

ДЕП

Доц. Ф. И. КИСЛЮК

517415

КУРС ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ  
СВАРКИ  
СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Книгуз 1940

### Опечатки

<i>Стр.</i>	<i>Строка</i>	<i>Напечатано</i>	<i>Должно быть</i>	<i>По чьей лине</i>
6	3 снизу	по вторичной	во вторичной	Авт.
8		Номера фиг. 5 и 6 поменять местами		Корр.
33	3 снизу	фиг. 39	фиг. 33	Авт.
38	7 сверху	фиг. 37	фиг. 26	"
56	11 снизу	точечной и роликовой	точечной	"
61	9 "	фиг. 59	фиг. 53	"
71	9 сверху	разрез	запас	"
115	3 "	$0,6 \pm 0,6$	$1,0 \pm 1,0$	"
115	4 "	$3 \pm 3$	$2,5 \pm 2,5$	"
123		Фиг. 101 имеет в центре линию, ее не должно быть		
227	20 "	6	5	"

Доц. Ф. И. КИСЛЮК

# КУРС ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СВАРКИ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС  
И АППАРАТУРА

*Допущено Главным управлением  
учебными заведениями НКСМ в  
качестве учебного пособия для  
машиностроительных вузов*

Цена 10 руб., пер. 1 р. 50 к.

1282082

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ  
БИБЛИОТЕКА

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Москва

1940

Ленинград

Предлагаемая книга является учебным пособием по контактной сварке, предназначенным для машиностроительных вузов.  
Книга утверждена ГУУЗ НКСМ.



## ПРЕДИСЛОВИЕ

Основная цель настоящей книги — дать курс для студентов машиностроительных вузов.

Книга снабжена примерами; последние выбраны таким образом, чтобы иллюстрировать применение теории к практическим условиям, что безусловно облегчит усвоение текста.

Ввиду отсутствия окончательно установленной терминологии по всем вопросам сварки автор применяет в ряде случаев термины, предложенные Комиссией терминологии при Академии Наук СССР, хотя еще окончательно и не утвержденные.

Академик В. П. Никитин при чтении книги в рукописи дал автору ряд ценных указаний, за что автор приносит ему свою благодарность.

*Ф. КИСЛЮК.*

Москва  
Апрель 1939 г.

## ВВЕДЕНИЕ

В 1877 г. Эл. Томсон (США) получил патент на изобретение стыковой сварки сопротивлением. Одновременно, независимо от него, русский ученый Бенардос, получивший мировую известность, изобретатель дуговой сварки угольным электродом, запатентовал аппаратуру и метод точечной сварки сопротивлением металлических листов.

Электрификация промышленных предприятий в то время находилась еще в зачаточном состоянии, поэтому только спустя несколько десятков лет после этих открытий, когда мощность отдельных предприятий достигла десятков и сотен тысяч kW, сварка методом сопротивления получила широкое применение.

Опыт показывает, что с технико-экономической точки зрения сварка по методу сопротивления наиболее целесообразна в массовом производстве при изготовлении однородных или однотипных изделий, как, например, в автомобилестроении, электромашиностроении и в других областях машиностроения.

Род тока (постоянный или переменный) не влияет на сварочный процесс методом сопротивления. Однако коммутация тока, являющаяся необходимым условием при сварке сопротивлением, гораздо легче разрешается при питании переменным током, чем постоянным.

Во всех странах термин „сварка сопротивлением“ (Resistance Welding, Widerstandschweissung и т. д.) является единственным термином для этого рода сварки.

В Советском Союзе наряду с термином „сварка методом сопротивления“ распространен еще термин „контактная сварка“. Термин „сварка методом сопротивления“ является более точным. Он охватывает также такой вид сварки, где нет контактного сопротивления между изделиями, а нагревание металла обусловлено исключительно электрическим сопротивлением каждого из свариваемых металлических изделий, по которым независимо протекает электрический ток. К такому виду относится, например, сварка поверхностная (метод Игнатьева).

# ТЕОРИЯ И ФИЗИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС СВАРКИ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

## Глава I

### ОСНОВНЫЕ ВИДЫ СВАРКИ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

#### 1. Понятие о сварке сопротивлением

Под общим термином „сварка металлов“ подразумевается процесс неразъемного соединения металлических изделий путем местного нагревания их до расплавленного состояния без применения или с применением механического усилия.

Сваркой сопротивлением называется такая сварка, при которой для нагревания соединяемых изделий непосредственно в месте соединения используется джоулево тепло<sup>1</sup> и соединение осуществляется с применением механического давления, приложенного к электродам. Таким образом сварка сопротивлением состоит из двух нераздельных процессов: нагревания и сдавливания.

Давление применяется при сварке сопротивлением для сжатия и осадки изделия. В связи с этим сварка сопротивлением может быть еще названа „электромеханической сваркой“, так как нагревание производится электрическим током, а сжатие — давлением на электроды.

Сварка сопротивлением подразделяется на ряд отдельных видов сварки. К ним относится точечная, многоточечная, рельефная, роликовая и стыковая сварка без оплавления, стыковая сварка оплавлением и поверхностная сварка (метод Игнатъева).

