



**БИБЛИОТЕЧКА**

---

**ВЫСОКОЧАСТОТНИКА-  
ТЕРМИСТА**

**И. Г. ФЕДОРОВА  
Ф. В. БЕЗМЕНОВ**

# **ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ СВАРКА ПЛАСТМАСС**

**WELDWORLD.RU**

Н 41667  
ББК 35.710  
Ф33  
УДК 678.029.437

Федорова И. Г., Безменов Ф. В.

Ф33 Высокочастотная сварка пластмасс/Под ред. А. Н. Шамова.— 2-е изд., перераб. и доп.— Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990.— 80 с.: ил.— (Б-чка высокочастотника-термиста; Вып. 8)

ISBN 5-217-00939-X

В книге рассмотрены теоретические основы высокочастотной сварки пластмасс, а также технологические особенности процесса сварки, тиснения, создания аппликаций и пр. Приведены расчеты и конструкции электродов, технологических устройств, источников питания. Даны рекомендации по выбору необходимого оборудования в зависимости от технологического процесса, приведены критерии технологического совершенства сварочных устройств.

Во втором издании (1-е изд. 1980 г.) рассмотрены вопросы техники безопасности на высокочастотных сварочных установках.

Книга рассчитана на технологов, конструкторов, занимающихся проектированием и эксплуатацией высокочастотных сварочных установок.

Ф 2704070000—253  
038(01)—90 253—90

ББК 35.710

Федорова Ирина Григорьевна, Безменов Феликс Васильевич

ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ СВАРКА ПЛАСТМАСС

Редактор Е. М. Миронченкова  
Обложка художника А. Г. Углича  
Художественный редактор С. С. Венедиктов  
Технический редактор П. В. Шиканова  
Корректор А. И. Лавриненко

ИБ № 5589

Сдано в набор 14.08.89. Подписано в печать 19.02.90. М-31044. Формат 60×88/16. Бумага офсетная № 2. Гарнитура литерат. Печать офсетная. Усл. печ. л. 5,0. Усл. кр.-отт. 5,25. Уч.-изд. л. 5,16. Тираж 9400 экз. Заказ 620. Цена 25 коп.

Ленинградское отделение ордена Трудового Красного Знамени издательства «Машиностроение», 191065, Ленинград, ул. Дзержинского, 10

Набрано в Ленинградской типографии № 2 головном предприятии ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Государственного комитета СССР по печати. 198052, г. Ленинград, Л-52, Измайловский пр., 29.

Отпечатано в Ленинградской типографии № 4 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Государственного комитета СССР по печати. 191126, г. Ленинград, Социалистическая ул., 14.

ISBN 5-217-00939-X

© Издательство «Машиностроение», 1980

© И. Г. Федорова, Ф. В. Безменов, 1990

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Сварка является наиболее распространенным способом соединения отдельных деталей при изготовлении изделий из пластмасс. При сварке почти полностью исчезает граница раздела между деталями. Прочность материала в месте сварного шва так же, как электрофизические свойства, близка аналогичным свойствам свариваемого материала.

Широкое распространение высокочастотной (ВЧ) сварки пластмасс обуславливает необходимость постоянного совершенствования технологических процессов, технологической оснастки и оборудования. С усложнением конструкции изделий усложняется и конструкция сварочного оборудования. Оптимальная конструкция технологических устройств, в том числе оснастки, является решающим фактором повышения производительности труда и обеспечения работы оборудования в автоматическом режиме.

Дальнейшее развитие техники ВЧ-сварки пластмасс должно быть направлено на создание автоматизированных гибких сварочных систем в модульном исполнении. Именно в этом направлении ведутся в настоящее время широкие исследования и разработки.

Большой вклад в развитие данного направления высокочастотной электротермии в Советском Союзе в части разработки основ технологии ВЧ-сварки, создания оборудования и технологической оснастки, внедрения разработок в различные отрасли промышленности внесли сотрудники ВНИИТВЧ им. В. П. Вологодина Брицын Н. Л., Шелина Т. А., Заманский И. Б., Фрумкин Ф. Ф., Фирсова М. Г., Щербакова Ю. И. и др.

# 1. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СВАРКИ ПЛАСТМАСС

## 1. Высокочастотная сварка в Советском Союзе

За последнее десятилетие в мировой промышленности произошли существенные изменения в структуре потребления металла. Так, например, производится замена труб из стали и чугуна неметаллическими трубами, среди которых особое место занимают пластмассовые трубы. За последние годы отечественная промышленность поставила народному хозяйству более 350 тыс. т пластмассовых труб, из которых было построено более 500 тыс. трубопроводов различного назначения. В результате только на строительстве было сэкономлено свыше 2 млн т стальных и чугунных труб. В 11-й пятилетке за счет увеличения объема производства и применения пластмассовых труб металлоемкость трубопроводных систем сократилась на 5 млн т [13].

Темпы потребления пластических масс промышленностью непрерывно возрастают. За последние пятнадцать лет потребление пластмасс увеличилось в 18 раз, натуральных материалов — в два-три раза. В Англии, например, применение пластмасс вместо металла за последние семь лет возросло на 25 % и достигло 2,5 млн т в год, превывсив использование стали. Предполагают, что применение пластмасс в промышленности будет возрастать на 6 % в год и половина из них будет употребляться вместо металла.

Производство пластических масс в ведущих капиталистических странах с 1970 по 1980 гг. значительно увеличилось: в США с 8500 до 23 000 тыс. т, ФРГ с 4330 до 10 600 тыс. т, Японии с 5187 до 12 000 тыс. т [12].

Особое место среди пластических масс занимают термопластичные пластмассы. Изготовление изделий из термопластичных пластмасс производится в основном сваркой. Сварка является таким способом соединения, при котором почти полностью исчезает граница раздела между деталями, а прочность материала в месте сварки так же, как и все физические свойства, близка аналогичным свойствам свариваемого материала.

Среди пластмасс крупнотоннажного производства, подвергаемых сварке, наблюдается рост потребления поливинилхлоридов (ПВХ), полиолефинов, полистирола и их сополимеров, полиакрилатов. Структура выпускаемых в СССР пластмасс, идущих на изготовление сварных конструкций, следующая: пленки — 45—54, трубы — 11—12, листовой материал — около 12 %. Особое место среди пластмасс занимают пленки. Наиболее широко выпускаются

пленки из полиолефинов, ПВХ, гидратцеллюлозные пленки, фторсодержащие и др.

Основными потребителями многотоннажных пленочных материалов в СССР являются химическая и легкая промышленности, автомобилестроение, сельское хозяйство, строительство, пищевые отрасли, медицина и др.

Наряду с пленочными материалами широко выпускаются искусственные кожи, являющиеся в настоящее время одной из основных сырьевых баз для обувной, кожгалантерейной, автомобильной и других отраслей промышленности. В настоящее время около 90 % кожгалантерейных изделий выпускается из искусственных материалов. В производстве обуви, например, доля искусственных полимерных материалов по деталям низа обуви составляет более 70, а внутренним деталям — 50 %. В автомобилестроении сегодня используется более 45 видов пластмасс. Предполагается значительный рост потребления пластических масс в строительстве, сельском хозяйстве и легкой промышленности.

Высокочастотный метод сварки (ВЧ) как технологически, так и экономически признан специалистами всех стран наиболее целесообразным в большинстве случаев для сварки пластмасс, коэффициент диэлектрических потерь которых составляет не менее сотых долей единицы.

ВЧ-установки малой и средней мощности до 10 кВт по-прежнему применяются для традиционной сварки таких изделий, как обложки записных книжек, папки, сумки, портфели, надувные игрушки, плащи из пленки ПВХ, футляры и т. д. На этих же установках можно делать тиснение рисунка, аппликации. С увеличением размеров свариваемых изделий, как следствие, появилась необходимость повышения колебательной мощности ВЧ-установок.

Автомобильная промышленность является едва ли не самым крупным потребителем ВЧ-установок. Для ВЧ-сварки всего ассортимента изделий в автомобильной промышленности требуются установки мощностью от 1 до 100 кВт. Этим методом изготавливаются следующие детали автомобилей: обивка сидений, спинок и подлокотников; комплектных панелей, филенок; обивка потолка кабины; защитная обивка приборной зоны; защитная обивка стоек; противосолнечные козырьки. В связи с требованиями высокой производительности труда применяется автоматизация процессов и приспособлений.

Широко применяется ВЧС при изготовлении различной упаковки в полимерные пленки. Текстильная промышленность также заинтересовалась этим методом сварки. Это связано с тем, что в текстильной промышленности появились материалы, содержащие синтетические волокна. Во многих операциях при производстве изделий используется ВЧС, например, создание изделий с водонепроницаемыми и герметичными швами, выполнение петель для пуговиц, изготовление карманов, манжет, ярлыков и т. д.



Сейчас определились следующие области применения токов высокой частоты в обувной промышленности: отделка верха обуви (тиснение, аппликации); соединение деталей обувной заготовки с одновременным тиснением; сочетание тиснения и соединения с вырубкой; тиснение деталей верха обуви в силиконовых матрицах. Не последнее место ВЧС стала занимать в аккумуляторной промышленности для герметизации полиамидных сосудов аккумуляторов, вварки штуцеров. Широко применяется ВЧС в медицинской промышленности, причем эта область применения будет в ближайшие годы расширяться. Методом ВЧС изготавливается аппаратура для взятия, переливания и хранения крови, капельницы для введения глюкозы и солевых растворов, водяные охлаждающие рубашки для понижения температуры. Большое значение ВЧС приобрела при изготовлении защитной одежды в специальных производствах.

Все это в свою очередь привело к разработке нового оборудования и технологической оснастки.

## 2. Высокочастотное оборудование и перспективы его развития

В большом ассортименте оборудование для ВЧС мощностью от 0,1 до 100 кВт с соответствующими технологическими устройствами выпускается сегодня такими известными фирмами как «Пауль Кифель» (*Paul Kufel*), «Антон Хюбер» (*Anton Huber*), ФИАБ (*FIAB*), «Колпитт» (*Colpitt*), «Редайн» (*Radyne*), «Анвер Бруссо» (*Anwer Brusso*) [29]. Из социалистических стран такое оборудование выпускают ЧССР и НРБ.

В табл. 1 представлен ряд установок различного типа ВЧС-оборудования, соответствующий ОСТ 16.0801.061—83 «Установки высокочастотные для электротермии. Типы, основные параметры, типаж».

Установки, приведенные в табл. 1, имеющие ТУ, выпускаются серийно. Установка ВЧД16-60/27 является совместной разработкой СССР и ЧССР. Отличительной особенностью современных установок является автоматизация и механизация всего процесса изготовления изделий. Все установки снабжены загрузочными устройствами в виде выдвижных или вращающихся столов или конвейеров. Для изделий, изготовление которых требует выполнения за один цикл нескольких технологических операций, установки выполняются в виде отдельных модулей. Новые модели установок модульной конструкции фирмы «Колпитт» и ФИАБ оборудованы приспособлениями для автоматического захвата и размещения картонных прокладок и удаления обрезанных остатков материала. В последний период на ВЧС-установках стали применяться сложные контрольные системы. На крупных установках фирмы «Колпитт» используется, например, контрольная система с микропроцессорами, заменяющая более 500 реле. Системы имеют

Таблица 1. Рекомендуемые соотношения основных параметров высокочастотных сварочных установок

Номинальная колебательная мощность, кВт	Усилие пресса при сварке, Н	Тип установки	Размеры рабочих столов, мм
0,1	200	ВЧГ1-0,1/27	(Генератор)
0,6	500		
	750		
1,6	3 150		
	750		
2,5	5 000	ВЧД10-4/27 (ТУ16—682.007—83)	500×600
4,0	10 000		
	16 000	ВЧД6-4/27 (ТУ16-682.007—83)	500×600
	20 000/200 000	ВЧД11-4/27	420×420
6	10 000		
	10 000	ВЧД11-10/27 (ТЗООА-285, 252—81)	500×800
10,0	16 000	ВЧД12-10/27	500×800
	50 000		
25	100 000	ВЧД6-10/27	1 200×1 600
	100 000	ВЧД-25/27	1 200×1 600
60	630 000	ВЧД16-60/27 (ТЗАИКР 680.052.025—81)	1 200×2 300

встроенные сигнальные устройства типа сирены для быстрого обнаружения неполадок в работе.

Фирма «Редайн» выпускает автоматические установки «Аутодекс» (*Autodex*) и «Супердекс» (*Superdex*), на которых можно выполнять семь операций.

Проведенный анализ зарубежных публикаций показал, что основной тенденцией развития техники и технологии высокочастотной сварки пластмасс является создание оборудования, обеспечивающего комплексную механизацию и автоматизацию процесса сварки, а также специальных высокочастотных установок, встраиваемых в автоматические поточные линии, при большом объеме и широкой номенклатуре оборудования общего назначения [15].

## 3. Экономическая оценка метода

Использование ВЧ-метода сварки дает значительный народнохозяйственный эффект, исчисляемый десятками и сотнями тысяч рублей при внедрении одной установки в зависимости от типа изделий и характера производства. Кроме того, промышленное применение ВЧС в целом ряде случаев оказывает революционизирующее воздействие на давно освоенные и хорошо изученные технологические процессы. Сокращение времени процесса, уменьшение количества технологических стадий производства, улучшение

ние качества продукции, автоматизация длительных и сложных операций, резкое улучшение условий труда — таковы основные результаты внедрения токов высокой частоты в промышленное производство при сварке пластмасс. Кроме того, токи высокой частоты позволяют осуществить такие производственные процессы, которые или совсем невозможны при воздействии других видов энергии, или крайне сложны, длительны и имеют низкие показатели сварных соединений. Примером может служить изготовление верха обуви из искусственных кож при тиснении в силиконовых матрицах, контейнеров и трансфузионных систем (капельниц) для взятия, переливания и хранения крови, крупногабаритных изделий из винипласта (напольных нагревательных панелей) и др.

## II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СВАРКИ ПЛАСТМАСС

### 4. Некоторые вопросы физического состояния полимеров

В зависимости от поведения при нагревании полимеры и пластические массы на их основе делятся на две группы: термопластичные (термопласты) и термореактивные (реактопласты). Свойства пластмасс определяются главным образом их основой — полимером. Термопласты — пластмассы, способные при нагреве размягчаться, а затем при остывании возвращаться в исходное состояние.

Большинство термопластов, интересующих нас с точки зрения возможности сварки их при нагреве в электрическом поле высокой частоты (коэффициент потерь —  $\epsilon \times \operatorname{tg} \delta = 10^{-2}$ ), относятся в основном к аморфным полимерам.

Способность полимеров к кристаллизации зависит от их химического строения, однако они никогда не бывают закристаллизованными полностью и содержат обычно как кристаллическую, так и аморфную фазу.

Любой аморфный полимер в зависимости от температуры может находиться в трех состояниях (физические состояния полимера): стеклообразном, характеризующимся большими значениями модуля упругости и небольшими упругими деформациями (участок I, рис. 1); высокоэластичном, для которого характерны большие обратимые деформации и малые значения модуля упругости (участок II, рис. 1); вязкотекучем, когда наступает течение полимера (участок III, рис. 1), резко увеличивается деформация, которая становится необратимой.

Переход полимера из одного физического состояния в другое совершается в некотором диапазоне температур (рис. 1). Средние температуры областей перехода называются температурами перехода, так  $T_c$  — температура стеклования (температура перехода полимера из стеклообразного состояния в высокоэластичное и обратно),  $T_g$  — температура текучести (температура перехода из высокоэластичного в вязкотекучее и обратно). При температуре выше  $T_g$  наступает течение вплоть до температуры разложения —  $T_p$  — (деструкции полимера).

Переработка термопластов в изделия, в том числе и методом ВЧС, осуществляется в вязкотекучем состоянии. Интервал между температурами текучести и разложения — интервал его переработки и, в частности, сварки.

Среди термопластичных полимеров, коэффициент диэлектрических потерь которых равен или больше  $10^{-2}$ , наиболее широкое применение получили хлорсодержащие полимеры на основе ПВХ, представляющего собой полимер линейного строения  $(-\text{CH}_2-\text{CHCl}-)_n$ . Основное количество ПВХ, выпускаемого промышленностью, используется для производства пластика и винипласта. Кроме ПВХ в эти материалы входят стабилизаторы, модификаторы, наполнители (термопластичные смеси пластифицированного ПВХ), а также относительно большой процент пластифицирующих агентов. Винипласт выпускается в виде листов, стержней, труб, пластикат — в виде рулонного материала: пленок толщиной до 1 мм, лент, листов, трубок. Второй группой полимеров, также нашедшей широкое применение, являются полиамиды, относящиеся к гетероцепным полимерам, содержащим в основной цепи макромолекулы — амидные группы  $(-\text{CO}-\text{NH}-)$ . Полиамиды могут быть алифатическими и ароматическими в зависимости от того с какими радикалами связаны амидные группы.

Отечественная промышленность выпускает главным образом алифатические полиамиды, применяемые для изготовления деталей машин, пленок, волокон.

Свойства основных марок полимерных материалов приведены в таблице Приложения.

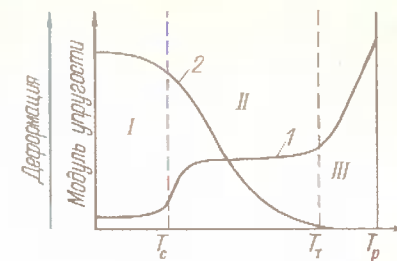


Рис. 1. Термомеханическая кривая для аморфного полимера (1), изменение модуля упругости в зависимости от температуры (2):

I — стеклообразное состояние полимера; II — высокоэластичное состояние; III — вязкотекучее



## 5. Механизм процесса сварки. Реологические свойства расплавов термопластов и их влияние на свариваемость

При сварке термопластов, так же как и при сварке металлов, в сварочной зоне протекают следующие процессы: подвод и преобразование энергии, обеспечивающей активизацию свариваемых поверхностей; взаимодействие активизированных свариваемых поверхностей при контакте их друг с другом; формирование структуры материала в зоне контакта. Активизация, независимо от способа ее осуществления, состоит в нагреве свариваемых поверхностей и проявляется в повышении энергии теплового движения макромолекул. Следующая стадия процесса сварки — взаимодействие свариваемых поверхностей при контакте друг с другом. Эта стадия осуществляется под воздействием внешнего давления и определяет в большей степени свойства образовавшегося сварного соединения, так как только при наличии в зоне контакта взаимодействия между макромолекулами полимера можно получить соединение, близкое по свойствам исходному полимеру.

Значительный интерес представляет точка зрения на процессы, протекающие при контакте расплавленных свариваемых поверхностей. В первую очередь при контакте расплавленных поверхностей напряжение, создаваемое усилием прижима, вызывает перемещение слоев расплава, что приводит к удалению из зоны сварки воздушных и других включений. Проявляется это в виде вытека расплава. Бесспорно это должно благоприятствовать качественной сварке. Скорость сдвига в зоне сварки отдельных слоев может быть неодинаковой (неравномерность нагрева, давления и пр.), что может привести к перемешиванию расплава. Особый интерес это явление представляет при ВЧС и требует серьезного экспериментального подтверждения и проверки.

На основании приведенных положений высказано предположение о том, что образование сварных соединений при контактировании расплавленных соединяемых поверхностей обусловлено в значительной степени течением и перемешиванием (в отдельных случаях) микрообъемов расплава на этапе образования физического контакта. Диффузионные процессы (если они имеют место) являются сопутствующими.

Последняя стадия образования сварных соединений — формирование надмолекулярной структуры в зоне контакта — в значительной степени определяет физико-механические и другие свойства материала. Необходимо обеспечить в шве надмолекулярную структуру целого исходного материала. Существенное влияние на характер надмолекулярных структур оказывают условия охлаждения расплава. Особенно этому необходимо уделять внимание, если в процессе нагрева в области сварного шва полностью нарушалась исходная надмолекулярная структура материала, что безусловно имеет место при высокочастотном нагреве. Эксперимен-

тальных данных, определяющих границы скоростей охлаждения при ВЧС, в настоящее время нет. Режимы охлаждения при сварке выбираются по определению прочности сварного шва безотносительно к толщинам и типам исходных материалов [10].

Сварка термопластов плавлением основана на переводе свариваемых поверхностей соединяемых материалов в состояние вязкого расплава без сопровождения этого явления разложением (термодеструкцией) материала. Следовательно, температурный интервал вязкотекучего состояния полимера должен быть достаточно широким, так как в противном случае незначительные неизбежные отклонения от оптимальных режимов сварки в производственных условиях приведут к дефектам сварки. При этом расплав в зоне сварки должен иметь такую вязкость, чтобы при напряжениях сдвига, имеющих место в реальных условиях сварки, достигалось его перемещение. Все эти положения связаны с реологическими свойствами исходных полимеров.

Вторым характерным показателем способности полимера к сварке является вязкость расплава, или, как принято оценивать в технической практике, показатель текучести расплава.

Вязкость расплава определяется совокупностью затрат на перемещение сегментов макромолекулы и потому зависит от их числа, т. е. от молекулярной массы (прямопропорциональна). Не только длина макромолекул, но и количество их зацеплений сказываются на величине вязкости расплава, которая растет с их увеличением.

Одним из важнейших показателей легкости сварки термопластичных полимеров является температурный интервал вязкотекучего состояния, т. е. интервал между температурой разложения полимера  $T_p$  и температурой его текучести  $T_t$  (табл. 2). Так, например, интересующий нас ПВХ имеет температуру текучести 185—200 °С, а начинает разлагаться в среде азота уже при температуре 193 °С [10].

Таким образом, принимая в качестве основного критерия свариваемости термопластов их реологические свойства, можно разделить их на три группы.

Таблица 2. Температура текучести и разложения некоторых термопластичных полимеров [14, 16]

Материал	Температура текучести, °С	Температура начала разложения, °С	
		в воздухе	в азоте
Поли-ε-капроамид	225	300	—
Полиамид 548	150—160	300	—
Полипропилен	175—180	250	—
Поливинилхлорид	180—200	140	240
Поливинилиденхлорид	185—200	—	193
Полистирол	150	220	—
Полиметилметакрилат (органическое стекло СТ-1)	175	170—180	—

К первой группе относятся неориентированные термопласты. Наиболее типичные представители этой группы термопластов — полиолефины, которые нас интересовать не будут (с точки зрения возможности ВЧС).

Интересующие нас термопласты могут быть отнесены ко второй группе. Это ориентированные термопласты с упомянутыми выше реологическими свойствами, неориентированные и ориентированные термопласты с высокой энергией активации вязкого течения, термопласты с узким интервалом между температурами текучести и разложения и сравнительно высокой вязкостью расплава.

Для обеспечения возможности сварки плавлением термопластов второй группы необходимо в каждом отдельном случае изыскивать оптимальные способы и технологические приемы их сварки. К этой группе могут быть отнесены ПВХ, поливинилиденхлориды, пентапласт, поликарбонаты и некоторые другие термопласты. Эта группа термопластов, как правило, имеет коэффициент диэлектрических потерь  $\epsilon \tan \delta$  порядка  $10^{-2}$ .

К третьей группе относятся термопласты, энергия активации которых превышает энергию химической связи, и вязкость расплава достигает порядка  $10^{12}$ — $10^{13}$  Пз. Типичный представитель этой группы — фторлон-4.

Опыт внедрения сварки термопластов показал, что сварные соединения с максимальной прочностью могут быть получены при сварке в широком интервале температур — от температуры текучести до температуры разложения. При этом, чем ниже температура сварки, тем большее сварочное давление следует прикладывать. Давление является вторым компонентом, необходимым для управления реологическими процессами в зоне сварки. Но величина давления по максимуму ограничена. По мере возрастания давления растет и упругая составляющая деформации; с увеличением давления интенсивнее происходят процессы механохимической деструкции, а после снятия давления вследствие реализации упругих сил возможно нарушение уже вступивших во взаимодействие макромолекул, т. е. разрушение сварного соединения.

Учитывая это, можно полагать, что при сварке плавлением можно получить сварные соединения с максимальной прочностью, если обеспечивается определенная скорость сдвига расплава [9].

Анализируя сказанное, можно заключить, что свариваемость термопластов характеризуется шириной температурного интервала вязкотекучего состояния, градиентом вязкости, уровнем вязкости в интервале указанных температур и правильно выбранным давлением.

