку поверхности анода. Экранирующее кольцо введено для уменьшения искажения поля, вызванного толщиной прибора. На рис. 6.13, а, б и в приведены экспериментальные кривые, характеризующие распределение тока для половины полоскового проводника при различной глубине деформации его края и разных углах при вершине вырыва.

Анализ этих кривых показывает, что токораспределение не зависит от угла при вершине вырыва, а определяется его глубиной.

Как видно из кривых, принятое ранее предположение о стабильности тока в центре полоскового проводника ($x = C$) оказывается справедливым во всем диапазоне рассматриваемых деформаций края проводника.

На основании экспериментальных данных была построена кривая распределения плотности тока на краю полоскового проводника в зависимости от глубины деформации (см. рис. 6.10). На том же рисунке построена аналогичная теоретическая зависимость, полученная из (6.52). Анализ теоретических и экспериментальных кривых показывает, что при деформации полоскового проводника происходит значительное перераспределение токов в его поперечном сечении. Максимальная плотность тока имеет место на краю полоскового проводника при любой глубине деформации. Для значений $C = 0,01$ увеличивается плотность тока на краю полоскового проводника, в пределах 10—12% от плотности тока на краю недеформированного проводника. При дальнейшем росте C плотность тока на краю полоскового проводника в месте его максимальной деформации уменьшается. Это наблюдается вплоть до $C = 0,1$. При $C \approx 0,1$ плотность тока на краю деформируемого полоскового проводника возрастает и для $C = 0,24$ сравнивается, а для $C = 0,3$ на 25% превышает плотность тока на краю недеформированного полоскового проводника.

Пропускная способность полоскового волновода ограничена условиями пробоя и нагрева диэлектрика.

При работе с незатухающими колебаниями ограничивающим фактором является нагрев диэлектрика, степень которого зависит от плотности среднего тока, текущего через проводник.

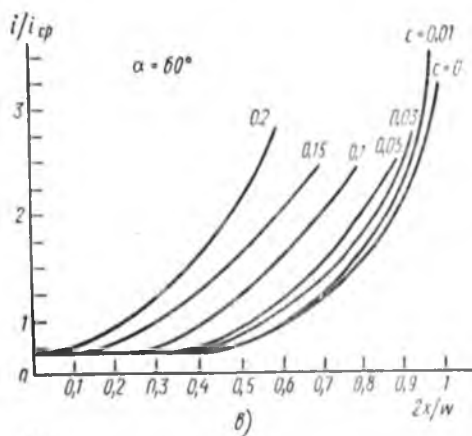
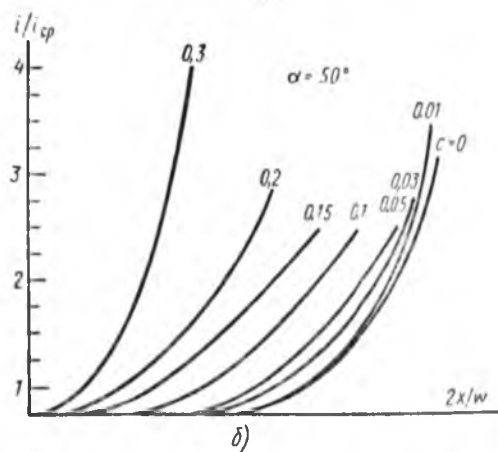
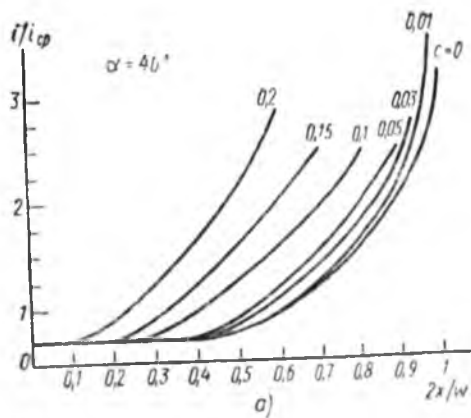


Рис. 6.13. Распределение плотности тока в поперечном сечении полоскового проводника в зависимости от глубины дефекта края и угла при его вершине

Рост плотности тока в деформируемом полосковом проводнике понижает допустимую плотность среднего тока. Кроме ее понижения перераспределение плотности тока по сечению проводника в результате деформации его края изменяет значения волнового сопротивления полоскового волновода в месте деформации (Z_1).

По значениям A_1 формулы (6.51) можно записать функции распределения тока в поперечном сечении деформируемого полоскового проводника для каждого из исследованных значений C_1 , а по ним найти значения Z_1 в соответствии с выражением

$$Z_1 = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{1}{j} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon}} \int_{-1}^{+1} i(\zeta) \ln \frac{\sqrt{\zeta^2 - \delta}}{\zeta} d\zeta. \quad (6.55)$$

$$\delta = \frac{4h}{w}.$$

Результаты расчетов даны на рис. 6.14. Как видно из графика, значения Z_1/Z зависят от величины C .

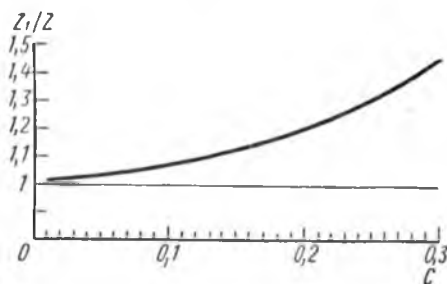


Рис. 6.14. Зависимость волнового сопротивления несимметричного полоскового волновода от глубины дефекта границы полоскового проводника

Таким образом, местные дефекты края полоскового проводника ведут к перераспределению токов в нем; это изменяет волновое сопротивление волновода в области дефекта и уменьшает допустимую плотность среднего тока, текущего в полосковом проводнике.