О свариваемости металлов. Свариваемостью называется свойство металлов давать доброкачественные соединения при сварке, характеризующееся степенью непрерывности и однородности металла шва и прилегающих зон основного металла.

„Сварным швом“ называется часть сваренного металлического изделия, образовавшаяся в месте соединения в результате сварки и характеризующаяся структурой, отличной от структуры основного металла изделия.

<sup>1</sup> Согласно закону Джоуля, тепло, выделяемое электрическим током, пропорционально произведению из квадрата силы тока на электрическое сопротивление.

„Проваром“ называется сплавление свариваемых частей.

Не все сочетания металлов поддаются сварке. В табл. 1 представлены данные о свариваемости различных металлов, позволяющие конструктору и технологу установить возможность соединения металлических деталей контактной сваркой. Кроме указанных металлов имеется еще ряд сплавов, не вошедших в табл. 1, но с успехом соединяющихся контактной сваркой, как, например, различные виды алюминиевых сплавов, различные виды сталей и др.

Таблица 1

Свариваемость металлов

Материал	Алюминий	Асколой	Бронза	Медь	Гальваническое железо	Железо	Свинец	Монель	Никель	Нихром	Фосфористая бронза	Белая жемь	Цинк	Никелевое серебро
Алюминий . . . . .	×													
Асколой . . . . .		×												
Бронза . . . . .		×	×											
Медь . . . . .		×	×	×										
Гальваническое железо . . . . .		×	×	×	×									
Железо . . . . .		×	×	×	×	×								
Свинец . . . . .							×							
Монель . . . . .		×	×	×	×	×	×	×						
Никель . . . . .		×	×	×	×	×	×	×	×					
Нихром . . . . .		×	×	×	×	×	×	×	×	×				
Фосфористая бронза . . . . .		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×			
Белая жемь . . . . .		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
Цинк . . . . .	×						×						×	
Никелевое серебро . . . . .		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

Примечание. Знак „×“ показывает, какой металл с каким другим металлом можно сваривать. Например, алюминий можно сваривать с алюминием, белой жемью и цинком.

## 2. Стыковая сварка

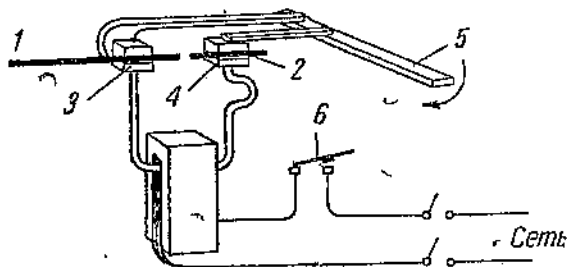
При стыковой сварке соединение свариваемых металлических изделий, нагретых протекающим электрическим током, осуществляется по всей поверхности их соприкосновения.

На фиг. 1 представлена схема аппарата для стыковой сварки. Свариваемые стержни 1, 2 укреплены в зажимах 3, 4, являющихся одновременно электродами, к которым присоединены шины от вторичной обмотки трансформатора. Первичная обмотка трансформатора присоединена к сети. Напряжение сети (обычно 220—380 В) трансформируется по вторичной обмотке сварочного трансформатора до нескольких вольт и большой силы тока. В таких аппаратах один зажим 3 является неподвижным, а дру-

гой 4 — подвижным. При сварке металлических изделий малых сечений стержни 1, 2 приводятся от руки в соприкосновение при помощи рычага 5. При включении тока через рубильник 6 по ним проходит ток большой силы, благодаря чему на поверхности контакта, имеющего наибольшее сопротивление по сравнению с целой частью изделия, произойдет интенсивное выделение тепла. Через некоторый промежуток времени, исчисляющийся обычно несколькими секундами, объем металла вокруг стыка нагревается до

тестообразного состояния, а самая поверхность стыка — до температуры плавления. В этот момент ток в перемычной цепи выключают и увеличивают давление на электроды, сохраняя его в продолжение нескольких секунд, чтобы обеспечить неразрывное соединение обоих изделий. Продолжительность нагревания свариваемых изделий зависит от их сечения и мощности сварочного аппарата.

На одних и тех же машинах стыковая сварка может вестись с оплавлением и без него.



Фиг. 1. Схема машины для стыковой сварки.

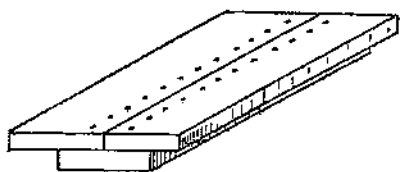
### 3. Точечная сварка

При точечной сварке соединяемые металлические изделия, наложенные внахлестку, свариваются в отдельных точках (фиг. 2—4).

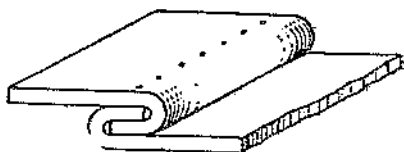
Под „точкой“ подразумевают здесь площадь, равную сечению образованного шва. Площадь точки достигает  $10-15 \text{ мм}^2$  и более.