## 6. Пластмассы в переменном электрическом поле

При внесении пластмасс в электрическое поле конденсатора все положительно заряженные частицы, входящие в состав пластмассы, будут испытывать действие сил, стремящихся сдвинуть

эти частицы в направлении вектора напряженности поля  $\vec{E}$ . Отрицательно заряженные частицы будут смещаться в противоположном направлении.

Явление смещения заряженных частиц пластмассы во внешнем электрическом поле называется поляризацией. Различают два вида поляризации. Первая происходит почти мгновенно и без выделения тепла. К ней относятся электронная и ионная поляризации. Вторая совершается во времени и сопровождается выделением энергии в диэлектрике (пластмассе). Этот вид поляризации называется релаксационной. К ней относятся дипольная, ионно-релаксационная, миграционная, структурная, спонтанная поляризации [7].

Если разность потенциалов (напряжение) между обкладками конденсатора изменяется в зависимости от времени  $t$  по гармоническому закону с угловой скоростью ( $u = U_m \sin \omega t$ ), то напряженность электрического поля  $\vec{E} = E_m e^{i\omega t}$ , где  $E_m$  — комплексная амплитуда.

При дипольной и других видах поляризаций частицы диэлектрика смещаются с запаздыванием по отношению к напряженности электрического поля, т. е. имеются релаксационные колебания частиц.

Активная мощность для единицы объема диэлектрика ( $\text{Вт/м}^3$ )

$$p_0 = \delta_{\text{акт}} E = \gamma E^2,$$

или

$$p_0 = 2\pi f \epsilon \tan \delta E^2,$$

где  $\delta$  — угол потерь, который характеризует скорость превращения электромагнитной энергии, получаемой от источника питания, в тепловую энергию, выделившуюся в диэлектрике.

Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  и тангенс угла  $\tan \delta$  являются основными характеристиками диэлектрика, определяющими его нагрев при переменной поляризации.

При высокочастотном способе сварки целью исследования процесса сварки является определение технологических регламентов, позволяющих получить прочный сварной шов заданной конфигурации. Максимальная прочность сварного соединения при данных электрофизических свойствах свариваемых полимерных материалов определяется оптимальными величинами параметров электрического поля, сжимающего усилия, времени нагрева и осадки при правильно сконструированных и качественно изготовленных сварочных электродах.

В Приложении приведены значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь основных марок полиамидов, хлорсодержащих, стирольных, фторлонов и др. При повышении температуры пластмасс диэлектрические свойства их



изменяются, причем характер их изменений связан с присущей каждому типу пластмасс поляризацией (чаще всего несколькими видами поляризации). Как правило, при повышении температуры коэффициент потерь диэлектрика  $\epsilon \times \lg \delta$  увеличивается, что приводит к неравномерному поглощению энергии в процессе ВЧ-нагрева.

При разработке технологий и технологической оснастки для сварки изделий, в состав которых входят металлические детали, необходимо учитывать, что наличие металлических включений в месте приложения электрического поля приводит к искажению поля и повышению напряженности вблизи металлического включения. Максимальное повышение напряженности поля, обусловленное неоднородностью поля для включений в форме шара и цилиндра, равно соответственно трем и двум. Это локальное повышение напряженности электрического поля может привести к возникновению электрического пробоя.

## 7. Энергетические соотношения процесса сварки

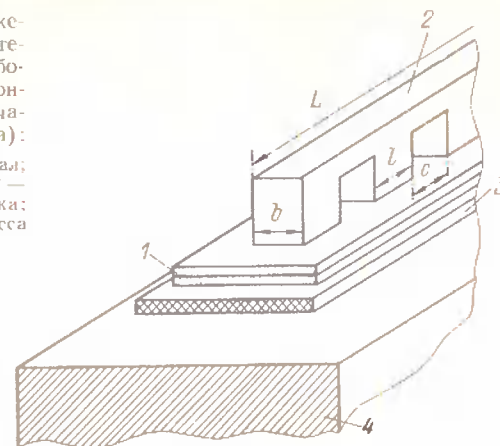
При определении мощности, необходимой для осуществления процесса сварки, при выборе или проектировании высокочастотной сварочной установки следует учитывать, что фактическая зона нагрева, ввиду наличия высокочастотного поля рассеяния (при любой конфигурации электродов) и отводе тепла по горизонтальной плоскости, выходит за пределы ширины и длины сварочных электродов. Увеличение длины зоны нагрева необходимо учитывать для электродов, длина которых менее 5 см. При этом степень несовпадения фактической зоны нагрева термопласта зависит от конфигурации электрода и толщины материала между электродами. При сварке встречными электродами ширина эффективной зоны нагрева превышает ширину электрода на толщину материала между электродами, включая толщину изоляционной прокладки, если таковая имеется. Тогда при  $L \leq 5$  см  $S_{\text{эф}} = (L + a)(b + a)$  при  $L > 5$  см  $S_{\text{эф}} = L(b + a)$ , где  $L$  — длина электрода;  $b$  — ширина электрода;  $a$  — толщина материала между электродами;  $S_{\text{эф}}$  — эффективная зона нагрева (площадь).

При использовании в качестве второго электрода плиты пресса (ширина зоны нагрева будет превышать ширину электрода на две толщины материала, находящегося между электродами, включая изоляционную прокладку). Тогда при  $L > 5$  см  $S_{\text{эф}} = L(b + 2a)$ . При наличии зубчатого электрода (рис. 2) вместо верхнего полосового электрода эффективная зона нагрева для одного выступа может быть определена по формуле  $S'_{\text{эф}} = (l + 2a)(b + 2a)$ , где  $l$  — длина выступа,  $l \leq 5$  см. Число выступов определится как  $n = L/(l + c)$ , где  $c$  — длина впадины, отсюда  $S_{\text{эф}} = S'_{\text{эф}}n$ , или

$$S_{\text{эф}} = \frac{(l + 2a)(b + 2a)}{l + c} L.$$

Рис. 2. Схема расположения свариваемого материала в электродах рабочего конденсатора (конденсатор системы зубчатый электрод — плита):

1 — свариваемый материал; 2 — зубчатый электрод; 3 — изоляционная подложка; 4 — нижняя плита пресса



При сварке тепловая энергия выделяется в массе нагреваемого материала. С ростом температуры свариваемого материала поток тепла от свариваемого материала устремляется к электродам, которые имеют температуру окружающего воздуха. Если совместить ось ортогональной системы координат с осью электродов (рис. 3), то уравнение теплопроводности, описывающее тепловые процессы в системе, может быть записано в виде

$$\partial \theta / \partial t = a \partial^2 \theta / \partial x^2 + p_0 / c \rho, \quad (1)$$

где  $\theta$  — превышение температуры в какой-то точке свариваемого материала на расстоянии  $x$  от начала координат над температурой окружающей среды ( $x=0$  — свариваемая поверхность), К;  $t$  — время, с;  $a$  — коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $p_0$  — объемная плотность мощности, выделяющаяся в материале,  $\text{Вт}/\text{м}^3$ ;  $c$  — удельная теплоемкость материала,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $\rho$  — плотность материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ . Начальные условия:  $T(x, 0) = T_0$ ; граничные —  $T(\pm \delta, t) = T_0$  (практически  $T_0$  электродов в процессе сварки не остается постоянной).

Решение уравнения может быть дано в таком виде:

$$\theta = \frac{p_0 \delta^2}{2\lambda} \frac{32}{\pi^3} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{\cos \frac{(2n+1)\pi x}{2\delta}}{(2n-1)^3} \left( 1 - e^{-\left[ (2n-1) \frac{\pi}{2} \right]^2 a t / \delta^2} \right), \quad (2)$$

где  $\delta$  — толщина свариваемого материала;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности.

Полученная формула дает возможность рассчитать распределение температур по толщине  $2\delta$  свариваемого материала.

Удельная мощность, выделяющаяся в единице объема свариваемого материала:



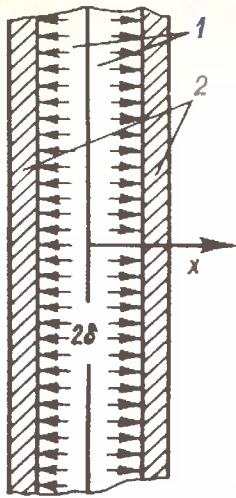
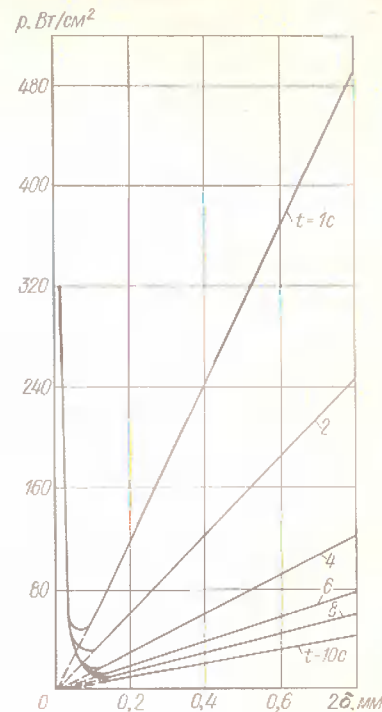


Рис. 3. Расположение свариваемого материала между электродами рабочего конденсатора:

1 — свариваемый материал; 2 — электроды

Рис. 4. Зависимость удельной мощности для сварки пластика от полной толщины материала при разном времени нагрева



$$p_0 = \frac{2\lambda\theta_0}{\delta^2} \left[ 1 - \frac{32}{\pi^3} \left( e^{-\frac{\pi^2}{4} \frac{at}{\delta^2}} - \frac{e^{-\frac{9\pi^2}{4} \frac{at}{\delta^2}}}{3^3} + \frac{e^{-\frac{25\pi^2}{4} \frac{at}{\delta^2}}}{5^3} - \frac{e^{-\frac{49\pi^2}{4} \frac{at}{\delta^2}}}{7^3} + \dots \right) \right]. \quad (3)$$

Полная мощность, генерируемая в зоне нагрева, включающей шов, и не в шве  $P = p_0 S_{\text{эф}} 2\delta$ , где  $S_{\text{эф}}$  — эффективная площадь зоны нагрева.

Для оценки рентабельности нагрева требуется определить мощность, аккумулированную в объеме шва. Она будет меньше, чем общая мощность  $P$ , так как часть энергии перешла к холодным электродам. Полная мощность  $P_{\text{ак}}$ , аккумулированная в сварном шве, определится из формулы

$$P_{\text{ак}} = \frac{c\rho S_{\text{эф}}}{t} \int_{-\delta}^{+\delta} \frac{p_0 \delta^2}{2\lambda} \frac{32}{\pi^3} \times \sum (-1)^{(n+1)} \frac{\cos \frac{(2n-1)\pi x}{2\delta}}{(2n-1)^3} \left( 1 - e^{-\left[ (2n-1) \frac{\pi}{2} \right]^2 \frac{at}{\delta^2}} \right) dx =$$

$$= \frac{S_{\text{эф}} p_0 \delta^2}{2at} \frac{32}{\pi^3} \sum (-1)^{(n+1)} \frac{2\delta \sin \frac{(2n-1)\pi x}{2\delta}}{\pi (2n-1) (2n-1)^3} \times \\ \times \left( 1 - e^{-\left[ (2n-1) \frac{\pi}{2} \right]^2 \frac{at}{\delta^2}} \right) \Big|_{-\delta}^{+\delta} = \frac{S_{\text{эф}} p_0 \delta^3}{at} \frac{64}{\pi^4} \times \\ \times \sum (-1)^{(n+1)} \frac{\sin \frac{(2n-1)\pi}{2}}{(2n-1)^4} \left( 1 - e^{-\left[ (2n-1) \frac{\pi}{2} \right]^2 \frac{at}{\delta^2}} \right); \\ P_{\text{ак}} = \frac{2}{3} \frac{S_{\text{эф}} p_0 \delta^3}{at} \left[ 1 - \frac{96}{\pi^4} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-\left[ (2n-1) \frac{\pi}{2} \right]^2 \frac{at}{\delta^2}}}{(2n-1)^4} \right].$$

Теоретически рассчитанные мощности для сварки ПВХ пленки типа ПМ-1 приведены на рис. 4, из которого видно, что для увеличения термического коэффициента полезного действия процесс нагрева следует вести с максимально возможной скоростью и необходимо подбирать оптимальный тепловой режим электродов рабочего конденсатора. Работа с холодными электродами создает максимальные потери тепла за счет теплопроводности от нагретого материала в электроды.

## 8. Выбор основных параметров электрического поля

При осуществлении процесса сварки термопластов с нагревом в электрическом поле высокой частоты необходимо обеспечить высокую скорость нагрева — малое время нагрева, которое входит в общий цикл времени сварки, что определяет производительность процесса. Кроме того, необходимо произвести оптимальное согласование выходных параметров источника питания с эквивалентными параметрами нагрузочных цепей, что, в свою очередь, обеспечивает и максимальный коэффициент полезного действия установки.

Все эти требования связаны с правильным выбором рабочих напряженностей электрического поля в материале и частоты тока источника питания.

**Допустимая напряженность электрического поля в материале.** При выборе рабочей напряженности электрического поля в материале для осуществления нагрева необходимо помнить, что каждый диэлектрик, находясь в электрическом поле, теряет свойства изоляционного материала, если напряженность поля в нем превышает некоторое критическое значение ( $E_{\text{пр}}$  — пробивная напряженность), т. е. происходит электрический пробой.

Пробой твердых диэлектриков представляет собой сложное явление. Экспериментальные данные по электрическому пробую

твердых тел (в том числе и термопластов) показывают, что основными факторами, влияющими на величину пробивного напряжения, являются: характер микроструктуры твердого диэлектрика, форма электрического поля, вид напряжения. Форма электрического поля определяется размерами и расположением электродов и их конфигурацией. Искажение поля может происходить также и за счет неоднородности самого материала. Искажение поля у краев электродов облегчает пробой у края электрода. Это явление особенно опасно при высоких частотах. При выборе рабочей напряженности электрического поля в материале следует помнить, что с повышением температуры уменьшается его активное сопротивление, что требует снижения рабочей напряженности поля в материале во избежание пробоя.

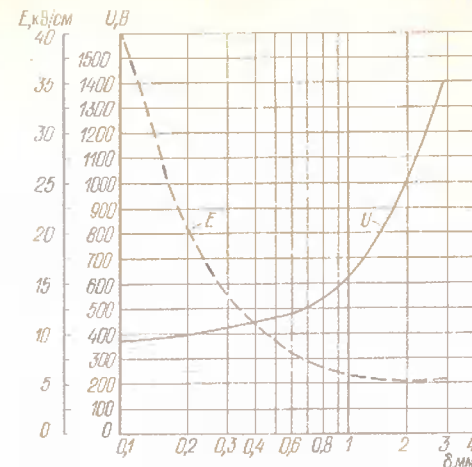
Как правило, пробивные напряженности электрического поля термопластов достаточно велики. Например, пробивная напряженность ( $E_{пр.эф}$ ) винипласта при частоте 50 Гц, температуре  $+20^\circ\text{C}$ , относительной влажности воздуха 60 %, при сферических электродах равна 150—350 кВ/см.

Однако не только значения пробивных напряженностей термопластов определяют выбор рабочей напряженности электрического поля в нем при сварке.

В создаваемых нагревательных системах — рабочих конденсаторах и технологической оснастке для сварки термопластов — неизбежно наличие воздушных промежутков и зазоров, связанных с конфигурацией и видом сварного соединения. Следовательно, выбирая рабочую напряженность электрического поля в термопласте для осуществления процесса сварки, необходимо считаться и с возможной величиной пробивной напряженности воздуха. Последняя в нормальных условиях невелика по сравнению с пробивной напряженностью термопластичных материалов. Так, при давлении  $10^5$  Па, температуре  $20^\circ\text{C}$  и частоте 50 Гц, при расстоянии между электродами от 0,5 до 10 см пробивная напряженность воздуха лежит в пределах от 32 до 28 кВ/см (указанные величины относятся к амплитудным значениям). Наблюдается также зависимость пробивного напряжения от величины произведения давления газа на расстояние между электродами. Минимальное значение пробивных напряжений для различных газов лежит в пределах 280—420 В. Для воздуха оно составляет около 300 В. Пробивное напряжение воздуха в однородном поле меняется в зависимости от частоты, особенно при радиочастотах, имея экстремум (минимум) при частоте тока, близкой к  $10^7$  Гц, так  $U_{прл}=0,75$ . Указанные данные были получены между двумя сферическими электродами.

При высоких частотах и неоднородном поле пробой воздуха (в отличие от пробоя в однородном поле) происходит при значительно более низких напряжениях, чем при постоянном токе или токе 50 Гц. Химический состав воздуха (наличие влаги, различных летучих, например, хлористого водорода) при сварке термопла-

Рис. 5. Зависимость напряжения на рабочем конденсаторе  $U_{р.к}$  и напряженности электрического поля в материале от общей толщины материала



тов заметно влияет на электрическую прочность нагревательных систем.

Следовательно, на величину допустимой напряженности электрического поля в материале оказывают влияние: форма электрического поля, обусловленная конфигурацией электродов рабочего конденсатора и марка свариваемого материала, частота тока, чистота и состояние поверхности свариваемого термопласта, давление и температура окружающей воздушной среды, а также наличие в воздухе различного рода примесей.

Исследования и расчетные данные показывают, что в большинстве случаев при частоте тока 27,12 МГц напряженность электрического поля в свариваемом термопласте лежит в пределах от 1,5 до 30,0 кВ/см. На рис. 5 приведена зависимость напряжения на электродах рабочего конденсатора  $U_{р.к}$  и напряженности электрического поля в термопласте (ПВХ)  $E_m$  от общей его толщины между электродами, полученная в результате расчета по формуле

$$E_m = \sqrt{\frac{\left(\frac{\rho c}{t} \frac{\lambda}{(0,5 \cdot 2\delta)^2}\right) \Delta T \cdot 4,18}{2\pi f \epsilon_0 \epsilon \lg \delta}}$$

Исходные данные: прирост температуры  $\Delta T = 145^\circ\text{C}$ ; относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon \approx 3,0$ ; тангенс угла диэлектрических потерь  $\lg \delta = 0,05$ ; время нагрева  $t = 2$  с, частота тока 27,12 МГц.

**Рабочий диапазон частот.** В п. 6 указывалось, что удельная мощность, генерируемая в термопласте, помещенном в электрическое поле высокой частоты, прямо пропорциональна частоте тока и квадрату напряженности электрического поля в термопласте. С увеличением частоты тока для получения заданных удельных мощностей возможно снижение напряженности электрического

поля, что, в свою очередь, повышает надежность работы установки и устраняет вероятность пробоя в рабочем конденсаторе. Однако, величина верхнего предела рабочего диапазона частот ограничена, во-первых, тем, что и в диэлектрических материалах так же, как в металлах, имеет место поверхностный эффект. В нашем случае этим можно пренебречь в связи с малой толщиной свариваемых термопластов по сравнению с глубиной проникновения (до частоты  $10^9$  Гц). Во-вторых, при выборе верхнего предела частоты следует помнить о необходимости согласования выходных параметров лампового генератора с эквивалентными параметрами нагрузочных цепей, о чем было сказано ранее.

Третьим критерием, определяющим выбор максимальной частоты тока, является обеспечение равномерного распределения напряжения на электродах рабочего конденсатора. К данному вопросу мы вернемся при конструировании нагревательных систем и выборе схем подключения их к источнику питания.

Минимальной частотой будем называть частоту, при которой можно создать требуемую интенсивность нагрева при сварке без превышения допустимой напряженности электрического поля в материале (нагревательной системе):

$$f_{\min} = \frac{\rho c \Delta T}{2\pi \Delta t} / (\operatorname{tg} \delta \epsilon_0 E_{\text{м. доп}}^2 t). \quad (5)$$

где  $f_{\min}$  — минимальная частота тока, Гц;  $\rho$  — плотность,  $\text{кг/м}^3$ ;  $c$  — удельная теплоемкость,  $\text{Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ ;  $\Delta T/\Delta t$  — скорость нагрева,  $\text{К/с}$ ;  $\epsilon_0$  — диэлектрическая постоянная,  $\epsilon_0 = 1/4\pi \cdot 9 \cdot 10^9 \text{ Ф/м}$ ;  $E_{\text{м. доп}}$  — допустимая напряженность электрического поля в материале,  $\text{В/м}$ .

При окончательном выборе частоты следует руководствоваться выделенным рядом частот для промышленных высокочастотных установок (ГОСТ 23450—79 «Радиопомехи промышленные от промышленных, научных и медицинских установок. Норма и методы измерений»).

## 9. Способы высокочастотной сварки

Высокочастотная сварка может осуществляться различными методами: непрерывно-последовательным (роликовым, шаговым по принципу швейной машины), прессовым (по принципу штамповки) и с помощью ручных инструментов.

**Роликовая сварка.** Рабочий конденсатор в этом случае выполняется в виде двух одновременно вращающихся роликов — электродов, между которыми зажимается свариваемая пленка. При подаче на ролики высокочастотной энергии пленка будет нагреваться, роликами создается и необходимое давление. Скорость сварки ограничена. Так, при толщине пленки 0,1 мм в два слоя можно получить скорость сварки до 6 м/мин, при этом время сварки исчисляется долями секунд. Для обеспечения указанных

скоростей сварки частота тока генератора должна быть не менее  $81,36 \cdot 10^6$  Гц, напряженность электрического поля — порядка  $10^6$  В/м. Этот метод сварки в отечественной промышленности не нашел применения.

**Сварка по принципу швейной машины.** При этом методе игла швейной машины как бы заменяется лапкой — электродом, длина которого по конструктивным соображениям не должна превышать 10 мм. Подача материала может регулироваться в широких пределах, обеспечивая как сплошной герметичный шов, так и прерывистый. В Советском Союзе этот метод также не применяется, оборудование для его осуществления отечественной промышленностью не выпускается.

**Прессовая сварка.** Это наиболее универсальный метод, позволяющий сваривать все толщины пластифицированного термопластичного материала, а также непластифицированные термопласты. Прессовая сварка позволяет, подобно штамповке, точно и многократно повторять операцию сварки по заданной конфигурации. Данный метод сварки широко используется как в отечественной промышленности, так и за рубежом.

**Сварка с помощью ручных инструментов.** Этот метод сварки близок по своей технологии к прессовому способу. В качестве сварочного инструмента чаще всего используются клещи, в которые вмонтированы электроды рабочего конденсатора<sup>1</sup>. Площадь сварки при использовании этого метода обычно не превышает 5  $\text{см}^2$ . Часто этот метод применяется для заварки последнего шва при упаковке крупногабаритных изделий, заготовке гомотрансплантов в условиях стерильного бокса, приварки отдельных элементов к крупногабаритным изделиям и пр.

## 10. Виды сварных соединений.

### Аргументация выбора расположения электродов рабочего конденсатора, геометрические размеры

Как указывалось выше (см. п. 8), распределение температуры в термопластичном материале при высокочастотной сварке носит параболический характер. Важным условием является положение экстремума параболы в зоне сварного соединения, т. е. получение именно здесь максимальной температуры. Однако это обстоятельство зависит от целого ряда факторов: геометрических размеров (ширины, а в некоторых случаях и высоты) каждого из электродов рабочего конденсатора, относительного их расположения, толщины слоев свариваемого термопласта и их количества, наличия изоляционных подложек, материала самих электродов и их температуры, а также от расположения электродов относительно зоны сварки.

<sup>1</sup> А. с. 121891 (СССР).