Если требования к полосковому волноводу такие, что перечисленные искажения недопустимы, то технологический процесс должен быть построен так, чтобы обеспечить регулярность границы проводника.

Экспериментально доказано (§ 5.1), что дефекты гра-

ницы полоскового проводника определяются толщиной и плотностью металлического осадка, подвергаемого травлению, и микрогеометрией диэлектрической поверхности, на которую нанесен металл.

Контроль толщины медных осадков показал, что в результате неоднородности плотности тока на поверхности платы при ее гальваническом меднении появляется разброс по толщине покрытия.

Так как время травления плат выбирается применительно к вытравливанию самой толстой части покрытия, то неизбежно краевое подтравливание в областях с минимальной толщиной. Это подтверждает измерение глубины краевых дефектов: если в областях с максимальной толщиной они отсутствуют, то с уменьшением толщины покрытия глубина их растет и становится максимальной в областях минимальной толщины.

Исследования дефектов границы полоскового проводника показали, что с уменьшением величины зерна медного осадка средняя глубина дефекта также уменьшается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гаврилов А. И. Технология авиационного приборостроения. Оборонгиз. М., 1962.
2. Голант М. Б. [и др.]. Изготовление резонаторов и замедляющих систем электронных приборов. Изд-во «Сов. радио», М., 1969.
3. Гусев В. П. Технология радиоаппаратостроения. Изд-во «Высшая школа», М., 1972.
4. Дрепберг А. Л. [и др.]. Технология неметаллических покрытий. Госхимиздат. М., 1967.
5. Иванов-Есипович П. К. Физикохимические основы производства радиоэлектронной аппаратуры. Изд-во «Высшая школа». М., 1965.
6. Клейман Е. А. Статистические методы регулирования и контроля качества. Изд-во Комитета стандартов, мер, измерит. приборов при Совете Министров СССР. М., 1966.
7. Ковалев И. С. Теория и расчет полосковых волноводов. Изд-во «Наука и техника», Минск, 1967.
8. Лукомский Л. И. Теория корреляции и ее применение к анализу производства. Госэнергониздат. М., 1958.
9. Малинский В. Д. [и др.]. Испытания радиоаппаратуры. Изд-во «Энергия», М., 1965.
10. Малов А. И. Технология холодной штамповки. Оборонгиз, М., 1963.
11. Малорацкий Л. Г., Явич Л. Р. Проектирование и расчет СВЧ элементов на полосковых линиях. Изд-во «Сов. радио», М., 1972.
12. Руденко В. М. [и др.]. Малошумящие входные цепи СВЧ приемных устройств. Изд-во «Связь», М., 1971.
13. Слуцкая В. В. Тонкие пленки в технике сверхвысоких частот. Госэнергониздат, М., 1962.
14. Фролов А. Д. Соединения в конструкциях радиотехнических изделий. Изд-во «Энергия», М., 1966.
15. Шрайбер П. Я. [и др.]. Печатные схемы в радиотехнике. Изд-во «Энергия», М., 1967.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Глава 1. Изготовление волноводных труб прямоугольного и круглого поперечных сечений	5
§ 1.1. Изготовление изогнутых волноводных труб прямоугольного сечения	5
§ 1.2. Изготовление скрученных волноводных труб	30
§ 1.3. Изготовление волноводных труб переменного сечения	36
§ 1.4. Изготовление гофрированных волноводных труб	42
§ 1.5. Изготовление и установка фланцев	58
§ 1.6. Изготовление прямолинейных и изогнутых волноводных труб круглого поперечного сечения	77
Глава 2. Технология изготовления и отделки корпусов волноводных устройств	88
§ 2.1. Изготовление корпусов пайкой и сваркой	88
§ 2.2. Изготовление корпусов точным литьем	103
§ 2.3. Изготовление корпусов холодным выдавливанием	109
§ 2.4. Изготовление корпусов наращиванием металла	117
§ 2.5. Комбинированный метод изготовления корпусов сложных волноводных устройств	132
§ 2.6. Выбор метода изготовления корпусов	138
§ 2.7. Внутренняя отделка корпусов	144
Глава 3. Изготовление волноводных устройств СВЧ	171
§ 3.1. Изготовление согласованных нагрузок и фиксированных поглощающих аттенуаторов	171
§ 3.2. Изготовление волноводных направленных ответвителей	183
§ 3.3. Изготовление волноводных фильтров	189
§ 3.4. Изготовление поляризационных ослабителей	200
§ 3.5. Изготовление волноводных ферритовых устройств СВЧ	205
Глава 4. Контроль и испытания волноводных устройств	209
§ 4.1. Контроль геометрических и электрических параметров	209
§ 4.2. Испытание волноводных устройств	222
Глава 5. Полосковые волноводы	230
§ 5.1. Изготовление полосковых волноводов	230
§ 5.2. Сборка полосковых устройств	243
§ 5.3. Конструкторско-технологические особенности микроминиатюрных полосковых волноводов	246
§ 5.4. Изготовление полосковых микроминиатюрных волноводов	251
§ 5.5. Изготовление гибридных интегральных схем СВЧ	260
Глава 6. Влияние технологических погрешностей на электрические характеристики полосковых волноводов	267
§ 6.1. Влияние технологических погрешностей на величину потерь в полосковом волноводе	267
§ 6.2. Статистические параметры волнового сопротивления полосковых волноводов в зависимости от технологических погрешностей	280
§ 6.3. Влияние дефектов края полоскового проводника на волновое сопротивление полоскового волновода	293
Литература	303