Точечная сварка применяется для сварки листового материала одинаковой и различной толщины. На фиг. 5 показана сварная точка стали после ее разрушения.

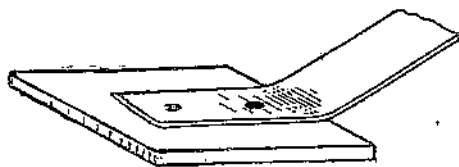
На фиг. 6 дана схема аппарата для точечной сварки. Изделия располагаются между двумя медными электродами 1, укрепленными в зажимах электрододержателя 2. Нижний электрод обычно устанавливается неподвижно, а верхний — вместе с электрододержателем перемещается по вертикали. Изделия зажимаются между электродами до включения тока. Электрический ток большой силы подводится от вторичного витка трансформатора через медный электрод к изделиям и возвращается через второй электрод к вторичной обмотке. В месте прохождения тока сквозь листовое изделие металл разогревается до сварочной температуры, и листы свариваются с образованием на своих наружных поверхностях отпечатка или точки, имеющей форму кружка, соответствующего электроду.



Фиг. 2.

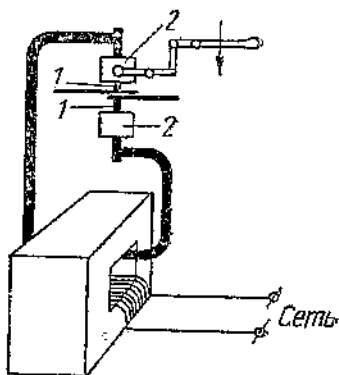


Фиг. 3.

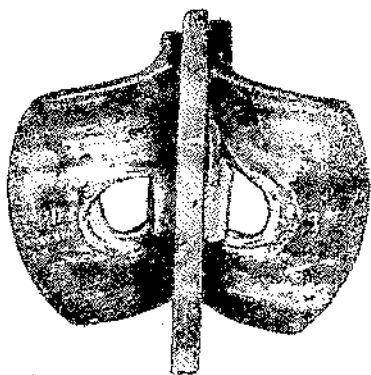


Фиг. 4.

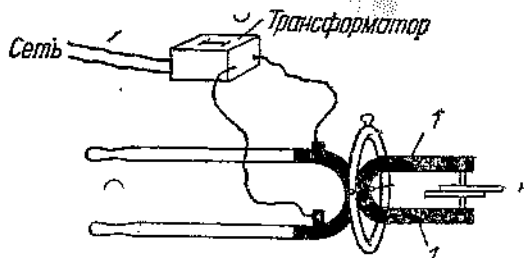
Фиг. 2—4. Виды соединений, произведенных точечной сваркой.



Фиг. 5. Схема машины для точечной сварки.



Фиг. 6. Вид сварочной точки после ее разрушения. Разрыв произошел по целому материалу.

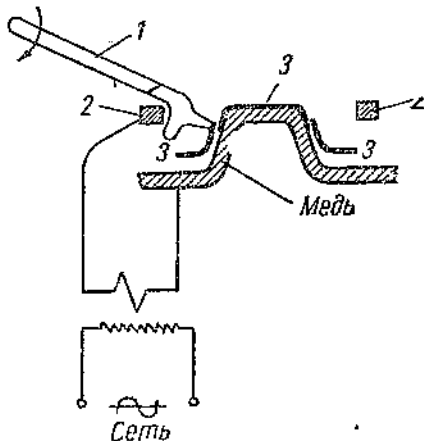


Фиг. 7. Установка для точечной сварки с переносными клещами.

В тех случаях, когда по габаритам изделий оказывается невозможным пользоваться стационарными точечными машинами, применяют установки с переносными точечными клещами (фиг. 7).

Вторичная обмотка трансформатора соединена гибкими кабелями большого сечения с электрододержателями клещей 1. Радиус действия таких клещей зависит от длины кабеля. Давление на электроды осуществляется обычно сжатым воздухом.

На фиг. 8 показан сварочный аппарат с одним переносным электродом в виде ручного рычага. Металлическое изделие укладывается на медный шаблон, представляющий собой один полюс, — ряд колонок 2 служит другим полюсом. Стержень 1 с медным наконечником прижимается выступом к одной из колонок 2, а медным электродом — к изделию 3.



Фиг. 8. Установка для сварки одним электродом в виде рычага.

#### 4. Односторонняя точечная сварка

В тех случаях, когда конфигурация изделия не позволяет производить точечную сварку с нормальным расположением электродов (фиг. 5), применяют точечные машины, у которых токоподводящие электроды расположены с одной стороны (фиг. 9). В этом случае кроме свариваемых листов требуется еще медная массивная прокладка *М*. От вторичного витка ток идет через один электрод, пересекает изделие в месте касания электрода, распределяется по изделию и прокладке обратно пропорционально их электрическому сопротивлению и затем возвращается через второй электрод.

Фиг. 9. Схема односторонней двухточечной сварки.