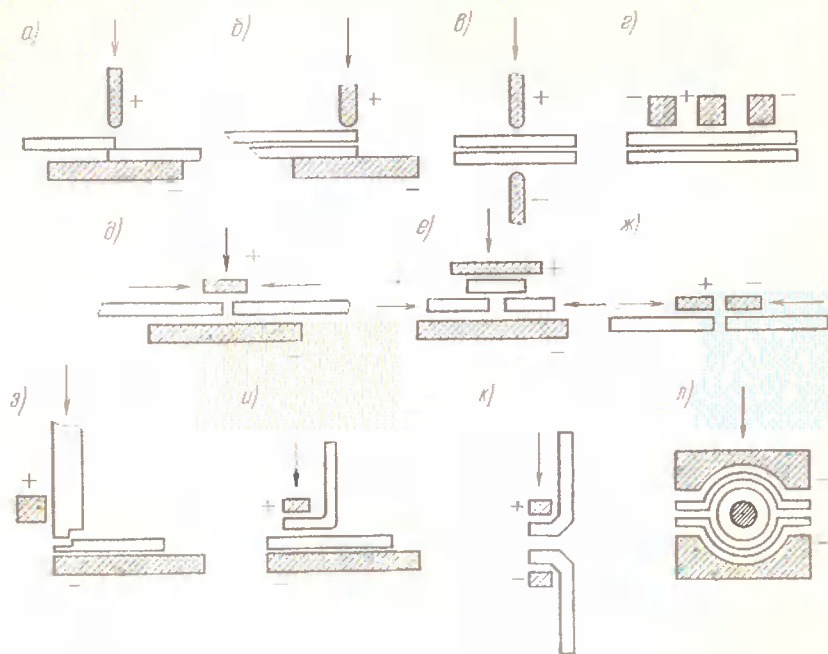


Рис. 6. Образцы сварных швов и варианты размещения электродов при ВЧС: а, б, в, г — нахлесточные; д, е, ж — стыковые; з — угловой; и, к — с отбортовкой; л — трехэлектродная система. Знак (+) обозначает высокопотенциальный электрод, знак (-) — заземленный

Все указанные выше факторы в той или иной мере оказывают влияние на прочность сварного соединения [4].

Как уже указывалось, прессовый способ сварки является наиболее универсальным и технологичным. Этим способом могут выполняться швы практически всех типов сварных соединений — стыковые, нахлесточные, угловые и тавровые. Выбор типа шва обусловлен особенностями свариваемых конструкций и условиями нагружения в процессе эксплуатации, толщиной и свойствами свариваемых материалов. В Советском Союзе существует стандарт на соединения из полиэтилена, полипропилена и винилпласта, выполненные сваркой нагретым газом с присадочным прутом или экструзионной сваркой, где приводятся основные типы соединений, их условные обозначения и размеры конструктивных элементов (ГОСТ 16310—80). Сварные соединения, выполненные при высокочастотной сварке, до настоящего времени не стандартизованы.

На рис. 6 представлены виды сварных соединений и варианты размещения электродов при высокочастотной сварке. Из рис. 6 видно, что нагрев термопластичных материалов в процессе сварки может быть осуществлен как в основном поле (а, б, в, д, е, и, к, л), так и в поле рассеяния (г, ж, з). На рис. 6, в, к, л изображены схе-

мы встречных электродов (полосовых), когда нижний электрод является зеркальным отображением верхнего электрода. При использовании встречных электродов в свариваемом материале создается симметричное электромагнитное поле. При сварке двух равных по толщине слоев и одинаковой теплоотдаче в электроды вершина параболы температурного поля располагается на границе двух свариваемых слоев, что позволяет осуществить одно из необходимых условий обеспечения оптимального сварочного процесса — наличие температуры текучести на границе двух свариваемых слоев. Сварной шов формируется из обоих свариваемых слоев термопласта, что позволяет получить сварные швы с более высокими показателями прочности. При использовании сложных электродов «электрод — плита» (рис. 6, а, б, д, е, и) и отсутствии дополнительной тепловой энергии от плиты при сварке двух равных по толщине слоев термопласта вершина параболы будет сдвинута в сторону полосового электрода. В формировании сварного соединения основная роль будет за слоем термопласта, примыкающего к полосовому электроду. Повышение температуры в сварном шве одного из слоев термопласта увеличивает температуру в его околошовной зоне. Соответственно с увеличением температуры околошовной зоны уменьшается и прочность сварного соединения. Экспериментально доказано, что при проведении сварки по системе «электрод — плита» прочность сварного соединения уменьшается до 20 % по сравнению с прочностью сварного соединения, полученного при применении встречных электродов и тех же начальных условиях сварки [4].

Как правило, технологические параметры нагрева и сварки пластмасс определяются экспериментально для каждого конкретного случая.

Кроме перечисленных выше технологических параметров на прочность сварного соединения большое влияние оказывает конечная толщина сварного шва. Утонение материала в процессе сварки связано с усилием сжатия и другими параметрами сварки (что будет рассмотрено при описании конкретных технологических процессов).

### III. ОБЩИЕ И СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОДОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКЕ

#### 11. Общие требования

Сварочные электроды являются основным рабочим органом сварочных устройств. Конструкция электрода зависит от размера и конфигурации изделия, вида сварного соединения, типа свариваемого материала и от того, следует ли одновременно со свар-

кой производить обрезку (вырубку) сваренного изделия (детали).

При конструировании электродов следует учитывать, что наибольшая напряженность электрического поля в материале необходима в зоне сварки. Известно, что неравномерность электрического поля поперек шва (наличие поля рассеяния) приводит к снижению прочности сварного соединения. Ограничить это явление можно выбором ширины сварочного электрода. Последняя связана с толщиной свариваемой пленки и выбирается (при сварке двух слоев пленки) из соотношения  $20\delta > d_s > \delta$ , где  $d_s$  — ширина сварочной, рабочей части электрода;  $\delta$  — толщина термопластичного материала, подлежащего сварке. Причем увеличение ширины электродов (при постоянном напряжении между ними) уменьшает краевой эффект, что снижает температуру нагрева околошовной зоны (см. п. 10) и увеличивает прочность сварного соединения. С целью снижения напряженности электрического поля в материале в зоне краевого эффекта края кромок сварочных электродов закругляют. Радиус закругления должен быть близким к  $1/8$  ширины рабочей поверхности электрода.

## 12. Специальные требования

Как правило, образование сварного шва по кромке изделия является желаемым явлением. Однако существует целый ряд изделий, где наличие видимого сварного шва нежелательно (так называемая «безоблойная сварка»). Это требование обосновывается эксплуатационными характеристиками изделий. Речь идет о таких изделиях, которые, например, вертикально ставятся на сварной шов (книжный переплет) или вставляются в заданный объем (сепарационные аккумуляторные пластины). Сварка без образования сварной кромки должна быть незаметной для глаза потребителя. Для получения подобных швов рекомендуется специальная форма электродов, при которой вертикальная сторона режущей кромки обращена в сторону рабочей части свариваемого изделия.

Более полно преимущества высокочастотной сварки с указанными электродами проявляются в том случае, когда в качестве встречного электрода используется электрод, повторяющий форму сварочного электрода.

При сварке плоских изделий в качестве второго электрода может быть использована плита, имеющая выемку вдоль линии режущей кромки (рис. 7).

Сварка электродами описанной формы вызывает большее вытекание материала, чем при использовании обычных электродов со сварочно-режущими кромками. Еще одна особенность такой сварки: при уменьшении расстояния между электродами увеличивается электрическая емкость рабочего конденсатора, что приводит к увеличению потребляемой высокочастотной мощности. Бо-

Рис. 7. Расположение и форма несимметричных сварочных электродов для безоблойной сварки:

1 — фигурный электрод; 2, 3 — свариваемый материал; 4 — плоский электрод

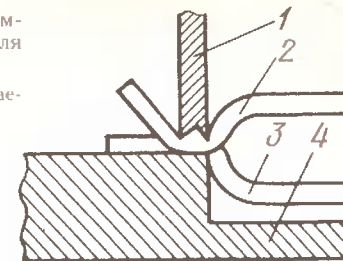
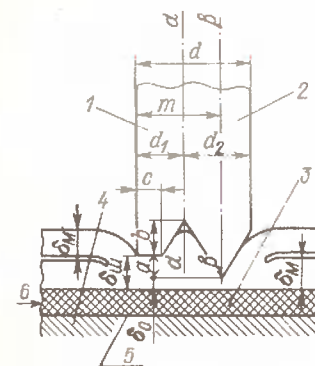


Рис. 8. Электрод для сварки фигурного шва с обрезкой:

1 — часть электрода, создающая основной сварной шов; 2 — линия раздела в случае применения составного электрода; 3 — часть электрода, формирующая кромку изделия и обрезка заготовки; 4 — линия обрезки заготовки; 5 — плита — заземленный электрод; 6 — изоляционная прокладка толщиной 0,8—1,2 мм;  $\delta_m$  — толщина одного слоя свариваемого материала;  $\delta_{ш}$  — толщина сварного шва;  $c$  — ширина сварного шва

лее отчетливо это явление наблюдается при отсутствии изоляционных прокладок.

Если при сварке обычными электродами недостаток высокочастотной мощности можно компенсировать за счет увеличения времени сварки или за счет повышения давления, то при безоблойной сварке возможность подобной компенсации исключена.

Безоблойная сварка в сравнении с обычной требует некоторого увеличения удельной мощности, а давление выбирается меньше обычного.

Часто при разработке конструкции изделия необходимо выполнить фигурный шов с одновременной обрезкой<sup>1</sup>. Эскиз электрода, осуществляющего такой шов, приведен на рис. 8. При его конструировании следует руководствоваться соотношениями  $\delta_{ш} = 0,6 \div 0,8 (2\delta_m)$ ;  $20\delta_m > c > 4\delta_m$ .

В основном конструировании электродов, их рабочие кромки, удерживающие шаблоны, задаются формой свариваемого изделия и выбранной конфигурацией сварного шва.

## 13. Точность исполнения электродов

Высокая точность исполнения технологической оснастки и пресового устройства в целом в некоторых случаях (при сварке тонких пленок, при высоких требованиях к герметичности и прочности и т. д.) может оказать решающее влияние на успех сварки. Искажение параллельности или плоскостности сварочных поверхностей

<sup>1</sup> А. с. 1219401 (СССР).



противолежащих электродов нарушает равномерность распределения вдоль них значений технологических параметров сварочного процесса, так что на некоторых участках величины удельной электрической энергии и давления отклоняются от оптимальных значений настолько, что прочность соединения становится недопустимо малой.

Теоретическое рассмотрение модели непараллельных электродов позволяет оценить допустимые отклонения электродов от параллельности, а также получить некоторые общие рекомендации, полезные при проектировании технологической оснастки и отработке технологического процесса сварки конкретных изделий.

В результате соответствующего решения задач электро- и гидродинамики значения технологических параметров сварки вдоль непараллельных электродов могут быть получены в виде:

$$\omega = \omega_0 Q_\omega; \quad p = p_0 Q_p, \quad (6)$$

где  $\omega_0$  и  $p_0$  — удельная электрическая энергия и давление между параллельными электродами;  $Q_\omega$  и  $Q_p$  — величины, определяющие отклонения значений  $\omega$  и  $p$  от оптимальных при перекосе (нарушении плоскостности) электродов.

При отработке технологического процесса сварки данного изделия обычно проводится серия опытных сварок, а затем путем разрыва сваренных образцов на разрывной машине определяются, во-первых, величины  $\omega$  и  $p$ , при которых прочность соединения имеет наименьшие допустимые значения, и, во-вторых, оптимальные значения  $\omega_0$  и  $p_0$ , при которых прочность максимальна. Тогда в соответствии с выражениями (6) величины  $Q_\omega$  и  $Q_p$  выступают как отношения допустимых значений параметров сварки к оптимальным:

$$Q_{\omega_{доп}} = \omega_{доп} / \omega_0; \quad Q_{p_{доп}} = p_{доп} / p_0. \quad (7)$$

Из анализа теоретических выражений, определяющих величины  $Q_\omega$  и  $Q_p$ , выясняется, что при перекосе электродов между этими величинами всегда устанавливается следующее соотношение, которое в рассматриваемом смысле определяет состояние термопласта между сжимающими его электродами:

$$Q_p - Q_\omega^{3/2} e^{a(Q_\omega - 1)} = 0, \quad (8)$$

где  $a$  — безразмерный температурный коэффициент, определяющий чувствительность вязкости термопласта к колебаниям температуры нагрева;  $e$  — число Неппера,  $e = 2,71$ . Для поливинилхлоридных пластикутов его значения лежат в пределах трех-четырех единиц, причем меньшие значения соответствуют меньшему содержанию пластификатора в материале.

Для определения допустимого перекоса необходимо провести значительное количество опытных сварок и из всевозможных

опытных величин  $Q_{\omega_{доп}}$  и  $Q_{p_{доп}}$  подобрать такую пару  $Q_{\omega_s}$  и  $Q_{p_s}$ , которая удовлетворяет уравнению состояния (8). При этом необходимо выполнить относительно сложные графические построения. С помощью найденного таким образом значения  $Q_{\omega_s}$  допуск на непараллельность может быть вычислен по формуле

$$\delta = d_{ш} (1 - Q_{\omega_s}^{1/2}) Q_{\omega_s}^{-1/2}, \quad (9)$$

где  $\delta$  — допуск на непараллельность (неплоскостность), отнесенный ко всей длине электродов;  $d_{ш}$  — толщина сварного шва, которую можно принять равной половине толщины пакета свариваемых пленок.

При сварке поливинилхлоридных пластикутов благодаря некоторым особенностям их реологических свойств нахождение допустимого отклонения  $\delta$  значительно упрощается. Достаточно построить единственную экспериментальную зависимость прочности от давления (при фиксированных мощности высокочастотного генератора и времени нагрева) и вычисленное по одной из формул (6) значение  $Q_{p_{доп}}$  подставить в выражение

$$\delta = d_{ш} \{ 1 - [1 - k (Q_{p_{доп}} - 1)]^{1/2} \} [1 - k (Q_{p_{доп}} - 1)]^{-1/2}, \quad (10)$$

где  $k$  — величина, зависящая от физических свойств свариваемых материалов,  $k = 0,3 \div 0,6$ ; причем большие величины соответствуют материалам с меньшим содержанием пластификатора.

Как следует из формул (9) и (10), величина допуска существенно зависит от допустимого снижения прочности сварного соединения, поскольку это снижение определяет значение параметров  $Q_{\omega_s}$  и  $Q_{p_{доп}}$ . Чем меньше допустимое снижение прочности, тем меньше эти величины отличаются от единицы и тем жестче требования к качеству исполнения электродов.

Таким образом, в результате отработки технологического процесса сварки данного изделия с помощью выражений (8) и (10) может быть одновременно получена информация о необходимой точности исполнения электродов. Вместе с тем, на основе анализа теоретических и опытных данных при проектных расчетах устройств для сварки поливинилхлоридных материалов рекомендуется следующая зависимость допуска на непараллельность (неплоскостность) электродов от толщины сварного шва, полученная из условия снижения прочности соединения в результате их перекоса не более чем на 20 %:  $\delta = (0,15 \div 0,25) d_{ш}$ , где большие значения коэффициента пропорциональности соответствуют более мягким (менее тугоплавким) материалам. Здесь допуск также должен быть отнесен ко всей длине электродов.

Известно, что недостаток мощности источника высокочастотной энергии, подводимой к электродам, приводит к увеличению времени нагрева и давления осадки. Точно так же при недостаточной мощности силовой системы сварочного пресса недостаток давления в известных пределах компенсируется увеличением



удельной электрической энергии, выделяемой в материале. При этом увеличиваются обе характеристические величины параметров сварки — как оптимальные, так и допустимые, что, в свою очередь, приводит к приближению допустимых величин  $Q_{\omega_{\text{дон}}}$  и  $Q_{\rho_{\text{вот}}}$  к единице. В таких случаях необходимо [см. формулу (10)] ужесточать требования к точности исполнения электродов. Действительно, всякий раз, когда при эксплуатации сварочной установки обнаруживается недостаток усилия сжатия электродов или электрической мощности высокочастотного генератора, производятся тщательные выверки, подшлифовка, регулирование и т. п. электродов. Сварка становится неустойчивой по причине повышения требований к точности исполнения и жесткости сварочного устройства.

Таким образом, при эксплуатации сварочного оборудования следует учитывать, что всякие отклонения сварочного режима от оптимального вызывают повышение требований к качеству исполнения технологической оснастки и сварочного устройства в целом.

#### 14. Учет волновых явлений при конструировании и подключении электродов к источнику питания

Если длина электродов превышает 0,5—0,7 м, то существенное влияние на свариваемость термопластов оказывают волновые явления, возникающие при частотах электрических колебаний, которые применяются в технике высокочастотной сварки термопластов (т. е. при частоте тока 27,12 МГц).

Предположим, что высокочастотное напряжение источника питания подключено с одной стороны к концам сварочных электродов, тогда допустимая длина параллельных электродов при длине волны  $\lambda$  в первом приближении может быть вычислена по формуле:

$$l_{\text{дон}} = \lambda m \arcsin \sqrt{2,203 \lg Q_{\rho_{\text{дон}}} / a} / (2\pi), \quad (11)$$

где  $\lambda$  — длина электромагнитной волны в свободном пространстве;  $m$  — коэффициент укорочения электромагнитной волны в результате помещения между электродами диэлектрика. Для поливинилхлорида его можно принять равным 0,65.

Допустимая длина электродов, как и необходимая точность их исполнения, зависит от заданного допустимого уровня снижения прочности на тех участках, где в результате волновых явлений напряженности электрического поля между электродами отличается от оптимальной. Анализ опытных данных и расчеты дают значения допустимых длин электродов порядка (0,04—0,05)  $\lambda$  при условии снижения прочности соединения не более, чем на 20 %. Для обычно применяемой частоты  $f=27,12$  МГц  $l_{\text{дон}} = (0,4 \div 0,5)$  м (для поливинилхлорида).

Волновые процессы при передаче высокочастотной энергии вдоль электродов оказывают существенное влияние на требования

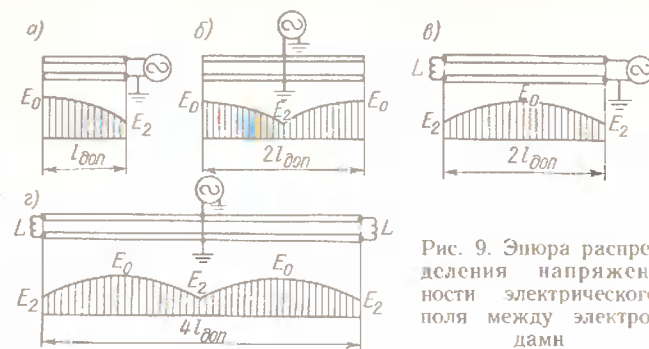


Рис. 9. Эпюры распределения напряженности электрического поля между электродами

к качеству их исполнения. Расчеты показывают, что при частоте  $f=27,12$  МГц для электродов длиной 0,25—0,30 м допуск на непараллельность (неплоскостность) должен быть уменьшен приблизительно в два раза по сравнению с величиной, определяемой формулами (9) и (10). Для электродов длиной 0,3 м и более такая точность лежит за пределами возможностей металлорежущих станков нормальной точности, и изготовление электродов требует применения специального оборудования и ручных пригонок.

На рис. 9 показаны эпюры распределения напряженности электрического поля между электродами при различных схемах подключения их к высокочастотному генератору. Можно видеть, что при прочих равных условиях длины электродов могут быть увеличены в два раза, если подключение осуществить к средней части электродов (рис. 9, а, б) или замкнуть их противоположные по отношению к точке подключения концы через надлежащим образом подобранную индуктивность (рис. 9, в). Если при центральном подключении электроды замкнуть через индуктивности с обеих сторон (рис. 9, г), то их длина может быть увеличена в четыре раза. Таким образом, правильно выбрав схему подключения электродов к источнику питания, можно в значительной степени избежать отрицательных явлений, связанных с волновым характером распространения высокочастотной электромагнитной энергии вдоль сварочных электродов.

При расчете выравнивающей индуктивности следует исходить из того, что она должна обеспечить параллельный резонанс с емкостью, образуемой той частью электродов, к которой она подключена. При этом между емкостью  $C$  и индуктивностью  $L$  должно выполняться соотношение

$$\omega L = 1/(\omega C),$$

где  $\omega=2\pi f$  — круговая частота, откуда требуемая величина индуктивности  $L$  равна

$$L = [(2\pi f)^2 C]^{-1},$$

где  $C$  — емкость, Ф.

При сварке различных изделий емкость  $C$  рабочего конденсатора меняется, поэтому сварочные устройства необходимо снабжать регулируемыми индуктивностями. Правильность подбора необходимой величины может быть оценена по результатам опытных сварок.

#### IV. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СВАРКИ

##### 15. Сварка пластифицированных термопластов

Пленки из пластифицированных, ненаполненных термопластов составляют примерно 75 % от всех термопластичных материалов, выпускаемых сегодня химической промышленностью. Наибольшее распространение получили пленки, изготовленные на основе поливинилхлоридной и полиамидной смол (ГОСТ 9998—74).

С точки зрения разработки технологических процессов ВЧ-сварки изделий и выпускаемых промышленностью пластифицированных термопластов нас в первую очередь будут интересовать пределы изменения их толщины и диэлектрических свойств ( $\epsilon$  и  $\text{tg } \delta$ ), а также их свариваемости (т. е. реологические свойства).

Основой пластифицированных поливинилхлоридных термопластов является полихлорвинил  $(\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl})_n$  с асимметричным строением молекул (за счет наличия в них атомов хлора), вследствие этого он является полярным диэлектриком.

На рис. 10 приведена зависимость  $\epsilon$  и  $\text{tg } \delta$  ПВХ от температуры при частоте тока 1 МГц. При температуре 20 °С  $\epsilon$  и  $\text{tg } \delta$  соответственно равны 3,3 и  $1,25 \cdot 10^{-2}$ . Коэффициент потерь  $\epsilon \times \text{tg } \delta$  равен  $4,1 \cdot 10^{-2}$ . ПВХ в зависимости от поляризаций, которые в нем происходят при помещении его в электрическое поле высокой частоты, относится к третьей группе диэлектриков, отличающихся релаксационными полярizationами. Только в данном материале полярization обусловлена поворотом имеющихся полярных радикалов по отношению к молекуле. Диэлектрическая проницаемость этих материалов зависит также от частоты приложенного напряжения. В мегагерцевом диапазоне частот  $\epsilon$  уменьшается с увеличением частоты,  $\text{tg } \delta$  с частотой увеличивается. Для повышения эластичности ПВХ, расширения пределов и снижения температуры его переработки, в него добавляют различного типа пластификаторы, для замедления разложения — стабилизаторы, для придания товарного вида — красители и пр. В связи с этим  $\epsilon$  и  $\text{tg } \delta$  различных марок пластифицированных пленок могут между собой значительно различаться. Кроме того, различие в значениях  $\epsilon$  и  $\text{tg } \delta$  может наблюдаться даже в однотипных марках материала в связи с неидентичностью исполнения технологических регламен-

Рис. 10. Зависимость  $\epsilon$  и  $\text{tg } \delta$  ПВХ от температуры при частоте 1 МГц

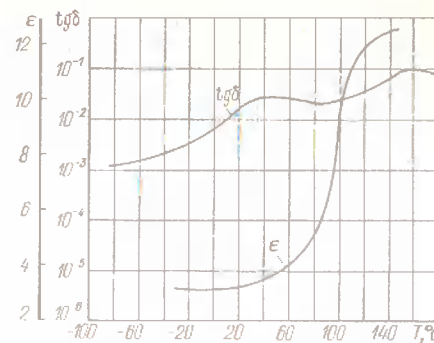


Рис. 11. Зависимость  $\epsilon$  и  $\text{tg } \delta$  ПВХ-пленок от температуры при частоте 27,12 МГц:

— ПВХ прокладочный, серый,  $\delta = 2,2$  мм; — — — пластифицированная ПВХ-пленка, галантерейная, черная,  $\delta = 0,45$  мм; — — — пластифицированная ПВХ-пленка, галантерейная, белая,  $\delta = 0,265$  мм

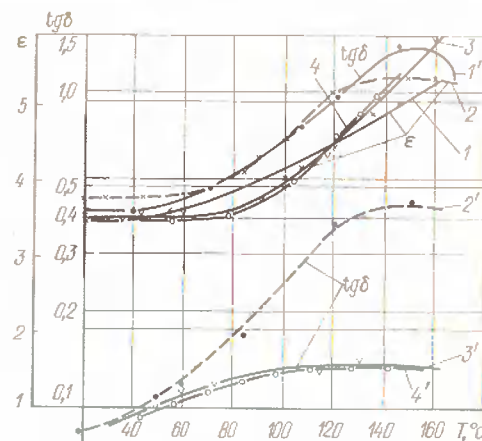
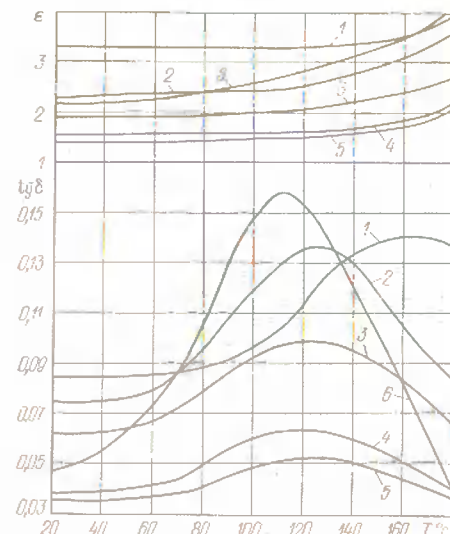


Рис. 12. Зависимость  $\epsilon$  и  $\text{tg } \delta$  полимерных материалов для обуви:

1 — обувная лаковая винилскожа, «Т»-желтая; 2 — свинокс монолитный, черный; 3 — свинокс пористо-монолитный, черный; 4 — патора, коричневая; 5 — кларино, белый; 6 — французская искусственная кожа



тов его производства и различием исходных продуктов. В связи с этим, как правило, знакомство с материалом — пленками, подлежащими сварке при нагреве в электрическом поле высокой частоты, начинается с исследования  $\epsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$  в зависимости от изменения температуры пленки при выбранных частотах приложенного напряжения.

На рис. 11 и 12 приведена зависимость  $\epsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$  от температуры при частоте 27,12 МГц для галантерейной пленки (ГОСТ 9998—80, типа ГВ). Из рис. 11 видно, что внесенные добавки значительно изменили величину  $\operatorname{tg} \delta$ , ход кривых (увеличение  $\epsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$  с температурой) сохранился, как и для ПХВ, видно также, что коэффициент потерь  $\epsilon \times \operatorname{tg} \delta$  ПХВ-пленок значительно больше  $10^{-2}$  и лежит в пределах от  $4 \cdot 10^{-2}$  (для ПХВ) до  $5 \cdot 10^{-1}$  (для пластифицированных пленок). Выпускаемые промышленностью пленки в значительной степени различаются и по толщине. Так, толщина пленок для галантерейных изделий (ГОСТ 9998—80) лежит в пределах от 0,25 до 0,7 мм, для упаковки (пленка типа В-118, ГОСТ 25250—82) от 0,1 до 0,28 мм.

С уменьшением толщины свариваемых пленок происходит перераспределение энергии, генерируемой в материале, идущей на нагрев непосредственно свариваемого материала и теряемой в электроды рабочего конденсатора. Причем тепловой поток, направленный из зоны сварки к слоям материала, прилегающим к сварочным электродам, с уменьшением толщины пленок увеличивается. Увеличение времени нагрева при достаточно тонких пленках (меньше 0,2 мм), как правило, не приводит к желаемым результатам. Для сохранения времени нагрева необходимо повышать удельную мощность, генерируемую в материале, либо за счет повышения частоты тока в пределах выделенных полос частот, либо за счет повышения напряженности электрического поля в материале, что также ограничено электрической прочностью системы рабочего конденсатора. Можно снизить потери энергии в электроды повышением их температуры. При этом допустимая температура подогрева сварочных электродов  $T$ , определяется температурой плавления термопласта  $T_{\text{пл}}$  и его адгезионными свойствами, т. е.  $T_s = (T_{\text{пл}} - 30)^\circ\text{C}$ . В табл. 3 представлены зависимости температуры подогрева электродов от типа и толщины свариваемых материалов [2, 11].

Таблица 3. Зависимость температуры подогрева сварочных электродов от типа и толщины свариваемого материала

Материал	$\epsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot 10^2$	$T_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$	$a \cdot 10^2, \text{см}$	$T_s, ^\circ\text{C}$
Полихлорвиниловое полотно	0,7	120	9 и более	20
			9—2	20—90
			2—0,5	90—130
Капроновая ткань	8	200	5 и более	20
			5—0,5	20—110
ПХВ-пленка	10	140	2 и более	20
			2—0,5	20—60

Введя подогрев электродов и стабилизируя его, мы тем самым сохраним, а в некоторых случаях и уменьшим, время нагрева. При этом следует помнить, что после выключения нагрева свариваемый материал необходимо выдержать под давлением до тех пор, пока полимер не перейдет в стеклообразное состояние  $T_g$  (см. рис. 1). Чем выше температура электродов, тем больше время выдержки. Это обстоятельство необходимо учитывать при оценке времени сварки и производительности в целом.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что на прочность сварного соединения, являющуюся критерием оценки выбора оптимальных параметров процесса, оказывают влияние соотношение давления при сварке и ширины сварочных электродов, конечной толщины сварного шва и первоначальной толщины свариваемого материала. Установлено, что при достижении сварным швом конечной толщины, равной 0,6—0,7 первоначальной толщины двух свариваемых слоев термопласта, при любой совокупности значений давления и напряженности электрического поля в материале последний имеет максимальную прочность при испытании на растяжение (расслаивание). Отношение прочности на расслаивание к прочности целого материала при растяжении при оптимальных режимах сварки лежит в пределах 0,8—0,7. Разрушение сварного соединения происходит в околошовной зоне. Следует также отметить, что верхний предел отношения конечной толщины сварного шва к первоначальной толщине свариваемого материала соответствует толщине материала до 0,6 мм. Для большей толщины следует выбирать нижний предел.

Давление при сварке пластифицированных термопластов может выбираться в пределах от 0,5 до 2,5 МПа. Причем, при верхнем пределе давления и малой ширине электродов получается тот же эффект прочности сварного соединения, что и при увеличении ширины электродов и снижении давления [3, 11].

## 16. Технологические особенности изготовления аппликаций, эмблем, товарных знаков

При изготовлении различных изделий все чаще возникает необходимость сварки поливинилхлорида с тканями из натуральных волокон. Широко используется приваривание тесьмы «молния» на хлопчатобумажной ткани к поливинилхлориду при изготовлении обуви, сумок, портфелей, футляров. Одним из видов украшений одежды, обуви, галантерейных изделий является аппликация. В настоящее время широко применяется изготовление эмблем для нарукавных знаков методом аппликации с использованием высокочастотного нагрева.

Поливинилхлоридные аппликации могут быть выполнены на любом виде тканей как не содержащих, так и содержащих синтетические волокна, а также непосредственно на поливинилхлорид



ной пленке. Следует отметить, что если сварка пленок в электрическом поле высокой частоты характеризуется образованием однородной структуры в результате разогрева пленки, то при изготовлении ПВХ-аппликаций на ткани происходит диффузное проникновение полимера в структуру ткани, за счет чего создается соединение материалов ПВХ-пленки и ткани между собой. Следует указать, что техника изготовления самой аппликации чрезвычайно проста, а трудность выполнения ее не зависит от сложности рисунка.

Технологический процесс приваривания аппликации осуществляется следующим образом. Ткань, на которую должна быть нанесена аппликация, укладывается на подложку, находящуюся на столе пресса. На выбранное для аппликации место кладут заготовку из ПВХ-пленки. Электрод-штамп, воспроизводящий аппликацию с одновременной обрезкой, устанавливают на заготовку ПВХ-пленки. После приложения необходимого давления на электрод смыканием плит пресса включают высокочастотное напряжение. Пленка разогревается и вдавливаются в ткань. Через заданный промежуток времени высокочастотное напряжение отключают, плиты пресса разводят и вынимают изготовленную аппликацию. Заключительной операцией является отделение отрезанных кусков пленки.

**Материал для нанесения аппликаций.** Для выполнения аппликаций рекомендуется использовать ПВХ-пленку без рисунка либо с плоской рельефной поверхностью. При выборе пленки, имеющей глубокую рельефную поверхность, необходимо предварительное тиснение. В качестве материала для нанесения аппликаций может применяться пластифицированная ПВХ-пленка, предназначенная для галантерейных изделий.

Лучшим материалом для изготовления аппликаций является специальная пластифицированная ПВХ-пленка для нарукавных знаков, выпускаемая Калининским комбинатом «ИСКОЖ» по ТУ 17-283—68. Эта пленка более эластичная, имеет повышенную морозостойкость. Недостатком является то, что пленка выпускается только трех цветов, что безусловно, ограничивает ее применение для изготовления аппликаций в качестве отделочного элемента.

Применение дублированных пленок нежелательно, так как при расплавлении пигментированный слой может паруситься, пленка станет недостаточно укрывистой и будет просвечивать подложный слой.

Опыт показал, что хорошие результаты получаются при использовании пленки толщиной 0,35—0,55 мм. При более тонкой пленке количество пленочного материала оказывается недостаточным для оформления рисунка, так как часть пленки всегда расходуется на пропитку ткани. При толщине пленки более 0,55 мм аппликация получается тяжелой, грубой, особенно на тонкой ткани.

**Требования к рисункам аппликаций.** Аппликация может быть выполнена на отдельной заготовке в виде эмблемы, а затем пришита к одежде. Можно нанести аппликацию непосредственно на выкроенные детали одежды: рукава, карманы и т. п.

При этом возможны следующие варианты аппликации: на ткань наносится рисунок из ПВХ-пленки: ПВХ-пленка является фоном, на котором проявляется рисунок из ткани; фон и рисунок аппликации выполнены из ПВХ-пленки, причем рисунок изготовлен либо тиснением, либо нанесением пленки другого цвета. Возможно также любое сочетание из трех описанных вариантов.

При рассмотрении особых требований к рисункам эмблем необходимо отметить, что если каждый элемент рисунка при изготовлении аппликаций обрезается отдельно, то это приводит к большим затратам времени. Поэтому рекомендуется, где это возможно, не делать закрытых элементов рисунка и т. п. [1].

Соответственно, при открытом шрифте электрод можно выполнить с неразделенной обрезной частью. Это позволяет отделять отрезанные куски пленки одной непрерывной лентой. Кроме того, имеет значение также минимальная ширина промежутков (перемычкообразной части). Ширина перемычки не должна быть меньше ее двойной толщины.

При создании рисунка желательно, чтобы последний был сосредоточенным и не имел острых углов (меньше 60°), удаленных от центра рисунка более чем на 30 мм.

С другой стороны, большая сплошная площадь аппликации (больше 100 см<sup>2</sup>) приводит к потере ее эластичности. Желательно рисунку придать большую ажурность, что значительно украсит его.

Необходимо предусматривать в рисунке эмблемы гравировку поверхностей, имеющих ширину линий свыше 4—5 мм. Это также значительно украшает аппликацию. Рисунок гравировки может содержать декоративную штриховку, надписи и т. п. Можно делать многоцветную аппликацию в одной или нескольких плоскостях. В первом случае требуется точный раскрой пленки. Во втором случае для одновременного изготовления аппликации требуется электрод с гравировкой, сделанной на разной высоте, точно соответствующей толщине материала. Последний вариант является значительно более сложным, так как толщина пленки обычно не постоянна.

При выполнении многоцветной однослойной аппликации необходимо также учитывать, что создание линий разного цвета нежелательно. Ширина промежутка между линиями разного цвета должна быть не меньше 2—3 мм. Особенность данной аппликации заключается еще и в том, что она является объемной, а не плоской, как при печатании рисунка красками. Художник, создающий эмблему, должен представить технику дальнейшего выполнения аппликации и ее внешний вид в готовом исполнении.

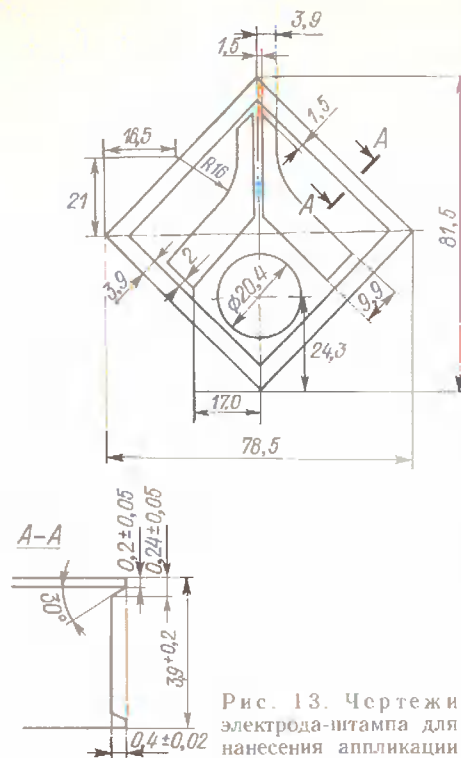


Рис. 13. Чертежи электрода-штампа для нанесения аппликаций

**Особенности конструкции электрода-штампа для нанесения аппликаций.** Нанесение аппликаций производится с помощью электродов-штампов, правильное изготовление которых имеет решающее значение для качественного изготовления аппликации.

При изготовлении электродов-штампов необходимо выполнять следующие требования:

электрод-штамп должен быть выполнен из твердых сортов латуни ЛС-59; заготовка электрода должна быть вырезана по контуру рисунка и обработана по плоскости сварки шлифовкой; отклонения от параллельности плоскостей сварки не должны быть больше 0,02 мм;

глубина расположения нерабочих плоскостей электрода-штампа по отношению к плоскости сварки должна быть не менее 5 мм;

высота обрезной кромки по отношению к сварочной плоскости должна составлять 0,4 мм для толщины ПВХ-пленки 0,35—0,5 мм;

обрезная кромка должна быть обработана под углом 30—45 °С со стороны сварочной плоскости и под углом 90° со стороны обрезки;

гравировка сварочных поверхностей должна осуществляться на глубину 0,1—0,2 мм в зависимости от рисунка гравировки. Электрод для изготовления аппликации показан на рис. 13.

**Выбор подложки.** Качественная сварка и тиснение при высокочастотном способе достигаются при равномерном давлении на всей рабочей площади. При формировании больших поверхностей это условие может быть выполнено при предъявлении высоких требований к точности изготовления электродов. Еще более жесткие требования необходимо предъявлять при изготовлении электродов для нанесения аппликаций, так как в данном случае нагреву, как правило, подвергается один слой пленки. Частично компенсировать неточность изготовления электродов можно с помощью подложек, помещаемых непосредственно под ткань.

При изготовлении аппликаций небольшого размера хорошо выполненным электродом возможно использование для этих целей традиционных подложек из гетинакса и картона.

При формировании больших поверхностей для получения хорошего качества тиснения эффективно применение эластичной подложки, помещаемой непосредственно под ткань. В качестве подложки в данном случае может быть использована резиновая пластина для вакуумных уплотнительных прокладок марки 7889 (ТУ МХПУ-251—54). Максимальная температура, при которой может длительно работать данная резина, составляет 90 °С. Толщина эластичной подложки выбирается не более 1 мм. Подложка должна выдерживать при высоких температурах (порядка 100 °С) давление до 30 кПа. Электрические свойства подложки должны быть таковы, чтобы она не нагревалась в электрическом высокочастотном поле за счет диэлектрических потерь.

#### Выбор оптимальных режимов нанесения ПВХ-аппликаций.

В понятие оптимальный режим сварки при изготовлении аппликаций входят следующие физические величины: величина удельного давления; значение температуры электрода; значение напряженности электрического поля в материале, т. е. величина удельной мощности в рабочем конденсаторе.

Оптимальная величина давления при изготовлении аппликаций лежит обычно в пределах 10—30 кПа. Если давление менее 10 кПа, ухудшается качество пропитки. При давлении, большем 30 кПа, нарушается целостность ткани, а при использовании резиновой подложки происходит «вытягивание» свободной от рисунка ткани внутрь эмблемы. Повышенное (по сравнению с процессом высокочастотной сварки) удельное давление при изготовлении аппликаций на ткани объясняется необходимостью ускорить течение расплавленного ПВХ в ткань.

Особенностью технологии изготовления аппликации высокочастотным способом как на ПВХ-пленке, так и на ткани является необходимость подогрева электрода-штампа для получения четкой обрезной кромки и, соответственно, легкого удаления обрезков. Нагрев электрода смещает максимальную температуру в сторону верхнего слоя пленки, что и создает условия для качественной обрезки. Температура электрода при изготовлении аппликации на пленке составляет  $130 \pm 20$  °С, т. е. немного ниже температуры плавления пленки. При значениях температуры штампа выше этого предела происходит изменение окраски и разрушение граничных слоев пленки. При низких значениях температуры штампа затруднена обрезка кромки.

При оценке энергетической стороны процесса необходимо помнить, что электроды-штампы с находящимися между ними подложкой и материалом представляют собой рабочий конденсатор, являющийся элементом схемы лампового генератора сварочной установки. При этом между электродами-штампами и плитой пресса находится многослойный диэлектрик с различными элект-



рическими свойствами слоев: относительной диэлектрической проницаемостью и тангенсом угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg} \delta$ . Были исследованы электрические свойства исходных материалов (ПВХ-пленок, тканей и материала подложки) на частотах 27,0 и 40,0 МГц.

Полученные данные свидетельствуют о том, что в начале нагрева электрические параметры ПВХ-пленки незначительно отличаются от параметров полотна, но с повышением температуры разница увеличивается. В конце нагрева электрические параметры пленки в 9—10 раз превосходят соответствующие параметры полотен. Электрические параметры резины близки к параметрам хлопчатобумажных полотен. С повышением температуры до 160 °С электрические параметры выбранной резины увеличиваются в среднем на 15 %.

При производстве аппликаций применяется трехслойный рабочий конденсатор. Поэтому напряжение, подведенное к электродам рабочего конденсатора, распределяется между слоями материала следующим образом:

$$U_1 = d_1 E_1; U_2 = d_2 E_2; U_3 = d_3 E_3,$$

где  $U_1, U_2, U_3$  — напряжение в слое пленки, ткани, подложки соответственно;  $d_1, d_2, d_3$  — толщина пленки, ткани, подложки соответственно;  $E_1, E_2, E_3$  — напряженность электрического поля в пленке, ткани, подложке соответственно.

Учитывая, что напряженность электрического поля обратно пропорциональна диэлектрической проницаемости материала и зная напряжение на электродах, можно определить напряженность электрического поля в каждом слое материала:

$$E_1 = U_{p.k} \epsilon_2 \epsilon_3 / (d_1 \epsilon_2 \epsilon_3 + d_2 \epsilon_1 \epsilon_3 + d_3 \epsilon_1 \epsilon_2);$$

$$E_2 = U_{p.k} \epsilon_1 \epsilon_3 / (d_1 \epsilon_2 \epsilon_3 + d_2 \epsilon_1 \epsilon_3 + d_3 \epsilon_1 \epsilon_2);$$

$$E_3 = U_{p.k} \epsilon_1 \epsilon_2 / (d_1 \epsilon_2 \epsilon_3 + d_2 \epsilon_1 \epsilon_3 + d_3 \epsilon_1 \epsilon_2).$$

Зная напряженность электрического поля в отдельных слоях материала и их электрические параметры при заданной частоте, можно определить удельную мощность, генерируемую в каждом из слоев нагреваемого материала.

Общая удельная мощность, подведенная к рабочему конденсатору, в рассмотренном случае будет равна

$$P_{p.k} = p_1 + p_2 + p_3,$$

где  $p_1, p_2, p_3$  — удельные мощности, генерируемые соответственно в ПВХ-пленке, ткани, подложке.

Установлено, что при толщине ПВХ-пленки 0,4 мм удельная мощность, необходимая для изготовления аппликаций, составляет 40—60 Вт/см<sup>2</sup> сварного шва.

Экономические исследования показали, что величина годового экономического эффекта при использовании высокочастотной сварочной установки производительностью 100 аппликаций в час, подтвержденная на практике, составляет 35 тыс. руб.

## 17. Особенности сварки наполненных термопластов

Из класса наполненных термопластов можно особо выделить линолеумы. «Синтетический» или поливинилхлоридный (ПВХ) линолеум содержит от 20 до 80 % ПВХ, минеральные или органические наполнители, пластификаторы, стабилизаторы и другие компоненты. В СССР выпускается много товарных сортов ПВХ-линолеума, отличающихся содержанием и типом смол и наполнителя, а также своим строением. Освоены также ПВХ-линолеумы на войлочной и губчатой основах. Величины коэффициента потерь ПВХ-линолеумов зависят от состава и его свойств. Величины  $\epsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$  ПВХ-линолеума в зависимости от содержания того или иного наполнителя при частоте тока 1 МГц приведены в табл. 4.

Таблица 4. Диэлектрические свойства ПВХ-линолеумов с различным содержанием наполнителей [8]

Наполнитель	Показатели	Содержание наполнителя, %				
		10	20	30	40	50
Каолин	$\operatorname{tg} \delta$	0,08	—	0,075	0,07	0,065
	$\epsilon$	3,5	—	3,8	4	4
Тальк	$\operatorname{tg} \delta$	0,065	—	0,06	0,05	0,045
	$\epsilon$	3,4	—	3,5	4,1	4,1
Известь	$\operatorname{tg} \delta$	0,07	0,06	0,055	—	—
	$\epsilon$	3,7	3,9	4,3	—	—
Древесная мука	$\operatorname{tg} \delta$	0,07	0,075	—	0,085	—
	$\epsilon$	3,7	3,9	—	4,4	—

При увеличении содержания в линолеуме минеральных наполнителей (каолина, талька, извести)  $\operatorname{tg} \delta$  уменьшается,  $\epsilon$  — возрастает. При увеличении органического наполнителя  $\operatorname{tg} \delta$  и  $\epsilon$  увеличиваются.

Изучение  $\epsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$  линолеумов различных рецептур показало, что  $\operatorname{tg} \delta$  с увеличением частоты тока от 1 до 40 МГц в среднем уменьшается в 3,5 раза. При частоте тока 40,0 МГц для всех рецептур  $\operatorname{tg} \delta$  лежит в пределах 0,02—0,015,  $\epsilon$  — в диапазоне частот от 1 до 40 МГц изменяется незначительно и равна при этом 3—4 (рис. 14). С увеличением температуры  $\operatorname{tg} \delta$  растет, достигая максимального значения (при частоте тока 40 МГц) при температурах 140—160 °С. При частоте тока 20,0 МГц максимальное значение  $\operatorname{tg} \delta$  достигается при температуре выше 180 °С. Это свидетельствует о преобладании дипольно-релаксационной поляризации. С изменением температуры  $\epsilon$  изменяется незначительно.



Рис. 14. Зависимости диэлектрических свойств от частоты тока для различных рецептур линолеума:  $a$  — диэлектрическая проницаемость;  $b$  — тангенс угла диэлектрических потерь

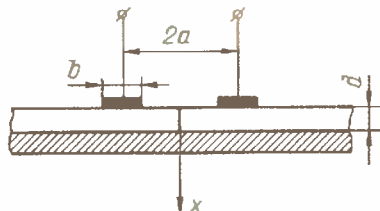
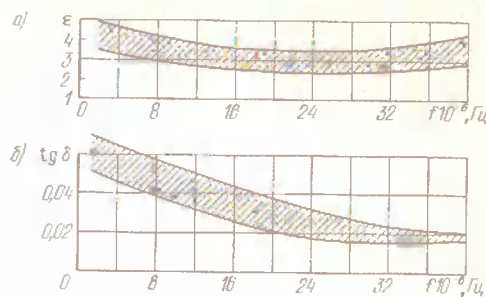


Рис. 15. Расположение электродов при сварке линолеума

Высокочастотный нагрев линолеума, например на теплоизоляционной подоснове, производится по схеме рис. 6, е, т. е. в электрическом поле рассеяния (рис. 15). При такой форме электродов даже в однородном материале создается неоднородное электрическое поле по высоте шва. Можно приближенно оценить ослабление поля вдоль оси  $x$ , заменяя ленточные электроды линейным диполем — двумя параллельными, разноименно заряженными нитями. Тогда напряженность поля в точках на оси  $x$

$$E = E_0 \frac{a^2}{a^2 + x^2}, \quad (11)$$

где  $a$  — половина расстояния между серединами электродов;  $E_0$  — напряженность поля на внешней поверхности линолеума, в точке  $x=0$ .