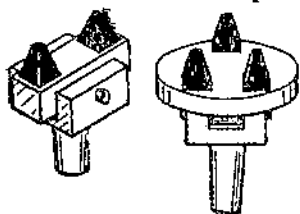
При наличии медной прокладки основной ток протекает по ней. Сварка может производиться также и без



прокладки. Этот вид сварки позволяет сохранить имеющееся защитное покрытие с одной стороны изделия. Металлические фигуры, установленные на советском павильоне Парижской выставки 1937 г., были сварены в ЦНИИМАШ (Москва) односторонней точечной сваркой.

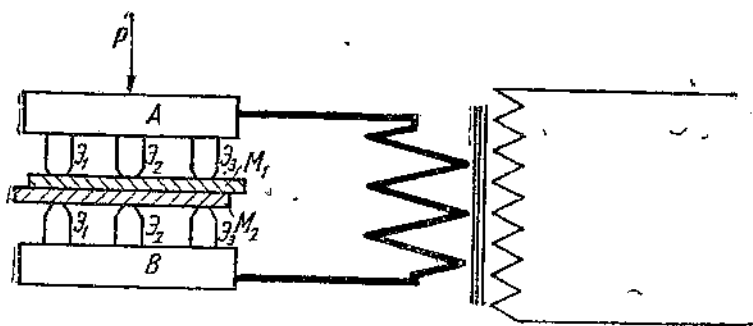
### 5. Многоточечная и рельефная сварка

При многоточечной сварке соединяемые металлические изделия свариваются последовательно через определенные промежутки времени в отдельных точках по заранее установленным на машине электродам. При этом количество электродов соответствует необходимому количеству сварных точек на данном изделии.



Фиг. 10. Электроды для многоточечной сварки и крепление их.

Электроды закрепляются в одном электрододержателе (фиг. 10). Сварка получается одновременно в двух или трех точках. Во вторичной цепи машины (фиг. 11) образуется столько параллельных цепей, сколько имеется пар электродов. Сварные точки получаются одинаковыми в том случае, если поверхности контакта и прилагаемое давление строго одинаковы



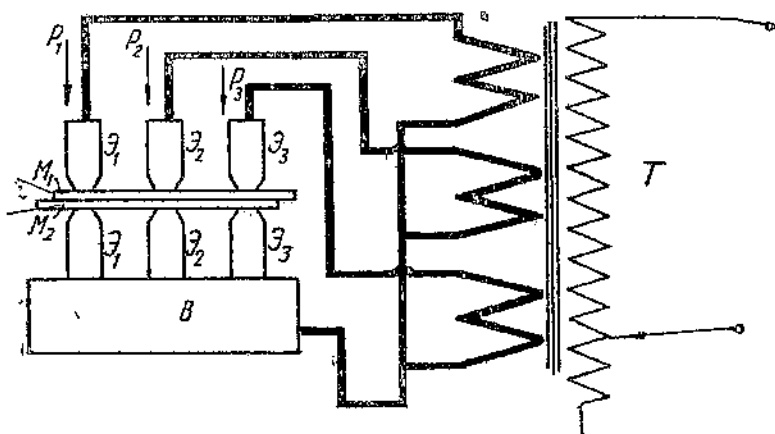
Фиг. 11. Схема многоточечной машины (сварка производится одновременно во всех точках).

во всех точках. Если же материал зачищен не в одинаковой степени или имеет место неравенство диаметров заточки электродов, то в параллельных цепях токи распределяются неравномерно, вследствие чего одни сварные точки окажутся перегретыми, а другие непроваренными.

Для устранения этих недостатков были предложены схемы машин, указанные на фиг. 12 и 13.

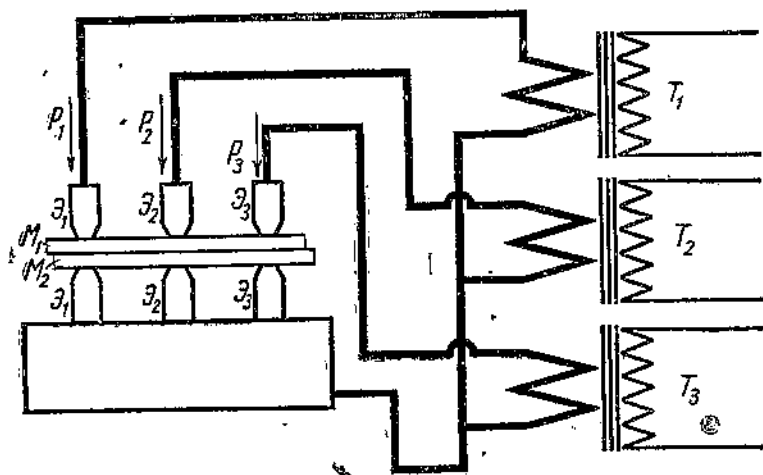
На фиг. 9—15 обозначают:  $P$  — приложенное давление к электродам,  $\mathcal{E}$  — электроды,  $T$  — трансформаторы.

В схеме на фиг. 12 вторичные параллельные цепи разделены отдельными обмотками, сидящими на общем сердечнике трансформатора. Давление на каждый электрод осуществляется



Фиг. 12. Схема машины для многоточечной сварки с отдельными вторичными обмотками, укрепленными на одном трансформаторе.

индивидуально. Дальнейшая модификация схем в этой области показана на фиг. 13, где сварочные цепи отделены друг от друга не только электрически, но и магнитно, т. е. на машине уста-

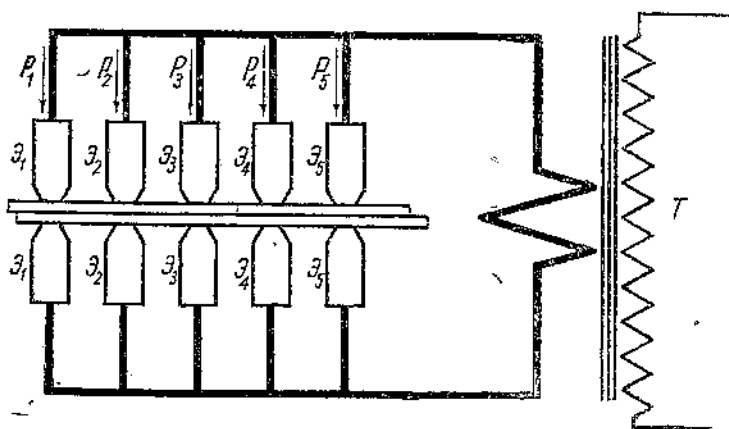


Фиг. 13. Схема многоточечной машины с отдельными трансформаторами.

новлены три совершенно отдельных трансформатора, производящих сварку одновременно в трех точках. Механизмы давления для каждой пары электродов также отделены. Управление сварочным процессом может быть произведено с одного места

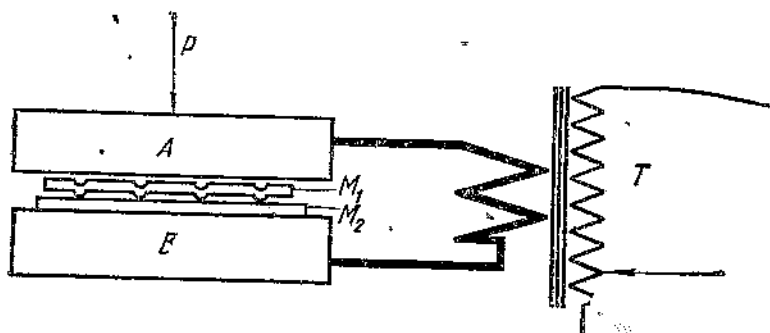
для всех трех трансформаторов как последовательно, так и параллельно.

Следующая схема многоточечных машин, получившая широкое распространение за последнее время, представлена на фиг. 14:



Фиг. 14. Схема многоточечной машины последовательного действия.

здесь электроды присоединены параллельно ко вторичной обмотке трансформатора, но включаютс я они последовательно, одна пара за другой. Преимущества этой схемы заключаются в том, что мощность трансформатора практически не зависит



Фиг. 15. Схема машины для рельефной сварки.

от количества пар электродов ввиду последовательности их включения. Машины подобного типа широко применяются в автопромышленности и известны под названием „Гидроматик“.

Рельефная сварка. Помимо машин для многоточечной сварки последовательного действия получили широкое распространение в промышленности и машины, позволяющие производить сварку во многих точках изделия одновременно. Разрешение этой проблемы пошло по другому пути, чем было указано выше. Вместо отдельных электрических цепей, подводящих ток

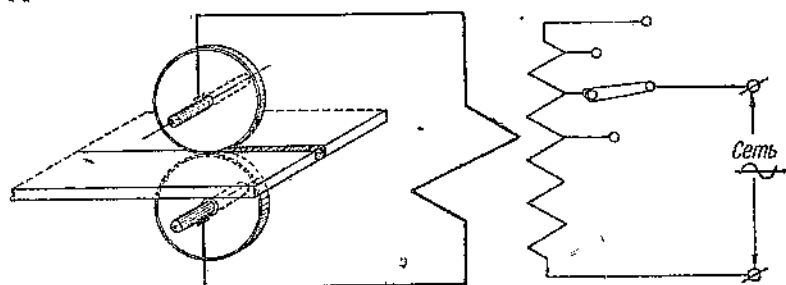
к каждой паре электродов, было предложено предварительно выдавливать отдельные выступы в самом изделии для строгой фиксации каждой сварной точки. Сварочный ток подводится одновременно ко всем выступам. Выступы готовят на одном листе путем штамповки. Этот способ сварки (фиг. 15) называется рельефной сваркой, или сваркой выступами.

Таким образом при рельефной сварке соединение происходит по предварительно подготовленным в металлических изделиях выступам, а подвод электрического тока осуществлен одновременно ко всем выступам. Машины для рельефной сварки позволяют производить одновременно на одной детали до 40—50 точек.

Для большей локализации электрической энергии в каждом выступе электродные плиты *A* и *B* снабжаются дополнительным электродом из тугоплавкого металла и высокой проводимости для каждого выступа в отдельности.