Пренебрегая растеканием тепла за счет теплопроводности, можно записать:

$$\frac{\omega_0}{\omega_d} = \frac{T_0 - T_{\text{пл}}}{T_d - T_{\text{пл}}} = \left( \frac{E_0}{E_d} \right)^2. \quad (12)$$

Из формул (11) при  $x=d$  и (12) находим

$$\frac{d}{a} = \sqrt{\frac{T_0 - T_{\text{пл}}}{T_d - T_{\text{пл}}} - 1}. \quad (13)$$

Если  $d=2$  мм — толщина слоя термопластичного, а допустимая температура на поверхности линолеума  $T_0=160^\circ\text{C}$ , а на глубине 2 мм —  $T_d=140^\circ\text{C}$ , то из формул (15) находим  $a=7$ . При ширине ленточного электрода  $b=2d=4$  мм расстояние между внутренними кромками электродов  $2a-b=14-4=10$  мм. Электроды этих размеров должны обеспечить теплоперепад по высоте шва около 20 К [5]. Средняя прочность сварных швов при растяжении колеблется от 2,0 до 3,0 МПа, приближаясь к прочности целого материала. Время сварки при оптимальных ре-

жимах в зависимости от марки линолеума лежит в пределах  $10-20^\circ\text{C}$ .

Практика показала, что при содержании наполнителя в линолеуме более 40 % прочность сварных швов при правильно выбранных размерах электродов рабочего конденсатора и оптимальных режимах сварки получается пониженной. Поэтому ПВХ-линолеум с высоким содержанием наполнителя (более 35 %) желательно сваривать с накладной или подкладной присадочной полоской из пластифицированного ПВХ.

## 18. Сварка непластифицированных термопластов

Из непластифицированных термопластичных материалов (с коэффициентом потерь не менее  $10^{-2}$ ) наиболее широкое применение в промышленности находят винипласты и полиамиды. Винипласт выпускается в виде листов, труб, стержней и прутка. Полиамид в основном выпускается в виде гранул различных марок П-68, П-6, П-8, П-10 и др. Методом литья из полиамидов изготавливают широкий ассортимент машиностроительных деталей. В электротехнической промышленности полиамид используют для изготовления аккумуляторных сосудов.

**Сварка полиамидных аккумуляторных сосудов.** Технологический процесс сварки деталей полиамидных аккумуляторных сосудов заключается в приварке крышки сосуда к бачку, т. е. осуществляется герметизация аккумуляторного сосуда по периметру крышки, а также вварке штуцеров в некоторые виды сосудов.

Узкий интервал температур плавления полиамидов  $[(\pm 1,5) - (\pm 4^\circ\text{C})]$  затрудняет вообще процесс их сварки и, в частности, высокочастотной. Для расширения интервала температур плавления на поверхности, подлежащие сварке, наносят трикрезол. Размягчающая поверхность как пластификатор, трикрезол снижает начальную температуру плавления, чем расширяет интервал температур плавления. Это несколько снижает жесткость технологических требований. Кроме того, введение трикрезола в зону сварного шва повышает частично его эластичность. Оптимальные режимы сварки полиамидов и результаты испытаний плоских образцов приведены в табл. 5. Во всех случаях испытаний на растяжение (ГОСТ 16310—80) разрушение происходило по целому материалу.

Герметизация аккумуляторных сосудов высокочастотной сваркой успешно применяется в промышленности на ряде аккумуляторных заводов. Для широкого внедрения этого технологического процесса разработана и серийно выпускается высокочастотная установка типа ВЧД6-4/27, с колебательной мощностью 4,0 кВт, частотой тока 27,12 МГц. Особенностью данной установки является возможность сварки на ней как плоских, так и объемных изделий, так как расстояние между плитами рабочего конденсатора регулируется в пределах от 20 до 250 мм. Высокочастотный метод сварки повышает производительность труда, уменьшает



Рис. 16. Общий вид трехъячейной технологической оснастки для герметизации аккумуляторных сосудов

брак, снижает расход дорогостоящих материалов, улучшает условия труда.

Особое внимание при разработке технологии сварки — герметизации аккумуляторных сосудов — следует обращать на разработку и изготовление технологической оснастки, включающей и электроды рабочего конденсатора<sup>1</sup>.

Технологическая оснастка должна обеспечить точную установку аккумуляторного бачка и крышки относительно электродов рабочего конденсатора. Схема расположения электродов в данном технологическом процессе выбрана в соответствии с рис. 6, ж.

На рис. 16 показана трехъячейная технологическая оснастка для одновременной герметизации трех сосудов. Технологический процесс сварки включает следующие операции: установка аккумуляторных бачков в сборе с крышкой (трикрезол в зоне сварки уже нанесен) в гнезда нижнего, высокопотенциального электрода; установка в рабочее положение отодвигающейся верхней части оснастки с электродом; наложение изоляционной рамки на крышки так, чтобы каждая из них совпала со своим гнездом; установка верхнего электрода в гнездо рамки. После этого оснастка с аккумуляторными сосудами, укрепленная на сборочном столе пресса, перемещается вместе со столом в рабочее пространство пресса, где и происходит сварка по заданному регламенту для каждого типоразмера аккумуляторного сосуда.

Процесс сварки на установке ВЧД6-4/27 автоматизирован с момента перемещения сборочного стола в рабочее пространство пресса. Вспомогательное время с момента передвижения стола в рабочее пространство пресса и выхода его к месту сборки после

Таблица 5. Режимы сварки и результаты испытаний плоских образцов из полиамидов

Марка смолы	Напряженность электрического поля в материале, В/ч. 10 <sup>5</sup>	Минимальное время сварки, с	Давление, МПа	Прочность при разрыве, МПа
П-68	6,0	11	2,0	59,0
П-6	5,0	13	2,0	59,0
П-8	6,5	10	1,5	51,0
П-10	6,5	11	1,5	65,0
Рилсан	6,5	14	1,5	45,5

осуществления процесса сварки — 10—12 с, что составляет в общем цикле процесса сварки 7—10 %.

**Сварка изделий из винипласта.** Винипласт — продукт термической пластификации поливинилхлорида — представляет собой жесткий термопластичный материал, в состав которого кроме поливинилхлорида входят стабилизаторы, модификаторы, пластифицирующие агенты (например, стират кальция). Винипласт по своим реологическим свойствам относится ко второй группе термопластов, т. е. трудносвариваемых материалов, течение которых в процессе нагрева без термодеструкции практически невозможно. Традиционные методы сварки этих материалов основаны на расплаве тонких слоев соединяемых поверхностей без проплавления материала по толщине.

Обладая высокими антикоррозионными и электроизоляционными свойствами, малым удельным весом, высокой (для пластмасс) механической прочностью в сочетании с эластичностью, а также способностью легко поддаваться различным видам механической обработки, винипласт, являясь конструкционным материалом, широко используется в химической и электротехнической промышленности, машиностроении, сельском хозяйстве и других отраслях техники.

Традиционные методы сварки винипласта: нагретым газом с присадочным прутом, экструзией для промышленного выпуска изделий большими сериями неприемлемы из-за низкой производительности и неустойчивости прочностных показателей сварного соединения (ГОСТ 16310—80).

Имея коэффициент потерь  $\epsilon \times \operatorname{tg} \delta > 10^{-2}$ , винипласт хорошо нагревается при помещении его в высокочастотное электрическое поле (рис. 17). При изготовлении изделий из листового винипласта при нагреве в основном поле может быть применен прессовый способ высокочастотной сварки. Разработка технологических процессов сварки изделий из листового винипласта требует особого внимания. Это диктуется противоречивыми исходными условиями:

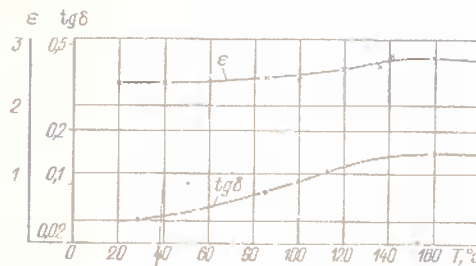


Рис. 17. Зависимость  $\epsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$  винипласта от температуры при частоте 27,12 МГц

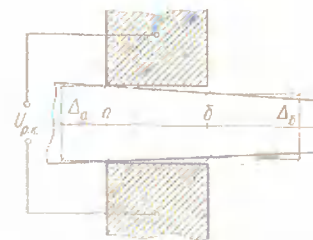


Рис. 18. Расположение разнотолщинного винипласта марки ВНЭ в рабочем конденсаторе между строго параллельными электродами

<sup>1</sup> А. с. 628552, 828271, 1224167 (СССР).



температура, при которой винипласт достигает вязкотекучего состояния, лежит в пределах 180—130 °С, а температура разложения поливинилхлорида — 193 °С, т. е. малый температурный интервал переработки;

выпускаемый промышленностью листовой винипласт имеет разнотолщинность ( $\pm 0,1 + 0,05 \times \text{толщину листа}$ ) (ГОСТ 9639—71), что не позволяет получить в зоне нагрева идентичные значения напряженности электрического поля в материале, а следовательно, и одинаковые температуры (рис. 18). Из-за разнотолщинности винипласта в плоскостях, проходящих через точки *a* и *b*, в точках *a* и *b* будут создаваться различные напряженности электрического поля. Если в точке *a* она может быть определена из формулы  $E_a = U_{p.k} / \Delta a$ , где  $U_{p.k}$  — напряжение на электродах рабочего конденсатора;  $\Delta a$  — толщина двух свариваемых листов винипласта в плоскости точки *a*, то в точке *b*, из-за наличия воздушного зазора в начале нагрева  $\Delta_{п.з} = \Delta a - \Delta b$  напряженность электрического поля должна быть определена из формулы

$$E_b = \frac{U_{p.k}}{\Delta b + \epsilon_M (\Delta a - \Delta b)}.$$

При толщине свариваемых винипластовых листов, например, 2 мм, допустимой разнотолщинности (в плоскости *a* по максимуму, в плоскости *b* по минимуму) и средней относительной диэлектрической проницаемости винипласта примерно 2,8 напряженность электрического поля в точке *b* будет составлять 0,75 от напряженности поля в точке *a*. Генерируемая энергия в винипласте под воздействием электрического поля будет прямо пропорциональна  $E_m^2$ . Следовательно,  $\omega_b \approx 0,57 \omega_a$  или  $\Delta T_b \approx 0,57 \Delta T_a$ . Соотношение температур в процессе нагрева будет выравниваться.

При небольших размерах изделий (небольшой длине сварного шва), изготавливаемых из прессованного винипласта толщиной до 2 мм, высокочастотная сварка может быть осуществлена двухпозиционным прессовым методом. Вначале высокочастотный нагрев осуществляется до температур высокоэластического состояния винипласта (лучше до нижнего его предела 80—90 °С), затем прикладывается давление для выравнивания толщины материала между электродами рабочего конденсатора. Выдерживают материал под давлением в течение 30—40 с для выравнивания температуры в сварном шве. Затем включают высокочастотный нагрев и доводят температуру сварки до температуры вязкотекучего состояния  $T_v$ , выключают нагрев и выдерживают образец под давлением, пока температура материала не снизится до 50—60 °С (ниже температуры стеклования  $T_g$ ). Описанный метод может быть применен, когда требуется не большая производительность процесса, а высокие физико-механические показатели сварного соединения. Таким методом были изготовлены сосуды и трубы из прессованного винипласта. Испытания показали, что

разрушение сосудов происходило при давлении 700 кПа по целому материалу, шов оставался без изменения.

При изготовлении труб из листового винипласта рекомендуется нахлесточное соединение с расположением электродов как на рис. 6, а.

При сварке сосудов, работающих при больших давлениях, предпочтительнее стыковое соединение с наложением сверху винипластовой накладки. Расположение электродов соответствует в данном случае рис. 6, д.

Примером изделий из винипласта марки ВНЭ (экструзионного) с одновременной длиной сварного шва до 3,5 м и толщиной материала от 2 до 5 мм могут быть напольные нагревательные панели установок комбинированного обогрева молодняка животных типа «Комби» и «Руно». Напольное нагревательное устройство, являясь основным узлом установок, представляет собой нихромовый нагреватель, намотанный на стеклотекстолитовый лист и помещенный в двойную изоляцию в виде коробов. Короба изготавливаются из винипласта марки ВНЭ толщиной 2—5 мм методом горячего формования и после помещения в них нагревателя герметично завариваются по периметру.

Высокочастотная сварка этих изделий была произведена с использованием прокладки из пластифицированного ПВХ, размещаемой между свариваемыми поверхностями винипласта. Толщина прокладки зависит от суммарной толщины слоев свариваемого винипласта. Поскольку прокладка имеет  $\text{tg } \delta$  больший, чем у винипласта (см. рис. 17), то и скорость нагрева ее больше (в начале сварки в 4 раза, в конце — в 2, 3 раза). Более активное генерирование энергии в прокладке активизирует прилегающие к ней зоны винипласта, которые начинают активнее нагреваться за счет увеличения в этих зонах  $\text{tg } \delta$  по сравнению с  $\text{tg } \delta$  остального объема винипласта. Кроме того, диффузия пластификатора в процессе нагрева от пластифицированной прокладки в прилегающие к ней зоны винипласта расширяет температурный интервал вязкотекучего состояния винипласта снижением нижнего его предела, что делает процесс сварки более управляемым. При этом формируется сварной шов из винипласта и пластифицированного ПВХ (рис. 19). Такой шов имеет предел текучести, близкий к прочности целого винипласта, отличается стабильностью по периметру и эластичностью.

Проверка герметичности сварного соединения производилась методом опрессовки сжатым воздухом внутренних поверхностей коробов. Разрушение наступало при давлении не менее 70 кПа по целому материалу (рис. 20).

В результате исследований разработаны технологический процесс, оборудование и технологическая оснастка для сварки напольных нагревательных панелей из винипласта. В табл. 6 даны технологические параметры для осуществления процесса сварки винипластовых коробов.





Рис. 19. Вид сварного шва из винипласта ВНЭ с прокладкой из пластифицированного ПВХ после испытаний. (Видно проникновение винипласта через прокладку)

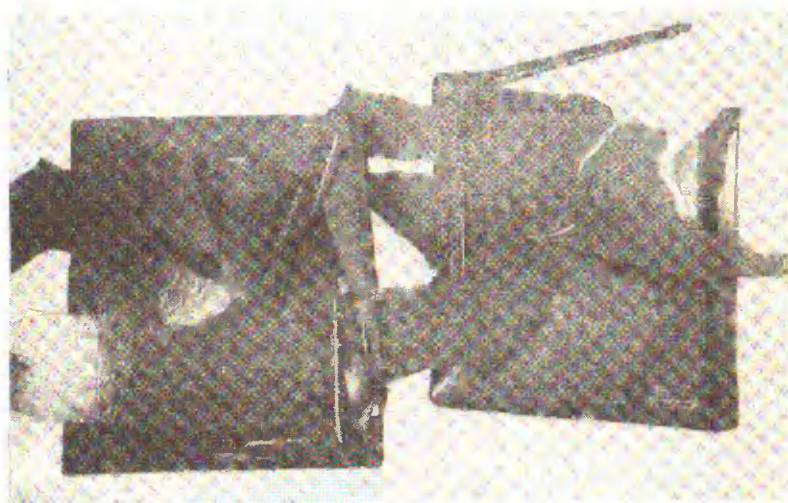


Рис. 20. Образцы коробов после испытаний на герметичность опрессовкой внутренних поверхностей сжатым воздухом

Таблица 6. Основные технологические параметры процесса сварки коробов при удельной мощности 20 Вт/см<sup>2</sup>, частоте тока 27,12 МГц, времени нагрева 50 и выдержке 70 с

Параметры	Толщина пакета винипласта, мм		
	2+2	3+3	4+4
Ширина сварного шва не менее, мм	6	10	10
Ширина прокладки не менее, мм	5	9	9
Толщина прокладки, мм	1,7 ± 0,1	2,4 ± 0,2	2,4 ± 0,2
Конечная толщина сварного шва, мм	4,0—4,4	6—6,5	7,3—8,0
Давление при сварке и выдержке не менее, МПа	1,5	1,5	2,0

Широкое распространение в промышленности находят трубопроводы из полимерных материалов, в том числе из литых винипластовых труб, имеющих различные диаметр и толщину стенок, длиной порядка 3 м. Для создания трубопроводов длиной более трех метров необходимо трубы сваривать встык. В промышленности применяется контактно-тепловая сварка. Нагрев соединяемых поверхностей происходит за счет контакта с нагревательным

(сварочным) инструментом. После удаления из зоны контакта нагревательного инструмента подается давление для смятия нагретых поверхностей и выдержки под давлением в процессе остывания шва до заданной температуры в зависимости от свариваемого материала [10].

Этот процесс наиболее приемлем при сварке труб из термопластов, относящихся к первой группе по свариваемости. Сварка винипластовых труб таким методом вызывает трудности, связанные с малым интервалом между температурой вязкотекучего состояния и разложения. Наиболее распространенными методами сварки в Советском Союзе являются сварка нагретым газом с присадочным прутком и экструзионная со всеми их отрицательными качествами. Большое внимание высокочастотной сварке винипластовых труб встык уделяется за рубежом. В Советском Союзе 30 лет тому назад разработаны теоретические основы сварки винипластовых труб встык, однако в промышленность до настоящего времени этот метод не внедрен.

Одним из важнейших вопросов, возникающих при сварке труб встык, является выбор конфигурации электродов, поскольку большая длина свариваемых труб позволяет расположить их только с наружной стороны. Электроды в этом случае представляют собой две пары полуколец, выполненных из немагнитных проводниковых материалов. Фиксация электродов относительно друг друга осуществляется закреплением их в изоляционном материале. В местах между разнопотенциальными кольцами, где имеется интенсивное электрическое поле, в качестве изоляции применяется микалекс<sup>1</sup>. Сварка труб встык производится по схеме, приведенной на рис. 6, 2, т. е. в электрическом поле рассеяния, как и линолеума. Геометрические размеры электродов для сварки винипластовых труб встык аналогичны размерам электродов, применяемых при сварке линолеума, так как диаметр трубы значительно превышает толщину ее стенки, и можно считать, что электрическое поле в стенке трубы практически аксиальное.

В связи с тем, что по техническим требованиям к трубопроводам внутреннего назначения трубы не должны иметь ни выступов, ни шероховатостей, внутри трубы вставляется разъемный вкладыш, выполненный из диэлектрического материала, обладающего малым коэффициентом потерь. При постоянных толщинах стенок трубы и расстоянии между электродами изменение диаметра трубы не меняет соотношения напряженности электрического поля на внутренней и наружной поверхностях трубы. Увеличение толщины стенки трубы для сохранения соотношения напряженностей электрического поля влечет за собой увеличение расстояния между электродами. Прочностные показатели стыковых сварных соединений труб близки к показателям целого материала (85—100 %), а именно: предел текучести при растяжении 5200—5500 Н; удель-

<sup>1</sup> А. с. 136492 (СССР).

ная ударная вязкость 8200—10900 кП. Сварка горячим газом с присадочным прутком позволяет получить предел текучести при растяжении 890—1040 Н, удельную ударную вязкость 1400—1800 кП.

Исследования, проведенные во ВНИИТВЧ им. В. П. Вологодина, показали, что сварка изделий из винипласта в каждом конкретном случае должна решаться индивидуально и представлять самостоятельную область исследований.

## V. КОНСТРУИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СВАРОЧНЫХ УСТАНОВОК

### 19. Элементы высокочастотных сварочных установок

Необходимыми элементами высокочастотных установок для сварки термопластичных материалов являются: высокочастотные ламповые генераторы — источники высокочастотной электромагнитной энергии, подводимой к сварочным электродам; технологические устройства, предназначенные для осуществления необходимых технологических операций и приемов, обеспечивающих образование сварного соединения заданной формы и в заданном месте преобразования в зоне сварного шва электрической энергии в тепловую, приложения необходимых давлений, охлаждения и фиксации формы сварного шва.

В состав технологических устройств могут входить различные элементы, обеспечивающие механизацию и автоматизацию процесса; фидерные устройства, предназначенные для передачи высокочастотной энергии от лампового генератора к сварочному устройству; согласующие устройства, предназначенные для согласования выходных параметров лампового генератора с электрическими параметрами рабочего конденсатора, изменяющимися в общем случае при переходе на сварку нового изделия; устройства, подающие материал или детали в зону сборки; устройства дозирования и контроля качества сварки.

### 20. Источники питания

В результате многолетнего и систематического развития электротермических установок с электронными генераторами в нашей стране к настоящему времени накопился большой практический опыт их проектирования, производства и эксплуатации при осуществлении многих электротермических процессов [6].

При создании и эксплуатации высокочастотных сварочных установок в Советском Союзе надлежит руководствоваться следующими директивными документами:

ГОСТ 21139—82 «Генераторы ламповые высокочастотные для электротермических установок. Общие технические условия»;

ГОСТ 12.1.006—84 «Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности»;

ГОСТ 12.4.154—85 «Устройства экранирующие для защиты от электрических полей промышленной частоты»;

ГОСТ 15150—69 в части воздействия климатических факторов внешней среды (исполнение У и ХЛ, категория размещения 4) и в части коррозионной активности атмосферы (группа условий эксплуатации металлических изделий Л);

ГОСТ 16962—72 в части прочности и воздействия ударных нагрузок от степени жесткости;

«Правилами устройств электроустановок» (ПУЭ), 1966 г.; «Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей и правилами техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей», 1971 г.

Несмотря на большое разнообразие высокочастотных установок с ламповыми генераторами для сварки пластмасс, отличающимися принципиальными электрическими схемами, колебательными мощностями, примененной аппаратурой, конструктивными формами, их можно охарактеризовать общей блок-схемой (рис. 21).

Основным блоком высокочастотной сварочной установки является генераторный блок III с анодоразъединительными сеточными цепями. Блоки питания I и II включают источники питания анодных, сеточных цепей и цепей накала.

Основным элементом блока нагрузки V является рабочий конденсатор — электроды со свариваемыми материалами между ними, установленными в прессы.

Блок VI содержит всю аппаратуру подключения установки к сети со всеми элементами защиты от возникновения аварийных режимов и необходимыми блокировками. В последнее время этот блок претерпел усложнение из-за введения тиристорных регуляторов напряжения, подводимого к анодному трансформатору, которые также стабилизируют его в пределах от  $\pm 0,5$  до  $\pm 1,0$  % при колебаниях напряжения сети до  $\pm 15$  % от номинальной величины.

Для получения от лампового генератора в нагрузке максимальной мощности при высоком КПД необходимо наличие вполне определенного для каждого генератора сопротивления контура ( $R_3$ ). При более низком в сравнении с оптимальным значением этой величины уменьшается напряжение на нагрузке и увеличи-

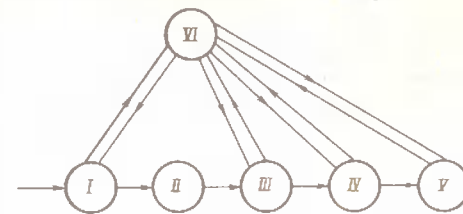


Рис. 21. Блок-схема лампового генератора



вается мощность рассеяния на аноде. При более высоком сопротивлении падает полезная мощность. Согласование параметров контура с параметрами лампы заключается в том, чтобы привести напряжение на рабочем элементе контура — нагрузке — к напряжению на генераторе — переменному анодному напряжению. Эту задачу и выполняет согласующее устройство IV. Согласующее устройство должно быть достаточно гибким и реагировать на возможные изменения нагрузки.

Ламповые генераторы, питающие высокочастотные сварочные установки, созданные в настоящее время, работают исключительно на частоте  $27,12 \pm 0,2712$  МГц.

К электрическим схемам автогенераторов, предназначенных для сварки термопластичных материалов, предъявляются те же основные требования, что и к генераторам для нагрева диэлектриков по другим технологиям: обеспечение требуемого напряжения на рабочем конденсаторе в нужном диапазоне емкостей и заданной стабильности частоты автоколебаний [1].

Особенностью всех схем этого типа ламповых генераторов является то, что в их схеме обратная связь осуществляется за счет межэлектродной емкости «сетка-катод» (схема с общим анодом).

Принципиальная и эквивалентная схемы обратной связи с общим анодом приведены соответственно на рис. 22, а и б.

В эквивалентной схеме не учитывается цепь постоянного тока. Лампа заменена емкостями  $C_{g-k}$  (входная — сетка — катод),  $C_{a-g}$  (проходная — сетка — анод) и  $C_{a-k}$  (входная — анод — катод). Из приведенных схем видно, что напряжение обратной связи создается за счет падения напряжения на сопротивлении  $X_{g-k}$ .

В данной схеме  $X_{g-k} = -1/(C_{g-k}\omega)$ . Величина тока, который проходит через цепь обратной связи, обусловлена величиной сопротивления  $X_{a-k}$ . В нашем случае при расчете  $X_{a-k}$  можно пренебречь емкостью  $C_{g-k}$ , так как в этой схеме она в несколько десятков раз больше емкости  $C_{a-g}$ . При этом

$$X_{a-k} = \omega L_0 (1 - L_0 C_{a-g} \omega^2)^{-1} - (C_{g-k} \omega)^{-1}.$$

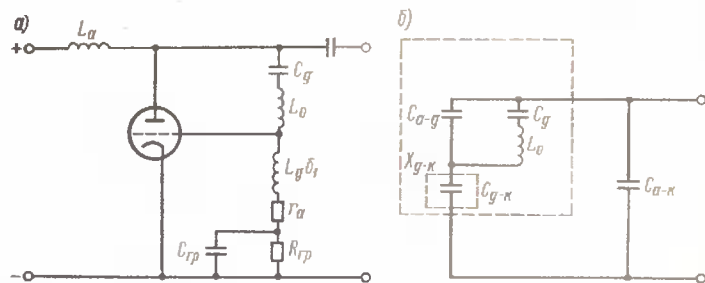


Рис. 22. Схемы обратной связи с общим анодом: а — принципиальная; б — эквивалентная

Для выполнения условия возбуждения напряжение на участке сетка — катод ( $X_{g-k}$ ) должно быть в противофазе с напряжением на участке анод — катод ( $X_{a-k}$ ), т. е. коэффициент обратной связи должен быть положительным

$$k_o = -X_{g-k}/X_{a-k}.$$

Подставляя значения  $X_{g-k}$  и  $X_{a-k}$ , получим

$$k_o = (1 - L_0 C_{a-g} \omega^2) / [L_0 (C_{g-k} + C_{a-g}) \omega^2 - 1]. \quad (14)$$

Из формулы (14) можно определить максимальную и минимальную частоты, которые могут генерироваться при такой обратной связи.

Для этого рассмотрим зависимость  $k_o$  от частоты (рис. 23).

Видно, что  $k_o > 0$  только в ограниченном диапазоне  $f_0 - f_a$ . Следовательно, максимальная частота, которая может генерироваться при такой обратной связи, равна

$$f_a = (2\pi)^{-1} \sqrt{1/(L_0 C_{a-g})}.$$

Эта частота совпадает с собственной частотой анодно-сеточного контура.

Минимально возможная генерируемая частота будет

$$f_0 = (2\pi)^{-1} \sqrt{1/[L_0 (C_{g-k} + C_{a-g})]}.$$

Из формулы (14) также следует, что для получения требуемого коэффициента обратной связи  $k_o$  необходимо, чтобы

$$L_0 = (1 + k_o) \{4\pi^2 f^2 [(1 + k_o) C_{a-g} + k_o C_{g-k}]\}^{-1}.$$

Эта индуктивность конструктивно оформляется либо в виде цилиндрической катушки, либо в виде двухпроводной линии.

Приведенные рассуждения позволяют сделать следующие выводы по схеме обратной связи с общим анодом.

1. Коэффициент обратной связи  $k_o$  в диапазоне возможных генерируемых частот  $f_0 - f_a$  падает с ростом частоты. Это является преимуществом схемы лампового генератора, питающего сварочные установки. Преимущество это сказывается в следующем: при нагреве пластмасс с увеличением температуры возрастают тангенс угла потерь и диэлектрическая проницаемость. В результате растет нагрузка на ламповый генера-

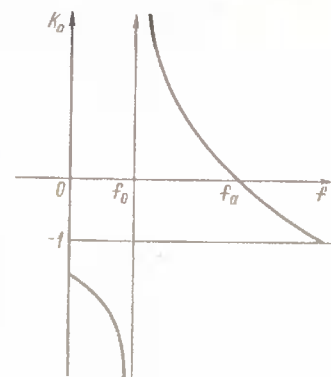


Рис. 23. Зависимость коэффициента обратной связи  $k_o$  от частоты тока

тор, и одновременно несколько понижается частота. Рост нагрузки вызывает уменьшение коэффициента использования анодного напряжения, что приводит к уменьшению напряжений обратной связи, т. е. ухудшает режим работы генераторной лампы. В схеме с общим анодом удастся в значительной мере стабилизировать напряжение обратной связи в связи с понижением частоты. То обстоятельство, что коэффициент обратной связи с ростом падает, делает эту схему более устойчивой к затягиванию в сторону более высоких резонансных частот.

2. Напряжение обратной связи оказывается точно в противофазе с переменным напряжением анод — катод, т. е. вся колебательная система для генераторной лампы является чисто активным сопротивлением.

3. Так как  $X_{g-k} = 1/(C_{g-k}\omega) < 0$ , то из условия, что коэффициент обратной связи должен быть положительным, вытекает, что  $X_{a-k} > 0$ , т. е. вся цепь обратной связи имеет индуктивную реакцию. Следовательно, резонанс всей колебательной системы, возможен, если вся внешняя часть колебательной системы, включенная между анодом и катодом лампы, носит емкостный характер.

4. Как показывает практика, схема с общим анодом из разрешенных к использованию в промышленности частот дает хорошие результаты на частотах  $27,12 \text{ МГц} \pm 1\%$ ;  $40,68 \text{ МГц} \pm 1\%$ ;  $81,36 \text{ МГц} \pm 1\%$ .

Рассмотренные принципы положены в основу разработанных схем ламповых генераторов для сварочных установок.

Генераторы снабжены системой мгновенного отключения анодного напряжения для защиты электродов при электрическом пробое в рабочем конденсаторе.

## 21. Технологические устройства

Главными функциями технологического устройства, осуществляющего сварочный процесс, являются разогрев термопластов до заданной температуры вдоль линии сварного соединения и прижим свариваемых материалов в разогретых зонах друг к другу с заданной силой.

В простейшем случае эти функции выполняются с помощью двух сближающихся металлических электродов, между которыми помещаются свариваемые пленки. Сварочные поверхности электродов с диэлектрическим материалом между ними образуют рабочий конденсатор технологического устройства, между обкладками которого пульсирует электрическая энергия, которая преобразуется в диэлектрике в тепловую.

Техника высокочастотной сварки развивается в направлении совершенствования прессовых технологических устройств. В настоящее время практически все изготавливаемые высокочастотным методом сварные изделия получают с помощью высокочастотных прессов.

В общих чертах конструкция высокочастотного пресса определяется необходимостью осуществления двух указанных выше основных технологических функций. В соответствии с этим друг над другом устанавливаются два электрододержателя, один из которых выполняется подвижным и снабжается силовым приводом заданной мощности, а другой в процессе сварки остается неподвижным (рис. 24).<sup>1</sup>

При сварке термопластов обычно применяют несимметричные схемы высокочастотных генераторов; один из выводов, подключаемых к прессу, имеет потенциал земли, равный нулю. Высокопотенциальный вывод генератора подключается к одному из электрододержателей, который, следовательно, должен быть изолирован от связанных с землей элементов конструкции.

В сварочных установках общего назначения электрододержатели выполняются в виде расположенных друг над другом плоских плит, называемых рабочими плитами пресса. Такая конструкция обеспечивает универсальность сварочного устройства, т. е. возможность закрепления различных электродов и приспособлений, обеспечивающих сварку различного вида изделий.

Рабочие плиты пресса в своей совокупности образуют электрический конденсатор, который оказывается подключенным к генератору параллельно с рабочим конденсатором сварочного устройства. Емкость последнего должна быть значительно больше паразитной емкости рабочих плит. Удовлетворительное соотношение получается, если расстояние между рабочими плитами в момент сварки сохранять не менее 20—40 мм, принимая большие значения для плит большего размера.

Размеры рабочих плит, мощность высокочастотного генератора и рабочее усилие пресса являются, очевидно, взаимосвязанными величинами. Рекомендуемое соответствие между ними отражено в табл. 1<sup>2</sup>.

Подвижной (силовой) может выполняться любая из двух рабочих плит. Какая именно, зависит от конкретных требований к конструкции установки, особенностей загрузочных устройств и элементов экранирования и т. п. При ручной загрузке заготовок

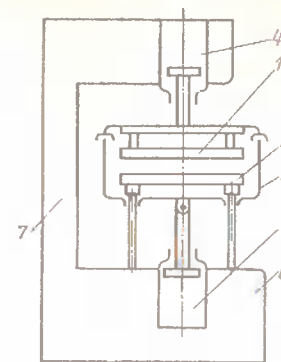


Рис. 24. Конструктивная схема высокочастотного сварочного пресса:

1 — привод рабочей плиты; 2 — высокопотенциальная рабочая плита; 3 — экран подвижной рабочей плиты; 4 — низкопотенциальная рабочая плита; 5 — приводная часть разъемного экрана; 6 — привод экрана; 7 — станина пресса

<sup>1</sup> А. с. 897547 (СССР).

<sup>2</sup> Здесь же приведены соответствующие разработки ВНИИТВЧ.



на нижнюю плиту пресса без применения загрузочных устройств целесообразно выполнять ее неподвижной.

По конструкции станины различают консольное и порталное исполнения высокочастотных прессов. Консольное исполнение облегчает доступ в рабочее пространство пресса, порталное — позволяет сравнительно просто получить заданную жесткость силовой системы сварочного устройства.

Для более полного использования источника высокочастотной энергии технологические устройства сварочных установок снабжаются многопозиционными загрузочными устройствами. При этом удастся совмещать во времени сборку заготовок и технологической оснастки с операцией сварки. Наличие экранирующих устройств, ухудшающих доступ в рабочее пространство пресса, заставляет применять загрузочные устройства вне зависимости от желания увеличить производительность пресса.

Применяемые в технике высокочастотной сварки загрузочные устройства в общем виде представляют собой загрузочные столы, подаваемые тем или иным способом из загрузочных позиций в позицию сварки и обратно. Размеры загрузочных столов соответствуют размерам рабочих плит пресса. По способу подачи столов различают загрузочные устройства с выдвижными загрузочными столами, когда столам придается возвратно-поступательные перемещения, загрузочные устройства с поворотными платформами (карусельные), когда загрузочным столам придается вращательное движение, и конвейерные загрузочные устройства с поступательным движением загрузочных столов. Карусельные и конвейерные загрузочные устройства осуществляют движение загрузочных столов сквозь рабочее пространство пресса в одном направлении. Возможное количество загрузочных позиций сварочной установки зависит от типа загрузочного устройства и конструктивного исполнения высокочастотного пресса. Консольный пресс допускает применение любых из перечисленных выше загрузочных устройств. Портальный пресс в четырехколонном исполнении может быть снабжен четырьмя выдвижными загрузочными столами, но не может работать с поворотной платформой.

Для сварки относительно несложных изделий все более широкое распространение получают установки, снабженные устройствами для подачи материала в рабочее пространство пресса из одного или нескольких рулонов.

На рис. 25 в качестве примера возможного конструктивного исполнения приведена конструкция четырехколонного пресса с двумя выдвижными загрузочными столами.

Верхняя рабочая плита 1 пресса установлена на четырех колоннах 3, на которых нарезана ходовая резьба. Синхронное вращение смонтированных в плите гаек 2 обеспечивает установочные (зависящие от высоты свариваемых изделий) перемещения этой плиты. Нижняя рабочая плита 8 закреплена на штоке силового гидроцилиндра 11, обеспечивающего заданное давление на термо-

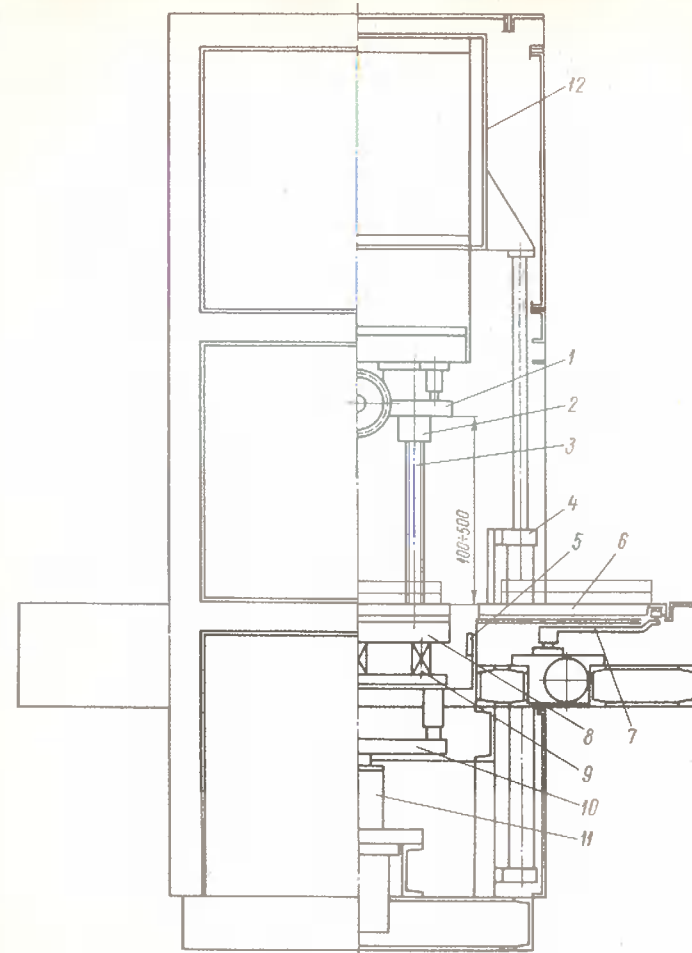


Рис. 25. Конструкция ВЧ-пресса с двумя загрузочными столами для сварки объемных изделий

пласт в зоне сварного соединения. В данной конструкции нижняя рабочая плита является высокопотенциальной, поэтому она связана с гидроцилиндром с помощью промежуточной плиты 10 через изоляторы 9, установленные равномерно по поверхности плит в количестве, зависящем от развиваемого гидроцилиндром максимального усилия. Загрузочные столы 6 выполнены в виде плоских плит, приводимых в движение с помощью поворотной кулисы [5].

Экранирование рабочего пространства пресса осуществляется с помощью разъемного экрана, одна часть 12 которого имеет независимый привод (гидроцилиндры 4), а другая 5 закреплена на промежуточной плите 10.

Загрузочный стол с собранным на нем изделием подается в рабочее пространство, включается привод нижней рабочей плиты, загрузочный стол ложится на нее и прижимается к электродам, закрепленным на верхней рабочей плите. Одновременно включается привод экрана, и после его замыкания включается высокочастотный генератор. Происходит сварка изделия, по окончании которой размыкается экран, нижняя рабочая плита с загрузочным столом и изделием опускается и включается привод перемещения загрузочного стола, который выводится из рабочего пространства прессы в позицию загрузки. В пресс вводится другой стол с изделием, собранным на нем, пока происходила сварка первого изделия, и так далее.

## 22. Согласующие устройства

В связи с тем что на высокочастотной сварочной установке, как правило, свариваются изделия, значительно отличающиеся конфигурацией сварного шва, его площадью, толщиной, электрическими, реологическими, теплофизическими свойствами свариваемых материалов, электрические параметры рабочего конденсатора будут изменяться, т. е. будут изменяться параметры нагрузки лампового генератора.

Как известно, генератор отдает номинальную полезную колебательную мощность при условии наличия соответствующей нагрузки на лампу, т. е. определенного эквивалентного сопротивления контура. Для согласования нагрузки с лампой необходимо, чтобы  $R_{0c} = R_{0з}$ .

Величины  $R_{0c}$  и  $R_{0з}$  определяются из выражений:

$$R_{0c} = U_a / I_{a1}; R_{0з} = X_{Lk}^2 / r_k; X_{Lk} = \omega_0 L_k,$$

где  $\omega_0$  — резонансная частота контура;  $U_a$  — амплитуда напряжения на контуре;  $I_{a1}$  — амплитуда первой гармоники анодного тока.

С уменьшением  $R_{0c}$  по сравнению с  $R_{0з}$  напряжение  $U_a = I_{a1} R_{0c}$  уменьшается, при этом уменьшается и развиваемая мощность  $P_1 = U_a I_{a1}$ , следовательно, большая часть мощности питания  $P_0 = E_a I_{a0}$  рассеивается на аноде.

При увеличении  $R_{0c}$  по сравнению с  $R_{0з}$  генератор переходит в перенапряженный режим. В импульсах анодного тока появляется впадина, поэтому  $U_a$  практически не увеличивается. Развиваемая мощность  $P_1$  сначала немного возрастает, а затем при резко перенапряженных режимах, когда импульс анодного тока получает глубокую впадину, начинает падать. Если  $R_{0c}$  и  $R_{0з}$  отличаются значительно, то возникает необходимость в установке согласующего устройства, которое, как правило, встраивается в высокочастотный пресс.

Наиболее просто расчет согласующих устройств производится на основе метода подобия путем использования электрических

параметров нагрузки (рабочего конденсатора и рабочих плит прессы) и лампового генератора работающей установки. Путем сравнения этих данных с параметрами проектируемого сварочного устройства вычисляются наибольшая и наименьшая емкости переменного конденсатора согласующего устройства, которые являются исходными данными для конструирования.

## 23. Устройства подвода электромагнитной энергии высокой частоты к рабочему конденсатору

Устройства подвода электромагнитной энергии к рабочему конденсатору являются составной частью электрической схемы лампового генератора, и это во многом обуславливает требования, которые к ним предъявляются.

Для сварочных установок характерна удаленность рабочего конденсатора от источника питания, даже встроенного, на сравнительно большие расстояния. При этом существенную роль играет индуктивность соединительной линии. Например, если подключение рабочего конденсатора осуществить с помощью одиночной шины, то получить частоту колебаний порядка 27 МГц и выше практически невозможно. Поэтому естественной конструкцией соединительной линии является коаксиальный токоподвод, выполняемый обычно из двух концентрично (коаксиально) помещенных одна в другую медных труб. Как известно, индуктивность такой линии тем меньше, чем ближе отношение диаметров наружной и внутренней труб к единице, что, очевидно, обеспечивается либо уменьшением промежутка между ними, либо увеличением диаметра внутренней трубы. Возможность уменьшения промежутка между наружной и внутренней трубами ограничивается электрической прочностью этого промежутка. При заданном напряжении между проводами линии (для сварочных установок — порядка 1000 В) с уменьшением расстояния между ними растет напряженность электрического поля в промежутке, которая в конце концов приводит к пробое и короткому замыканию линии. С учетом того, что между коаксиальными трубами, как правило, устанавливают фторопластовые распорные кольца, уменьшающие электрическую прочность линии, расстояние между наружной поверхностью внутренней трубы и внутренней поверхностью наружной трубы должно быть не менее 20—30 мм. Диаметр внутренней трубы для предотвращения перегрева выбирается из условия плотности тока 1 А на 1 мм периметра токопровода.

Требование обеспечения возможно меньшей индуктивности коаксиального токопровода противоречит другому предъявляемому к нему требованию — получению возможно меньшей электрической емкости линии. (Известно, что уменьшение индуктивности коаксиальной линии за счет относительного уменьшения промежутка между проводами приводит к пропорциональному увеличе-



нию ее емкости.) Последнее требование связано с тем, что с точки зрения схемы соединения элементов колебательного контура сварочного устройства электрическая емкость токоподвода складывается с переменной емкостью конденсатора, с помощью которого регулируется мощность и согласовывается нагрузка с выходными параметрами генератора. Поэтому, чем больше емкость токоподвода, тем меньше глубина регулирования.

Указанные противоречивые требования могут быть выполнены одновременно только благодаря тому, что существует параметр, одинаковым образом влияющий на обе характеристики токоподвода. Как индуктивность, так и емкость коаксиальной линии прямо пропорциональны ее длине. Следовательно, уменьшения их до заданных величин можно достигнуть путем соответствующего уменьшения длины токоподвода. Длина токоподвода к рабочему конденсатору лежит обычно в пределах 1000 мм.

В сварочных устройствах один из проводов соединительной линии имеет обычно нулевой потенциал (заземлен). Таким проводом в коаксиальном токоподводе является наружная труба, которая с помощью фланцев одним концом крепится к стенке экранирующего шкафа генератора, а другим — к экранирующему кожуху сварочного пресса. Таким образом, коаксиальный токоподвод естественным образом обеспечивает экранирование соединительной линии.

Коаксиальный токоподвод от генератора к рабочему конденсатору составляет обычно только часть соединительной линии, поскольку один из сварочных электродов должен быть подвижным. Расположенные внутри экранированного пространства пресса рабочие плиты соединяются с коаксиальным токоподводом с помощью одиночных шин, включающих в себя гибкие элементы и скользящие контактные устройства. Наружная низкопотенциальная труба токоподвода крепится обычно к неподвижной части разъемного экрана. Если подвижная рабочая плита является низкопотенциальной, то рабочий ток передается к ней по внутренним поверхностям экранирующего кожуха через контактные устройства, с помощью которых осуществляется замыкание экрана. Это вызывает процесс электроэрозии и снижает долговечность контактных устройств. Поэтому низкопотенциальную рабочую плиту целесообразно подключать непосредственно к наружной трубе коаксиального токоподвода.

В коротковолновых генераторах концентрический фидер можно представить как элемент с распределенными параметрами. При рассмотрении линии с распределенными параметрами в первую очередь ставится вопрос об эквивалентных схемах этих линий. При этом, как правило, ограничиваются случаем, когда длина линии не превышает 15 % длины волны автогенератора ( $l/\lambda \leq 0,15$ ), а также пренебрегают потерями в самой линии и в цепи нагрузки [1].

## 24. Экранирование сварочных установок

К высокочастотным сварочным установкам как к источникам электромагнитных излучений предъявляются весьма жесткие требования по соблюдению норм допускаемых промышленных радиопомех и санитарных норм и правил при работе с источниками электромагнитных полей высоких, ультравысоких и сверхвысоких частот.

Общесоюзные нормы допускаемых промышленных радиопомех регламентируют допускаемые величины напряженности поля радиопомех на различных частотах. Эти величины выражают в относительных логарифмических единицах, определяемых формулой

$$E_L = 20 \lg (E/E_0),$$

где  $E_L$  — напряженность поля радиопомех, дБ;  $E$  — абсолютная величина напряженности поля, мкВ/м;  $E_0 = 1$  мкВ/м.

Абсолютная величина напряженности поля радиопомех при заданном  $E_L$  может быть получена из выражения

$$E = 10^{E_L/20}.$$

Следует иметь в виду что если измерение обнаруживает соблюдение норм по допускаемым радиопомехам, то это не означает, что установка обязательно отвечает санитарным нормам. Опыт показывает, что удержание интенсивности электромагнитных полей и напряженности поля радиопомех на заданных уровнях надежно обеспечивается только путем тщательного экранирования всех токоведущих элементов сварочных установок.

Объектами экранирования в сварочных установках являются: генераторный блок лампового генератора; рабочий конденсатор сварочного устройства; согласующие и токоведущие устройства.

Эффективность экранирования оценивается отношением напряженности электрического поля в данной точке пространства при отсутствии экрана и при его наличии. Степень ослабления выражают обычно в децибеллах (дБ) в предположении, что

$$\beta = |20 \lg (E/E_0)|,$$

где  $\beta$  — ослабление напряженности поля в результате экранирования;  $E_0$  — напряженность поля при отсутствии экрана;  $E$  — напряженность поля при наличии экрана.

Эффективность сплошного металлического экрана, со всех сторон окружающего источник излучения, можно считать бесконечно большой. Однако снабдить установку такими идеальными экранами практически невозможно. С целью подачи заготовок в рабочий конденсатор, обеспечения необходимого технического обслуживания в экранах образуют разъемы, отверстия, смотровые окна, что уменьшает эффективность экранирования. Вместе с тем для ис-

пользуемых при сварке напряженностей электрического поля в зависимости от мощности установок достаточной степенью ослабления поля являются величины порядка 40—80 дБ, что может быть достигнуто с помощью определенных технических и конструктивных мер.