## 6. Роликовая сварка

Роликовая сварка или, как ее еще называют, шовная сварка, является естественным развитием точечной сварки. Непрерывный сварной шов может быть, вообще говоря, получен на точечной машине путем расположения сварных точек рядом, одна за другой. Однако в практическом осуществлении такой спо-

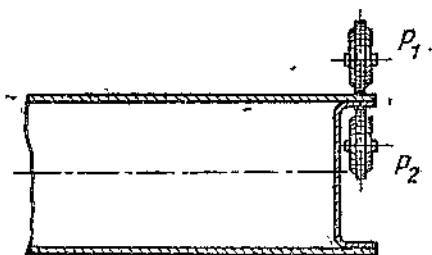


Фиг. 16. Схема машины для роликовой сварки.

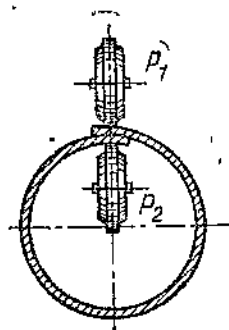
соб оказывается совершенно нерациональным и трудно выполнимым. Поэтому вместо электродов, при точечной сварке имеющих форму стержней, здесь применяются для производства плотных непроницаемых швов круглые вращающиеся электроды (ролики), которые непосредственно соединены при помощи шин со вторичной обмоткой трансформатора и имеют принудительное вращение от дополнительного механизма. На фиг. 16 показана схема процесса роликовой сварки и схема машины. При роликовой сварке соединяемые металлические изделия (положенные внахлестку) свариваются по линии качения ролика при прохождении электрического тока. На фиг. 17—21 показаны виды швов, выполняемых на роликовых машинах.

Касаясь самого термина, следует отметить, что и „шовная“ и „роликовая“ сварка не определяют с достаточной точностью

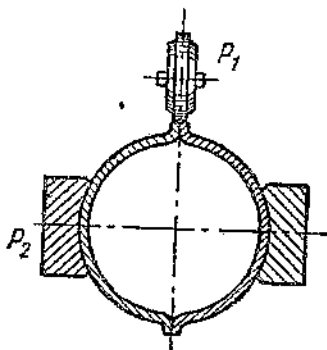
ни процесса сварки, ни вида соединения. Широко распространенный термин „шовная сварка“ совершенно не характеризует процесс. Все виды сварки образуют шов, но при роликовой



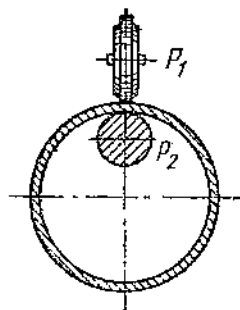
Фиг. 17.



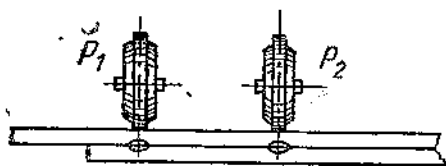
Фиг. 18.



Фиг. 19.



Фиг. 20.



Фиг. 21. Виды односторонней роликовой сварки.

Фиг. 17—21. Различные виды соединений изделий, возможные при роликовой сварке,

$P_1, P_2$  — токоподводящие электроды — ролики.

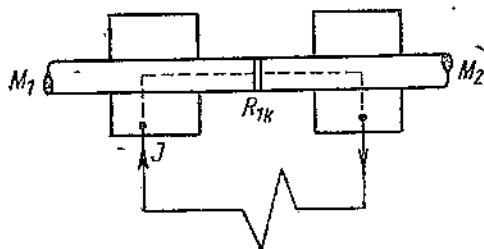
сварке швы, кроме того, могут быть непрерывные и прерывные. Термин „роликовая сварка“ определяет вид сварки по применяемым электродам (роликам), что более точно характеризует самый процесс.

## СОПРОТИВЛЕНИЯ АГРЕГАТА СВАРОЧНОГО КОНТАКТА И ЕГО СОСТАВЛЯЮЩИХ

## 7. Теория сварочного контакта

При контактной сварке сопротивление места соприкосновения двух металлических поверхностей (сопротивление сварочного контакта) играет исключительную роль.

При стыковой сварке сопротивление контакта резко отличается от сопротивления контакта при точечной или роликовой сварках. Здесь имеет место не только количественное отличие сопротивлений контакта, но и величина одновременных контактов, образующихся в месте сварки, также иная. В самом деле, при стыковой сварке стержней (фиг. 22) по пути сварочного тока  $I$ , протекающего через стержни  $M_1$  и  $M_2$ , имеется



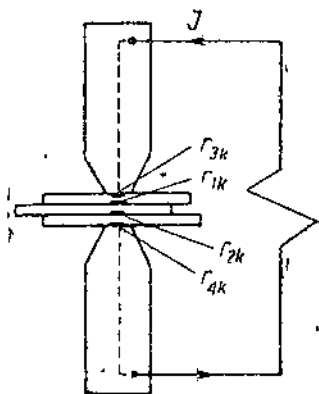
Фиг. 22. Вид контакта при стыковой сварке.

$M_1, M_2$  — свариваемые стержни.

сопротивление одного контакта  $R_{1k}$ , между тем как при точечной, или роликовой сварках имеются несколько соединенных последовательно контактных сопротивлений, не говоря уже о сопротивлении свариваемых материалов.

На фиг. 23 показана схема точечной сварки трех листов с четырьмя контактами: два в месте сварки листов и два между свариваемыми листами и электродами.

Представим себе идеальный случай, когда электроды  $M_1$  и  $M_2$  (фиг. 22) полностью соприкасаются; тогда при переходе тока от одного электрода к другому никакого контактного сопротивления не будет. Однако полного физического соприкосновения, даже в тщательно обработанных контактных поверхностях, на практике не наблюдается. Под микроскопом поверхность таких контактов выглядит неровной, состоящей из выступов и бороздок разной глубины, вследствие чего касание возможно лишь в нескольких точках поверхности. Если бы поверхность была идеально ровной, происходило бы срачивание материала, и для



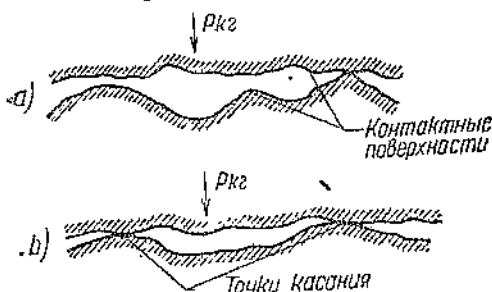
Фиг. 23. Обозначение контактных сопротивлений при точечной сварке нескольких листов.

$r_{1k}, r_{2k}$  — внутренние сопротивления контактов между свариваемыми изделиями;  $r_{3k}, r_{4k}$  — сопротивления контактов между каждым электродом и изделием;  $r_1$  — суммарное сопротивление всего контакта.

разрыва контакта пришлось бы приложить усилие, равное примерно временному сопротивлению разрыву в этом сечении металла. Поэтому обычно вместо принятого положения (что протекание тока происходит по всему сечению контакта) следует признать, что ток протекает через одну или две-три элементарные точки, представляющие собой микроскопические площадки, а сопротивление контакта будет больше сопротивления данного металла (фиг. 24).

Сопротивление контакта  $R_k$  является омическим, и потери в нем выражаются известным уравнением

$$W_k = I^2 R_k.$$



Фиг. 24. Вид касающихся контактов при большом увеличении электродов.

*a* — при малом давлении на электроды; *b* — при значительном давлении на электроды.

Сопротивление в контакте  $R_k$  обратно пропорционально давлению.

При небольших давлениях на электроды касание происходит только в одной физической точке. На фиг. 24 изображены контакты при большом увеличении; верхняя схема *a* показывает касание контактов при малом давлении на электроды, а нижняя *b* — при значительном давлении.

В местах касания площадок между собой предполагается отсутствие какого-либо сопротивления. Длина пути тока через элементарные площадки незначительна, но малые поперечные сечения каждой площадки суживают эти пути и представляют собой значительное сопротивление для прохождения полного тока: это и есть контактное сопротивление.

Если представить себе касание элементарной физической точки (фиг. 24) в виде элементарной пирамиды, то вывод уравнения контактного сопротивления для одинаковых металлов мы получим, приняв условно физическую точку касания за элементарную четырехгранную пирамиду с квадратным основанием (фиг. 25).

Сопротивление элементарного объема с толщиной  $dx$  выразится:

$$dR = \rho \frac{dx}{y^2}, \quad (1)$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление металла, остальные обозначения по фиг. 25.

При наличии некоторого давления на электродах рассматриваемые пирамиды сплющатся и превратятся в усеченные. Сопротивление обеих пирамид от основания до высоты  $x$

$$R = 2\rho \int_0^x \frac{dx}{y^2}.$$



Для рассмотренных пирамид имеет место следующее соотношение:

$$\frac{Y}{a} = \frac{l-x}{l}, \quad (2)$$

откуда

$$Y = a \frac{l-x}{l}.$$

Подставляя значение  $Y$  в подинтегральное выражение, получим:

$$R_k = 2\rho \frac{l^2}{a^2} \int_0^x \frac{dx}{(l-x)^2}$$

или

$$R_k = 2\rho \frac{l^2}{a^2} \left( \frac{1}{l-x} + C_1 \right). \quad (2')$$

Постоянная интегрирования  $C_1$  определяется из граничных условий  $x=0, R_k=0$ ; или  $\frac{1}{l-x} + C_1 = 0$ ; следовательно,

$$C_1 = -\frac{1}{l};$$

окончательное выражение сопротивления контакта:

$$R_k = 2\rho \frac{l^2}{a^2} \left( \frac{1}{l-x} - \frac{1}{l} \right). \quad (3)$$

Это уравнение показывает зависимость между контактным сопротивлением  $R_k$  и изменением высоты пирамид  $l$ .