**Ненарушаемые разъемы.** Такие разъемы бывают необходимы, когда из конструктивных или технологических соображений следует обеспечить разборную конструкцию. В этом случае необходимо соблюдать плотное прилегание сопрягаемых поверхностей с целью получения хорошего электрического контакта между ними. Рекомендуется металлизировать контактируемые поверхности оловом, цинком или медью. Тонкие листы (менее 5—6 мм), закрывающие монтажные отверстия, необходимо крепить винтами, располагаемыми по периметру, с шагом, не превышающим 80—100 мм. Целесообразно с целью увеличения их жесткости применять отбортованные крышки. При наличии протяженных разъемов достаточно хороший контакт между сопрягаемыми поверхностями может быть обеспечен прокладкой между ними шнуров или шлангов из бескажевой резины, заключенных в чулок из медной или латунной проволоки.

**Двери и съемные крышки.** К конструкциям дверей и крышек, закрывающих подходы к зонам оперативного обслуживания, предъявляются более жесткие требования.

Для удобства обслуживания плотное прилегание дверей к сопряженной поверхности проема нецелесообразно выполнять с помощью расположенных по всему периметру прижимов. Поэтому между ними всегда необходимо вводить упругие элементы, компенсирующие неровности и деформации сопрягаемых поверхностей.

Герметичное прилегание дверей и крышек к поверхности каркаса осуществляется с помощью контактных пружин, выполненных из бронзовой (фосфористой) ленты толщиной 0,15 мм. Наиболее надежное экранирование обеспечивает конструкция с врезным ножом, западающим между двумя рядами контактных пружин. Не предъявляя высоких требований к качеству поверхностей разъема, эта конструкция требует все же относительно точного совпадения ножей с промежутками между контактными пружинами. Кроме того, из-за трения о ножи контактные пружины подвергаются усиленному износу. Замена поврежденных пружин в такой конструкции затруднена, а попытка сконструировать легко-разборные устройства приводит к усложнению конструкции и уменьшению эффективности экранирования.

В прижимных контактных устройствах дверей (особенно больших размеров, превышающих 1—1,5 м) следует применять пружины с увеличенным ходом.

Контактирующие с пружинными элементами поверхности дверей и каркасов необходимо покрывать антикоррозионными материалами.

Двери и съемные крышки экранирующих шкафов следует выполнять повышенной жесткости. Рекомендуется двойная отбортовка при толщине двери не менее 40—50 мм.

**Смотровые, вентиляционные и другие отверстия.** Распространенным способом экранирования смотровых окон является покрытие их металлическими сетками. Латунные и медные сетки из проволоки диаметром 0,1 мм и размером ячейки  $1,0 \times 1,0$  мм обеспечивают ослабление электрического поля порядка 60 дБ для диапазона частот 10—100 МГц. Для защиты от повреждений и загрязнений сетку целесообразно помещать между двумя прозрачными листами (плексиглас, стекло), обеспечивая при этом прижим сетки к металлическому каркасу по всему периметру окна. Контактную поверхность каркаса следует металлизировать антикоррозионным материалом.

Более простым и часто более целесообразным способом подавления излучений является способ, использующий принцип предельного волновода. Известно, что электромагнитная энергия высокой частоты способна распространяться по металлическим трубам — волноводам, если их размеры (диаметр, ширина) превосходят некоторую критическую величину, зависящую от длины распространяющейся электромагнитной волны. Для круглого волновода критическая длина волны определяется выражением

$$\lambda_{кр} = 3,41r\sqrt{\epsilon},$$

где  $\lambda_{кр}$  — критическая длина волны;  $r$  — радиус волновода;  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость вещества, заполняющего волновод.

Для прямоугольного волновода

$$\lambda_{кр} = 2a\sqrt{\epsilon},$$

где  $a$  — больший размер (ширина) волновода.

Чем больше длина излучаемой электромагнитной волны отличается от критической, тем быстрее происходит ее затухание в волноводе. Ослабление электромагнитной волны в конце волновода отвечает экспоненциальному закону показателем экспоненты  $\xi = -\alpha l_0$ , где  $l_0$  — длина волновода. Величина  $\alpha$  называется коэффициентом затухания, который для применяемых при сварке частот определяется приближенным выражением

$$\alpha = \pi/d, \quad (15)$$

где  $d$  — размер (диаметр или ширина) волновода.

Напряженность электрического поля в конце волноводного патрубкa может быть оценена выражением

$$E = E_0 e^{-\alpha l_0}, \quad (16)$$



где  $E$  — напряженность электрического поля в конце волновода длиной  $l_0$ ;  $E_0$  — напряженность электрического поля в начале волновода;  $e=2,71$  — основание натурального логарифма.

Последнее выражение определяет возможность использования предельных свойств волноводов для образования смотровых окон, вентиляционных отверстий и т. п. Они могут быть выполнены в виде труб круглого и прямоугольного сечения, причем чем больше длина такой трубы, тем сильнее ослабление поля на ее выходе. Из выражений (15) и (16) допустимую длину волноводного патрубков можно оценить по формуле

$$l_0 = (2,3d/\pi) / \lg (E/E_0) = 0,038d\beta.$$

Например, при использовании частоты 27,12 МГц в соответствии с санитарными нормами можно принять  $E=20$  В/м, а наибольшей возможной напряженностью поля на входе в волновод  $E_0$  является напряженность в рабочем пространстве, величина которой имеет порядок  $10^6$  В/м. Отсюда должно выполняться соотношение  $l < 4d$ . Практика сварки подтверждает справедливость соотношения

$$2d \leq l_0 \leq 3d, \quad (17)$$

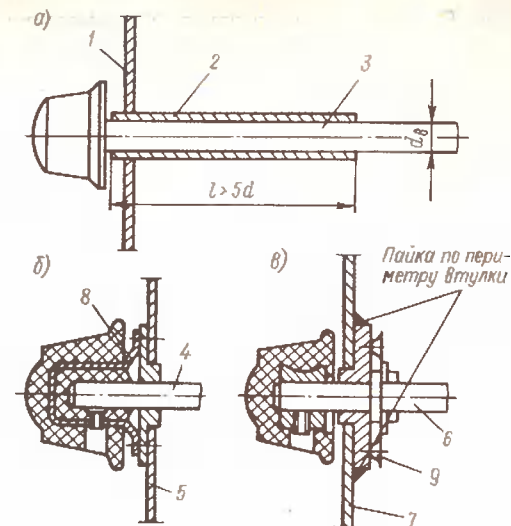
в котором правая часть должна использоваться при особо близком расположении отверстия от рабочего конденсатора. При использовании более высоких частот длина волноводных патрубков должна быть увеличена.

В некоторых случаях длину волноводных патрубков можно уменьшить, применяя так называемые сотовые устройства, образуемые с помощью взаимнопересекающихся металлических перегородок, покрывающих в виде решетки все поперечное сечение отверстия на всей длине волновода. В этом случае длина  $l_0$  определяется размером элементарной ячейки сотового устройства.

Следует иметь в виду, что дробление отверстия коаксиальными трубами приводит к обратным результатам. Коаксиальный выход не имеет критической длины волны. Он будет проводить электромагнитные волны при любой частоте источника питания. В связи с этим необходим осторожный подход к конструированию устройств, требующих вывода органов управления за пределы экранированного пространства. На рис. 26 показано два возможных решения. В первом случае внутри волноводного патрубка 2, приваренного к экрану 1, размещают промежуточный стержень из диэлектрического материала 3 (рис. 26, а). Во втором — проходящий сквозь патрубок металлический стержень 4 или 6 замыкается на экран 5 или 7 с помощью пружинного контактного кольца 8 или 9 (рис. 26, б и в).

При использовании конструкции, приведенной на рис. 26, а, необходимо учитывать, что заполнение волноводного тракта диэлектриком приводит к укорочению распространяющейся в нем

Рис. 26. Конструкция выводов рукояток управления из экранированных камер



электромагнитной волны и, следовательно, ухудшает фильтрующие свойства волновода. Поэтому при конструировании органов управления необходимо применять материалы с малой диэлектрической проницаемостью. При частоте 27,12 МГц приемлемыми являются такие материалы, как фторопласт, полипропилен и стеклотекстолит.

**Устройство подачи в рабочий конденсатор заготовок и технологической оснастки.** Отличительной особенностью экранирующих устройств рабочего конденсатора является необходимость обеспечения удобного доступа в рабочее пространство пресса с целью подачи туда заготовок и выгрузки готовых изделий. Это может быть осуществлено как с помощью разъемных экранов, так и путем использования свойств предельных волноводов. Наиболее уязвимыми элементами таких конструкций являются устройства, обеспечивающие электрическую герметичность стыков разъемных частей. При конструировании разъемных экранов необходимо в основном следовать рекомендациям, предложенным при рассмотрении конструкций дверей и съемных крышек. Вместе с тем из-за свойственного высокочастотным сварочным установкам высокого темпа работы к смыкаемым элементам должны быть предъявлены более жесткие требования.

При герметизации стыка разъемных частей экрана с помощью врезных ножей пружинные элементы должны быть разборными. Если разъем экрана лежит в горизонтальной плоскости, рекомендуется пружинные элементы располагать сверху.

Более предпочтительно применение прижимных устройств с контактными пружинами, усиленными упругими шнурами из бессажевой резины. Это уменьшает упругость пружинных элемен-

тов, поэтому сопрягаемые элементы должны быть достаточно жесткими и иметь малые отклонения от плоскости. Следует при этом иметь в виду, что кожух, экранирующий рабочий конденсатор, часто является одним из проводов, по которому течет электрический сварочный ток. В этом случае экран следует выполнять из материала повышенной электропроводности (алюминия) и во избежание искрений и подгорания контактных пружин необходимо обращать особое внимание на качество поверхностей электрического контакта разъемных частей экрана.

Использование свойств предельных волноводов при конструировании устройств подачи заготовок в рабочее пространство пресса упрощает конструкцию, но в то же время ведет к увеличению габаритных размеров установки. Тем не менее волноводные входы в рабочее пространство иногда, например при сварке изделий из непрерывно подаваемых рулонных материалов, являются единственно приемлемыми решениями.

## VI. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВАРОЧНЫХ УСТРОЙСТВ

### 25. Требования, предъявляемые к технологическим сварочным устройствам

Для получения оборудования высокого качества необходимо возможно более близкое удовлетворение требованиям эталона качества по всем показателям, однако из них могут быть выделены наиболее важные, характерные для высокочастотных сварочных установок: точность исполнения узлов, примыкающих к рабочему конденсатору; силовая жесткость элементов технологического устройства; универсальность и мобильность (быстрота перехода на производство новых изделий); максимально высокая производительность.

Конструкция установки должна обеспечить подавление напряженностей излучаемых электромагнитных полей до уровней, определяемых соответствующими нормами. Необходимо также учитывать, что производство изделий из термопластов получило распространение в различных отраслях промышленности на многих предприятиях с различным уровнем технической оснащенности, поэтому существенным оказывается требование автономности энергетического питания установки. Например, пневматический привод силовой системы сварочного пресса представляется в общем случае неприемлемым ввиду отсутствия пневмосетей на многих мелких предприятиях, нуждающихся в оборудовании для сварки термопластов.

### 26. Критерии технического совершенства сварочных установок

Согласно известным положениям теории производительности машин и труда принято следующее деление периода рабочего цикла технологической машины [1]:

$$T = t_p + t_x,$$

где  $T$  — период рабочего цикла (время, в течение которого производится определенная порция продукции);  $t_p$  — время, затраченное на собственно обработку изделия;  $t_x$  — время, затрачиваемое на холостые ходы в течение периода рабочего цикла (подвод и отвод инструмента, подача материала и т. п.).

Такое деление позволяет дать оценку степени совершенства технологии и степени технического совершенства машины. Величина

$$k = 1/t_p$$

называется технологической производительностью машины, т. е. определяет возможности технологического процесса, а величина

$$Q_u = 1/T = 1/(t_p + t_x) = \eta K$$

называется цикловой производительностью, величина которой зависит от того, насколько совершенна сама машина. Здесь

$$\eta = t_p/T = 1/(Kt_x + 1)$$

коэффициент производительности, дающий численную оценку технического совершенства машины. Очевидно,  $0 < \eta \leq 1$ , причем равенство здесь достигается при отсутствии холостых ходов, т. е. соответствует предельному совершенству машины.

Из высказанных положений вытекает основное требование закона производительности машин и агрегатов: повышение их производительности заключается в том, что вместе с интенсификацией процессов обработки (сокращением  $t_p$ ) необходимо сокращать все потери, в том числе и порождаемые самой интенсификацией (временные затраты  $t_x$ ) [1].

Высокочастотная сварочная установка, работающая по полуавтоматическому циклу, осуществляет в общем случае следующие операции: разведение рабочих плит пресса (затраты времени  $t_{p,n}$ ); размыкание экрана ( $t_{p,z}$ ); выдачу сваренного изделия из рабочего пространства в позицию загрузки ( $t_n$ ); подачу собранных заготовок и технологической оснастки в рабочее пространство ( $t_n$ ); замыкание экрана ( $t_{z,s}$ ); сведение рабочих плит пресса ( $t_{c,n}$ ); нагрев зоны сварных соединений ( $t_n$ ) и их охлаждение под давлением ( $t_{охл}$ ).



Здесь, очевидно,

$$t_p = t_n + t_{охл} = t_{св},$$

где  $t_{св}$  — время сварки, а все остальные операции определяют затраты времени холостого хода

$$t_x = t_{р.п} + t_{р.з} + t_v + t_n + t_{з.з} + t_{с.п}.$$

Замыкание и размыкание экрана обычно удается совместить с операциями сведения и разведения рабочих плит, тогда можно положить

$$t_x = 2t_{д.п} + vt_{п.с},$$

где  $t_{д.п}$  — затраты времени на движение рабочих плит;  $t_{п.с}$  — время перемещения загрузочных столов;  $v$  — коэффициент совмещения перемещений загрузочных столов. Для связанных столов он равен единице, для несвязанных может принимать значения от единицы до двух. Здесь предполагается, что

$$t_{р.п} = t_{с.п} = t_{д.п}; \quad t_n = t_{п} = t_{п.с}.$$

Таким образом, можно утверждать, что цикловая производительность сварочной установки определяется временем сварки  $t_{св}$ , а также затратами времени на перемещение рабочих плит  $t_{д.п}$  и загрузочных столов  $t_{п.с}$ .

$$Q_y = 1/T = 1/(t_{св} + 2t_{д.п} + vt_{п.с}) = \eta K; \quad K = 1/t_{св}; \quad \eta = t_{св}/T.$$

Поскольку как указывалось, сварочной установке необходимым образом присуща цикличность работы, то всегда  $\eta < 1$ , и из общего определения коэффициента производительности не обнаруживается его наибольшее возможное значение. Поэтому при проектировании сварочной установки задача конструктора заключается в поиске некоторых оптимальных конструктивных решений технологического устройства в целом и отдельных его узлов и механизмов.

## 27. Проектирование загрузочных устройств

**Влияние на производительность связей между загрузочными столами.** Общей особенностью всех загрузочных устройств, оказывающей влияние на производительность сварочных установок, является наличие или отсутствие между столами кинематических (или иных, обусловленных, например, схемой автоматического управления) связей [1]. Загрузочное устройство может быть выполнено так, что при выводе одного стола из рабочего пространства пресса другой перемещается из позиции загрузки, занимая его место. Такие столы называются связанными. Известны устрой-

ства, загрузочные столы которых не имеют между собой каких-либо связей, и при перемещении одного стола остальные могут оставаться неподвижными. Такие столы называются несвязанными. Примерами загрузочных устройств со связанными столами являются карусельные и конвейерные устройства. Выдвижные загрузочные столы могут быть как связанными, так и несвязанными.

Необходимое количество загрузочных столов  $n$  зависит от отношения времени сборки заготовок и технологической оснастки  $t_c$  к цикловым затратам  $t_u$ , включающим в себя время сварки и затраты времени на перемещение рабочих плит пресса. С другой стороны, при фиксированном числе загрузочных столов это отношение применительно к данной установке может служить критерием степени сложности свариваемых изделий. Принимая

$$t_c/t_u = a,$$

можно условно считать изделие несложным, если  $a \leq n-1$ , и сложным, если  $a > n-1$ . В последнем случае количество загрузочных столов недостаточно для того, чтобы перекрыть время укладки цикловыми затратами времени. Для более полного использования источника питания необходимо либо увеличить количество загрузочных столов, либо упростить изделие или усовершенствовать технологию его сборки. С использованием величины  $a$  могут быть написаны выражения для производительности  $n$ -позиционных установок с несвязанными  $Q_n$  и связанными  $Q'_n$  столами

$$Q_n = \begin{cases} \zeta \frac{1}{t_u}, & a \leq n-1, \quad n=2, 3, \dots; \\ \zeta \frac{1}{t_u} \frac{n}{1+a}, & a > n-1, \quad n=1, 2, 3, \dots; \end{cases}$$

$$Q'_n = \begin{cases} \zeta \frac{1}{t_u}, & a \leq n-1, \quad n=2, 3, \dots; \\ \zeta \frac{1}{t_u} \frac{n-1}{a}, & a > n-1, \quad n=2, 3, \dots. \end{cases}$$

где  $\zeta$  — коэффициент, учитывающий уменьшение производительности из-за затрат времени на перемещение столов в прессе. Анализ этих выражений дает возможность сделать следующие выводы: при сварке несложных изделий  $Q_n = Q'_n$ ; при сварке сложных изделий  $Q_n > Q'_n$ ; с увеличением числа загрузочных столов  $n$  производительности установок со связанными и несвязанными столами все меньше отличаются друг от друга. Уже при  $n=4$  их отношение  $Q'_n/Q_n \geq 0,8$ .

Таким образом, в общем случае установки с несвязанными столами производительнее установок со связанными столами, но уже при числе загрузочных столов, превышающих три, характер связей оказывает на производительность слабое влияние. Следова-

тельно, загрузочные устройства с двумя и тремя выдвижными загрузочными столами целесообразно выполнять кинематически несвязанными.

**Подача загрузочных столов в пресс.** Затраты времени на подачу загрузочных столов в пресс являются ничем не перекрываемыми затратами. Во время движения столов генератор должен быть выключен, а сборочные операции приостановлены. Однако стремление к увеличению скорости перемещения столов вступает в противоречие с требованием обеспечения мобильности установок, особенно актуальным при работе в условиях массового быстрого переменного производства товаров народного потребления, где сварка пластмасс находит широкое применение. Здесь существует стремление производить укладку заготовок и технологической оснастки без применения каких-либо зажимных приспособлений. Поэтому при проектировании загрузочных устройств установок широкого применения на скорости перемещения столов необходимо наложить ограничение. Возникающие при движении ускорения не должны превосходить некоторую величину  $M$ , которая может быть определена из условия равенства сил инерции и сил трения, действующих на пакет заготовок и оснастки, свободно лежащих на столе:

$$|W| \leq M, \quad (18)$$

где  $W$  — полное ускорение загрузочного стола в месте размещения заготовок [1].

Рассматриваемое как дифференциальное уравнение движения выражение (18) определяет оптимальный закон движения загрузочного стола.

Известно, что при прямолинейном движении интегрирование уравнения дает параболический закон (квадратичную зависимость пути от времени), а при вращательном движении поворотной платформы с загрузочными столами интегрирование в элементарных функциях неосуществимо. Оптимальный закон перемещения выражается с помощью специальных функций, хотя по характеру изменения напоминает синусоидальную зависимость пути от времени (рис. 27) [1]. Движение столов в соответствии с оптимальными законами обеспечивает наименьшее допустимое при условии (18) время подачи. При прямолинейном движении его значение определяется соотношением

$$t_{n.c.} = 2\sqrt{H/M},$$

где  $H$  — величина хода стола из позиции загрузки в позицию сварки, м;  $M$  — максимально допустимая величина ускорения стола в месте расположения пакета заготовок и технологической оснастки, м/с<sup>2</sup>.

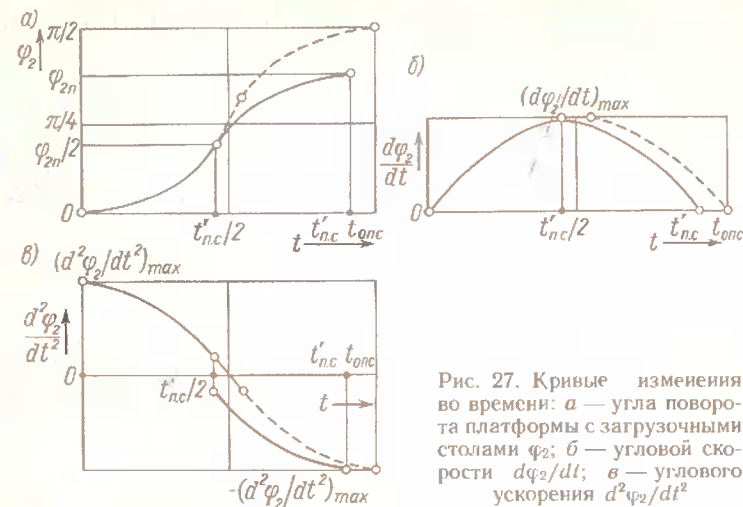


Рис. 27. Кривые изменения во времени: а — угла поворота платформы с загрузочными столами  $\varphi_2$ ; б — угловой скорости  $d\varphi_2/dt$ ; в — углового ускорения  $d^2\varphi_2/dt^2$

При круговой подаче столов может быть использована приближенная формула

$$t_{n.c.} = (1,05 - \varphi_{2n})\sqrt{R/M}, \quad (19)$$

где  $\varphi_{2n}$  — полный угол поворота платформы со столами, рад;  $R$  — радиус платформы, м.

Выражение (19) дает относительно точные результаты при следующих значениях угла поворота:

$$30^\circ \leq \varphi_{2n} < 180^\circ.$$

Величина допустимого ускорения  $M$  может быть получена из условия равновесия сил, приложенных к пакету заготовок:

$$mW \leq fG; W \leq fG/m = fmg/m = M,$$

где  $m$  — масса пакета;  $G = mg$  — вес пакета;  $g$  — ускорение силы тяжести;  $f$  — коэффициент трения покоя. Очевидно, при  $f = 0,1$   $M = 1 \text{ м/с}^2$ , и это значение может быть принято при расчетах.

Для анализа целесообразности применения данного реального механизма в качестве привода подачи загрузочных столов удобно пользоваться отношением

$$\mu = t_{n.c.}/t_{n.c.} \leq 1,$$

где  $t_{n.c.}$  — минимально допустимое при условии (18) время подачи стола, приводимого данным механизмом.

Если предположить, что механизм перемещения столов включает в себя наряду с прочими ведущее звено, совершающее равно-



мерное вращение, так что при его повороте на угол  $\varphi_{1n}$  осуществляются перемещения ведомого звена (стола) на величину  $H$  при прямолинейном движении или на угол  $\varphi_{2n}$  при вращательном, то коэффициент  $\mu$  может быть вычислен по формулам:

при прямолинейной подаче

$$\mu = 2 \sqrt{H} / (\varphi_{1n} \sqrt{h_{2n}''});$$

при круговой подаче

$$\mu = 2,62 / (\varphi_{1n} \sqrt{\Phi_m}),$$

где  $h_{2n}'' = \max (d^2 h_2 / d\varphi_2^2)$  — максимум второй производной пути перемещения стола по углу поворота ведущего звена (максимум аналога ускорения);  $\Phi_m$  — максимум функции, определяемой выражением:

$$\Phi_m = \sqrt{\varphi_2'^4 + \varphi_2''^2}.$$

Здесь  $\varphi_2' = d\varphi_2 / d\varphi_1$ ;  $\varphi_2'' = d^2 \varphi_2 / d\varphi_1^2$  — первая и вторая производные угла поворота платформы по углу поворота ведущего звена (аналоги угловых скорости и ускорения).

При использовании механизмов, для которых  $\mu < 0,65$ , производительность сварочной установки резко падает, поэтому в основе выбора приводных устройств загрузочных столов должно лежать соотношение

$$0,65 < \mu \leq 1.$$

В частности, подсчитано, что для кривошипного механизма с прямолинейно движущейся кулисой (рис. 28) коэффициент

$$\mu = 2\sqrt{2}/\pi \approx 0,9.$$

Этот механизм обеспечивает весьма близкое по динамическим свойствам приближение к оптимальному закону движения.

Для центрального кривошипно-шатунного механизма (рис. 29)

$$\mu = 2\sqrt{2} / (\pi \sqrt{1 + \lambda}),$$

где  $\lambda = r_1 / r_2$  — отношение радиуса кривошипа  $r_1$  к длине шатуна  $r_2$ .

Этот механизм в сравнении с предыдущим дает увеличение времени поворота в  $\sqrt{1 + \lambda}$  раз. При  $\lambda = 0,5$  (механизм может быть размещен в пределах габарита загрузочного стола)  $\mu = 0,73$ , что вполне приемлемо для загрузочных устройств сварочных установок.

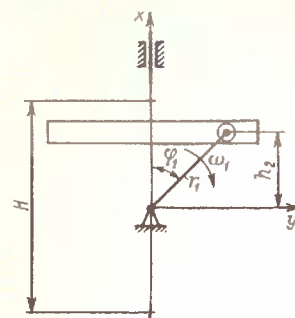


Рис. 28. Схема кривошипного механизма с прямолинейно движущейся кулисой

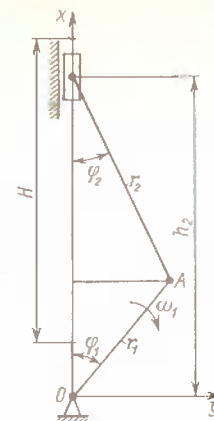


Рис. 29. Схема центрального кривошипно-шатунного механизма

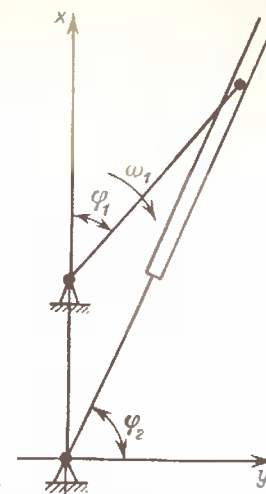


Рис. 30. Схема кривошипного механизма с качающейся кулисой

При стремлении выполнить условия (18) следует осторожно подходить к применению механизмов, в основе которых лежит центральный кривошипный механизм с качающейся кулисой (рис. 30). Например, для четырехлучевого мальтийского механизма с внешним зацеплением коэффициент  $\mu = 0,25$ , что не позволяет рекомендовать его в качестве привода поворотных платформ сварочных установок. Известно, что динамические характеристики мальтийских передач улучшаются с увеличением числа лучей мальтийского креста. Для 8-лучевой передачи  $\mu = 0,63$ , что следует считать крайним допустимым пределом применения. При необходимости поворота на угол, больший  $45^\circ$ , целесообразно применять мальтийскую передачу с увеличенным числом лучей, а между ней и ведомым звеном вводить ускоряющую передачу.

При выборе приводных механизмов загрузочных устройств сварочных установок общего назначения следует принимать в расчет также следующие соображения.

Полное ускорение  $W$  ведомого звена в общем случае, как известно, может быть представлено выражениями:

$$W = \ddot{h}_2 = h_2'' \dot{\varphi}_1 + h_2' \ddot{\varphi}_1; \quad (20)$$

$$W/R = (\varphi_2'' \dot{\varphi}_1 + \varphi_2' \ddot{\varphi}_1) \bar{\tau} + \varphi_2' \dot{\varphi}_1 \bar{n}, \quad (21)$$

где  $\bar{\tau}$  и  $\bar{n}$  — единичные орты касательной и нормали в рассматриваемой точке траектории;  $R$  — радиус платформы с загрузочными столами. Здесь штрихами обозначено дифференцирование по  $\varphi_1$ , точками — дифференцирование по времени  $t$ .

Если движение ведущего звена равномерно, то  $\dot{\varphi}_1 = 0$  и соответствующие слагаемые в выражениях (20) и (21) исчезают. В реальных механизмах с равномерным вращением ведущего звена, осуществляемым, например, электро-, гидро- или пневмодвигателями, это действительно имеет место. Однако, как правило, в силу определенного соотношения продолжительности движения подачи столов и времени укладки заготовок (часто и в силу определенной структуры грузочных механизмов), привод грузочных устройств на время укладки выключается. Тогда в периоды разгона и торможения  $\dot{\varphi}_1 \neq 0$ . Ускорение ведомого звена может достигнуть величин, которые невозможно контролировать и которые могут значительно превысить допустимую величину  $M$ . Поэтому, как это вытекает из выражений (20) и (21), в качестве приводов грузочных столов целесообразно выбирать такие механизмы, у которых аналоги скоростей  $h_2$  и  $\varphi_2$  в периоды разгона и торможения близки к нулю. Вышеприведенные механизмы обладают этим свойством. Внешним его признаком является то, что в исходном положении механизмов движение их ведущих звеньев направлено по нормали к направлению движения ведомых.

Оптимальные законы движения в принципе могут быть осуществлены с помощью, например, кулачковых механизмов. Однако следует иметь в виду, что близкими к ним по динамическим свойствам являются механизмы, осуществляющие синусоидальную зависимость скорости от времени. Рассмотренный выше кривошипный механизм (см. рис. 30) осуществляет синусоидальный закон  $h_2 = r_1 \cos \varphi_1$  и коэффициент  $\mu$  для него близок к единице. Точно так же закон движения поворотной платформы, определяемый выражением

$$\varphi_2 = (\pi/4) \left( 1 - \cos \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{M/R} t \right),$$

близок к оптимальному. Для механизма, осуществляющего такой закон движения (угол поворота здесь равен  $90^\circ$ ), коэффициент  $\mu = 0,94$ .

## 28. Точность исполнения и силовая жесткость сварочного пресса

С целью обеспечения параллельного расположения электродов одна из рабочих плит пресса должна снабжаться регулировочными устройствами, которые используются для восстановления параллельности при смене технологической оснастки. Отклонение рабочих плит от плоскостности не должно превышать 0,03 мм на 100 мм длины. Допуски и посадки подвижных соединений, обеспечивающих перемещение подвижной плиты, должны выбираться так, чтобы в результате выборки зазоров и искажения траекторий движения звеньев примененных механизмов возможные отклонения электродов от параллельности не превышали 0,03—

0,05 мм на всю длину сварочных плит. Те же соображения лежат в основе требований к сварочным устройствам по силовой жесткости элементов, прижимающих к электродам. Опыт показывает, что перекося электродов в результате деформаций силовых звеньев пресса может быть в известной степени выправлен путем предварительного перекося регулируемой рабочей плиты в противоположном направлении. Однако если в процессе сварки используется двухступенчатое давление, то величина предварительного перекося, выбранная для одной ступени, не может соответствовать другой. Тем не менее в расчетах на жесткость величины допускаемых деформаций могут быть приняты на порядок больше величин, определяемых выражениями (9) и (10). Максимальные значения отклонений от параллельности рабочих плит в результате приложения нецентральных нагрузок могут быть приняты равными 0,3—0,5 мм.

**Станины консольных пресов.** Известно, что при прочих равных условиях деформация изгиба нагруженной на конце консольной балки в два раза превышает деформацию нагруженной посередине балки на двух опорах. Однако не только этим определяется ограничение в применении консольных пресов в технике высокочастотной сварки пластмасс. Из рис. 31 видно, что отклонение рабочих плит от параллельности складывается из деформаций не только собственно консоли, но и колонны, на которой консоль

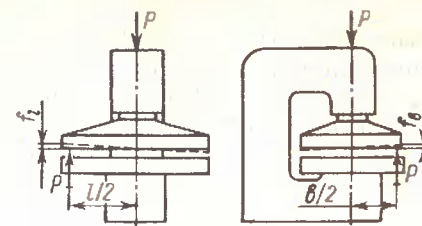


Рис. 31. Схема нагружения сварочного пресса

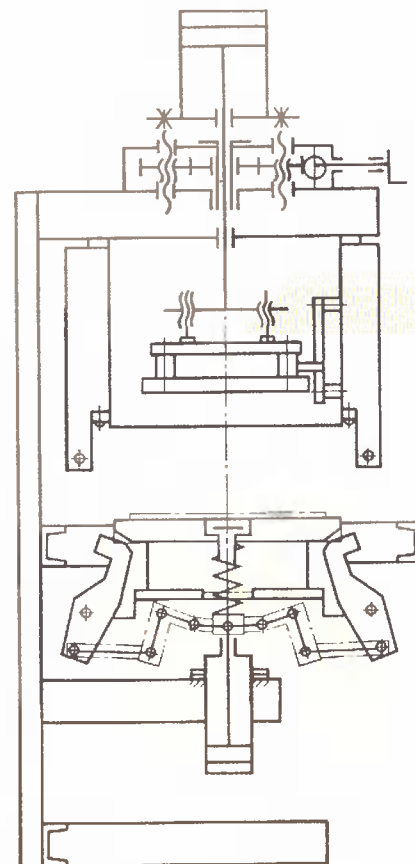


Рис. 32. Сварочный пресс с разгрузочной консолью



закреплена, и, следовательно, зависит как от размеров рабочих плит, так и от заданного наибольшего расстояния между ними, т. е. от высоты свариваемых изделий. Кроме того, нагружение элементов станины при нецентральных нагрузках приобретает сложный характер. Колонна подвергается изгибу относительно обеих главных осей своего сечения, а консоль, кроме изгиба в вертикальной плоскости, испытывает еще и крутящие моменты. Общее отклонение равняется сумме составляющих.

При конструировании сборочных прессов с консольной станиной целесообразно ставить задачу разгрузки консоли от рабочих усилий сварки путем замыкания этих усилий на вертикальные элементы конструкции, работающие на растяжение. Пример подобной конструкции, приближающейся по силовым характеристикам к порталным прессам, показан на рис. 32.

Что касается порталных прессов, в особенности четырехколонных, то можно принять, что деформации станины не дают перекоса рабочих плит как при центральном, так и нецентральной приложении нагрузки. Поэтому за исключением некоторых специальных случаев размеры рабочих плит консольных прессов не превышают 1000 мм. Так же и для установок, предназначенных для сварки объемных изделий, превышающих по высоте 250—300 мм, целесообразно применять порталные устройства.

**Направляющие устройства подвижных рабочих плит.** Силовая жесткость и точность исполнения направляющих устройств рабочих плит так же, как и станин прессов, оказывают непосредственное влияние на взаимное расположение сварочных электродов.

При расчетах направляющих устройств рабочих плит на жесткость ползун следует рассматривать как балку на двух опорах, расположенных на концах неподвижных направляющих станины. Если считать эти опоры абсолютно жесткими, то их реакции  $H_0$  определяются выражением (рис. 33)

$$H_0 = p / (2d),$$

где  $d$  — длина направляющих станины.

В реальных устройствах нагрузка на направляющие распределяется по площади некоторого пятна, размер которого зависит от упругости использованных материалов. Если задано допустимое значение напряжения смятия  $|\sigma_{см}|$ , то высота контактного пятна определяется выражением

$$c = d/2 - \sqrt{d^2/4 - Pl/2b|\sigma_{см}|},$$

где  $b$  — ширина направляющих;  $|\sigma_{см}|$  — допустимое значение напряжения смятия. Тогда реакция направляющих, которая определяет действующий на ползун изгибающий момент, будет равна

$$H = Pl / [2(d - c)].$$

Рис. 33. Эпюры напряжений изгибов в направляющих прессов

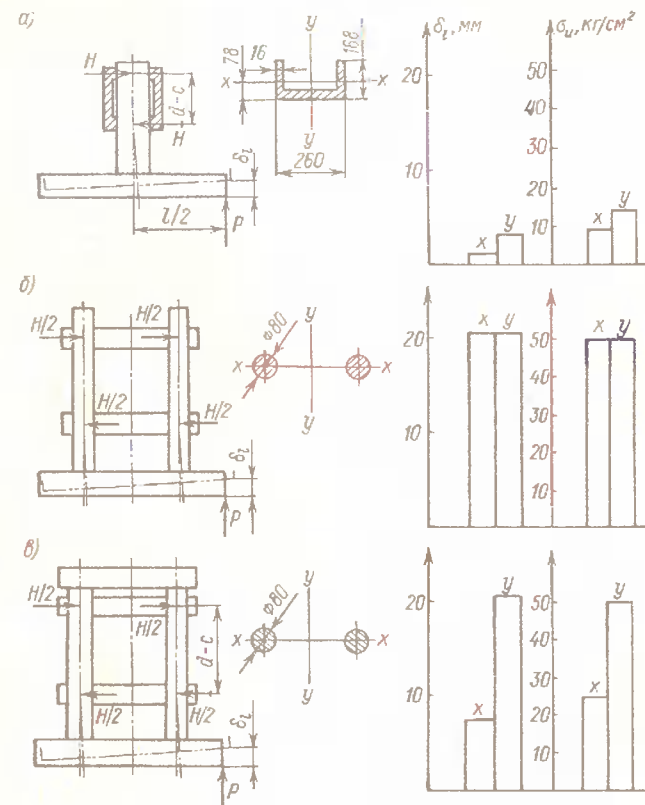
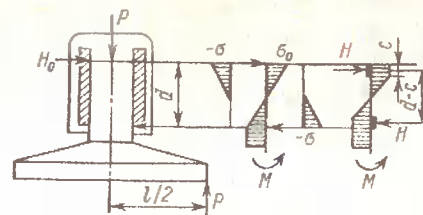


Рис. 34. Расчетные схемы различных типов направляющих рабочих плит

Приведенные соображения лежат в основе сравнительных расчетов, выполненных для трех случаев направляющих, которые часто используются в сварочных устройствах. Результаты этих расчетов приведены на рис. 34 в виде диаграмм, дающих значения отклонений от параллельности рабочих плит  $\delta_f$  и максимальные напряжения  $\sigma_u$  в направляющих при изгибе во взаимно перпендикулярных плоскостях  $xx$  и  $yy$ . На рис. 34, а приведена призматическая направляющая с ползуном, закрепленным в средней

части рабочей плиты, рис. 34, б иллюстрирует закрепление рабочей плиты на двух цилиндрических направляющих с незамкнутыми концами. Случай, приведенный на рис. 34, в, отличается от предыдущего наличием траверсы, связывающей верхние концы цилиндрических ползунов. Расчеты проведены в предположении нагружения плит силой, равной 100,0 кН.

При конструировании синхронизирующих устройств особое внимание следует обращать на точность исполнения звеньев используемых механизмов, иначе не будет обеспечена необходимая кинематическая точность, что приведет к перекосу рабочей плиты в процессе перемещения.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Справочный материал

Все свойства полимерных термопластичных материалов (электрические, механические, теплофизические и др.) определяются в первую очередь их основой — полимером. Внесение различных добавок (пластификаторов, стабилизаторов, мягчителей, красителей и пр.) изменяют свойства полимерных материалов.

Для оценки поведения этих материалов в электрическом поле высокой частоты, а также для проведения энергетических расчетов необходимо знать указанные выше свойства.

Ниже приводятся свойства полимерных термопластичных материалов на основе поливинилхлоридных, полиамидных, стирольных смол и фторсодержащих пластиков.

Свойства полимерных термопластичных материалов

Тип материала	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Теплофизические свойства		Электрические свойства	
				Температура плавления, °С	Коэффициент температурной проводимости, Вт/м·°С	Диэлектрическая проницаемость при 10 <sup>6</sup> Гц	Тангенс угла диэлектрических потерь при 10 <sup>6</sup> Гц
Поликарбонат:							
капролон	1,13	65	80—150	210—218	0,246	3,6—4,0	0,03
Полигексаметиленадипинамид (полиамид П-66)	1,15—1,16	70—90	10—30	220—226	0,267—0,337	3,4—4,1	0,022—0,032
Полигексаметиленсебадинамид (полиамид П-610), ГОСТ 10589—73	1,14	80	20—40	225—265	0,240	3,6—4,0	0,02
Полиамид П-54 (сополимер)	1,08—1,11	50—60	100—150	213—220	0,22	3,4—4,0	0,017—0,03
Поливинилхлорид непластифицированный (винилпласт листовый), ГОСТ 9639—71	1,12	45—50	300—350	168—175	—	—	—
Поливинилхлорид пластифицированный (пластик) листовой, ГОСТ 18269—72	1,34—1,4	45—70	10—50	—	0,13—0,15	3,1—3,4	0,015—0,018
Полипропилен (ПП), Фторопласт-4 (Ф-4), ГОСТ 10007—74	1,18—1,3	10—15	160—200	—	0,13—0,14	3,1—3,4	0,025
Полиэтилен (ПЭ), Полипропилен (ПП), Фторопласт-4 (Ф-4), ГОСТ 10007—74	0,90—0,91	25—40	200—800	160—170	—	2,2	0,0002—0,0005
Полиэтилен (ПЭ), Полипропилен (ПП), Фторопласт-4 (Ф-4), ГОСТ 10007—74	2,12—2,28	14—35	250—500	327	0,21	1,9—2,2	0,0001—0,0002
Полиэтилен (ПЭ), Полипропилен (ПП), Фторопласт-4 (Ф-4), ГОСТ 10007—74	1,05—1,06	40—42	2	—	—	2,6	0,0003
Ударопрочный полистирол	1,05—1,07	20—30	15—45	—	—	2,7	0,0005
Плексиглас:							
полиамидная ПК-4	—	17,5—27,5	200	—	—	3,7	0,025
винилпластовая	—	40,0	30,0	—	—	3,2—4,0	0,01—0,05



Тип материала	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Предел прочности при растя- жении, МПа	Относитель- ное удлине- ние при раз- рыве, %	Теплофизические свойства		Электрические свойства	
				Температура плавления, °C	Кэффи- циент тепло- проводности, Вт/м·°C	Диэлектрическая проницаемость при 10 <sup>6</sup> Гц	Тангенс угла ди- электрических по- терь при 10 <sup>6</sup> Гц
Поливинилхлоридная, пластифицированная, тех- ническая марка В, ГОСТ 16272—70	—	12,0	140	—	—	3,8—4,2 при частоте 10 <sup>6</sup> Гц	0,05—0,08
Поливинилхлоридная, пластифицированная, га- лантерейная, ГОСТ 9998—74	—	6,0	60,0	—	—	3,8—4,5	0,05—0,09
Полистирольная, ГОСТ 12998—73	—	55	3,1	—	—	2,1—2,6	0,0004
Полиэтиленовая, ГОСТ 10354—73	—	10,0—12,0	200—300	—	—	2,0—2,3	0,0002—0,0003
Электроизоляционная, из фторопласта-4, ГОСТ 12508—73	—	15	150	—	—	1,8—2,1	0,0003

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безменов Ф. В., Федорова И. Г. Высокочастотная сварка пластмасс. — Л.: Машиностроение, 1980. — 89 с.
2. Безменов Ф. В., Коробова В. В., Федорова И. Г. Некоторые вопросы высокочастотной сварки термопластичных материалов//Электротехника. — 1986. — № 7. — С. 61—62.
3. Безменов Ф. В., Коробова В. В., Федорова И. Г. Выбор критерия оптимизации процесса высокочастотной сварки ПВХ пленок//Технология и оборудование для сварки и склеивания пластмассовых труб в системах газо- и водоснабжения. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1985. — С. 92—97.
4. Безменов Ф. В., Коробова В. В., Федорова И. Г. Исследование процесса высокочастотной сварки термопластов с целью создания оптимальных нагревательных систем//Автоматическая сварка. — 1986. — № 11. — С. 13—15.
5. Васильев А. С. Ламповые генераторы для высокочастотного нагрева. — Л.: Машиностроение, 1980. — 75 с.
6. Глуханов Н. П., Федорова И. Г. Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов в машиностроении. — Л.: Машиностроение, 1983. — 160 с.
7. Глуханов Н. П. Физические основы высокочастотного нагрева. — Л.: Машиностроение, 1980. — 80 с.
8. Долгополов Н. Н. Электрофизические методы в технологии строительных материалов. Изд. литературы по строительству. — М.: 1971. — 240 с.
9. Зайцев К. И. Реологическая концепция механизма образования сварных соединений термопластов//Состояние и перспективы развития сварки и склеивания термопластов. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1982. — С. 3—7.
10. Зайцев К. И., Мацюк Л. Н. Сварка пластмасс. — М.: Машиностроение, 1978. — 224 с.
11. Коробова В. В., Федорова И. Г. Выбор критериальных характеристик при высокочастотной сварке термопластов. Технология и оборудование для сварки и склеивания пластмассовых труб в системах газо- и водоснабжения. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1985. — С. 87—91.
12. Применение пластмасс в промышленности вместо металла. Бюллетень иностранной научно-технической информации ТАСС. № 2, январь 1986, с. 23 (Источник «The Financial Times» № 29778, 1985).
13. Ромейко В. С. Значение пластмассовых труб в снижении металлоемкости трубопроводных систем в 11-й пятилетке//Пластические массы. — 1981. — № 12. — С. 21—23.
14. Справочник по пластическим массам. — М.: Химия, 1975. — Т. 1. — 446 с., Т. 2. — 556 с.
15. Федорова И. Г., Фирсова М. Г., Кириллова А. И. Современное состояние высокочастотного оборудования для сварки пластмасс за рубежом (по материалам зарубежной периодической печати)//Электротехническая промышленность. Сер. Электротермия. — 1984. — № 6(256). — С. 19—21.
16. Энциклопедия полимеров. — М.: Советская Энциклопедия, 1972. — Т. 1. — 1224 с.; 1974. — Т. 2. — 1030 с.

Предисловие . . . . .	3
<b>I. Области применения высокочастотной сварки пластмасс . . . . .</b>	<b>4</b>
1. Высокочастотная сварка в Советском Союзе . . . . .	—
2. Высокочастотное оборудование и перспективы его развития . . . . .	6
3. Экономическая оценка метода . . . . .	7
<b>II. Теоретические основы высокочастотной сварки пластмасс . . . . .</b>	<b>8</b>
4. Некоторые вопросы физического состояния полимеров . . . . .	—
5. Механизм процесса сварки. Реологические свойства расплавов термопластов и их влияние на свариваемость . . . . .	10
6. Пластмассы в переменном электрическом поле . . . . .	12
7. Энергетические соотношения процесса сварки . . . . .	14
8. Выбор основных параметров электрического поля . . . . .	17
9. Способы высокочастотной сварки . . . . .	20
10. Виды сварных соединений. Аргументация выбора расположения электродов рабочего конденсатора, геометрические размеры . . . . .	21
<b>III. Общие и специальные требования к конструкции электродов и технологической оснастке . . . . .</b>	<b>23</b>
11. Общие требования . . . . .	—
12. Специальные требования . . . . .	24
13. Точность исполнения электродов . . . . .	25
14. Учет волиновых явлений при конструировании и подключении электродов к источнику питания . . . . .	28
<b>IV. Технологические процессы высокочастотной сварки . . . . .</b>	<b>30</b>
15. Сварка пластифицированных термопластов . . . . .	—
16. Технологические особенности изготовления аппликаций, эмблем, товарных знаков . . . . .	33
17. Особенности сварки наполненных термопластов . . . . .	39
18. Сварка непластифицированных термопластов . . . . .	41
<b>V. Конструирование и технологические особенности высокочастотных сварочных установок . . . . .</b>	<b>48</b>
19. Элементы высокочастотных сварочных установок . . . . .	—
20. Источники питания . . . . .	—
21. Технологические устройства . . . . .	52
22. Согласующие устройства . . . . .	56
23. Устройства подвода электромагнитной энергии высокой частоты к рабочему конденсатору . . . . .	57
24. Экранирование сварочных установок . . . . .	59
<b>VI. Некоторые вопросы проектирования технологических сварочных устройств . . . . .</b>	<b>64</b>
25. Требования, предъявляемые к технологическим сварочным устройствам . . . . .	—
26. Критерии технического совершенства сварочных установок . . . . .	65
27. Проектирование загрузочных устройств . . . . .	66
28. Точность исполнения и силовая жесткость сварочного пресса . . . . .	72
Приложение. Справочный материал . . . . .	76
Список литературы . . . . .	79

ф. 507

ф. 507