При увеличении давления, когда элементарные пирамиды все более сплющиваются, сопротивление контакта уменьшается. Это также явствует из уравнения (3) при  $x=0, R_k=0$ . Если же давление контакта уменьшить до нуля, то  $x=l$ , касание нарушается и сопротивление стремится к бесконечности.

Уравнение, связывающее сопротивление контакта с приложенным к электродам давлением выразится:

$$F = \frac{P}{\sigma} \quad \text{или} \quad P = F\sigma = Y^2\sigma,$$

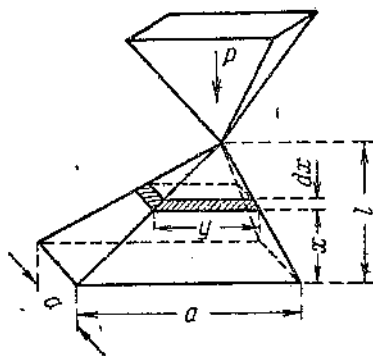
где  $F$  — поверхность касания контакта;

$P$  — усилие, приложенное к контактам;

$\sigma$  — разрушающее усилие материала контакта в условиях сжатия.

Подставляя вместо  $Y$  его значение из уравнения (2), найдем

$$P = \sigma a^2 \left( \frac{l-x}{l} \right)^2.$$



Фиг. 25. Условная точка касания.

После решения этого уравнения получим:

$$x = l \left( 1 - \frac{1}{a} \sqrt{\frac{P}{\sigma}} \right).$$

Заменяя в уравнении (3) значение  $x$ , получаем выражение для контактного сопротивления:

$$R_k = 2\rho \frac{l}{a^2} \left( \sqrt{\frac{a^2 \sigma}{P}} - 1 \right). \quad (4)$$

Размеры  $l$  и  $a$ , зависящие от метода обработки контактных поверхностей, практически неопределимы, поэтому преобразуем уравнение (4):

$$R_k = 2\rho \frac{l}{a} \sqrt{\frac{\sigma}{P}} - 2\rho \frac{l}{a^2}. \quad (5)$$

Обозначая  $r_1 = 2\rho \frac{l}{a} \sqrt{\frac{\sigma}{P}}$  и  $\beta = 2\rho \frac{l}{a^2}$ , получаем:

$$R_k = \frac{r_1}{\sqrt{P}} - \beta.$$

Экспериментальные исследования различных материалов показали, что величиной  $\beta$  можно пренебречь; тогда окончательное выражение сопротивления в контакте будет

$$R_k = \frac{r_1}{\sqrt{P}}. \quad (6)$$

Уравнение (6) справедливо для такого контакта, у которого касание поверхностей происходит в одной точке, например, контакт между полусферическими электродами.

Из уравнения (6) явствует весьма важное следствие: если давление на контакты равно 1 кг, то  $R_k = r_1$ . Коэффициент  $r_1$  будет тем меньше, чем мягче материал контактов и чем больше его проводимость;  $r_1$  определяется исключительно экспериментальным путем и представляет собой сопротивление в контакте при давлении на электроды, равном 1 кг.

Как видно из фиг. 24, с увеличением давления на контакты контактная поверхность физической точки возрастает, а число касающихся точек в контакте увеличивается. Очевидно при общем давлении на контакт, равном  $P$ , и количестве физических точек касания контакта  $n$  давление, приходящееся на каждую отдельную точку,

$$P_n = \frac{P}{n}.$$

Сопротивление каждой отдельной точки

$$R_n = \frac{r_1}{\sqrt{\frac{P}{n}}}. \quad (7)$$

Общее сопротивление контакта, имеющего  $n$  точек касания, включенных между собой параллельно, будет

$$R_k = \frac{R_n}{n} = \frac{r_1}{\sqrt{nP}}. \quad (8)$$

Далее представим себе наиболее крайний случай, приняв, что увеличение числа контактных точек прямо пропорционально приложенному давлению, т. е.  $P = c \cdot n$ , где  $c$  — коэффициент пропорциональности; подставив  $n = \frac{P}{c}$  в уравнение (8), получим:

$$R_k = \frac{r_1}{\sqrt{\frac{P^2}{c}}} = \frac{r_1}{P \sqrt{\frac{1}{c}}}$$

или

$$R_k = \frac{r_1'}{P}, \quad (9)$$

где

$$r_1' = \frac{r_1}{\sqrt{\frac{1}{c}}}$$

При сравнении уравнений (6) и (9) легко убедиться, что сопротивление контакта в более общем виде может быть написано так:

$$R_k = \frac{r_1}{P^\alpha}. \quad (10)$$

Показатель степени  $\alpha$  зависит от формы и состояния контакта. Он меняется в пределах от 0,5 до 1. Значение коэффициента  $\alpha$  зависит еще от того, изменяется ли давление в сторону увеличения или в сторону уменьшения. При убывании давления количество элементарных площадок касания контакта уменьшается медленнее благодаря наличию остаточных деформаций.

Для односточечного контакта (например, электроды с закругленными концами или закругленный электрод и плоскость при условии свежезачищенных поверхностей)  $\alpha = 0,5$ , а для контакта, образующегося между двумя параллельными плоскостями,  $\alpha \approx 1$ .

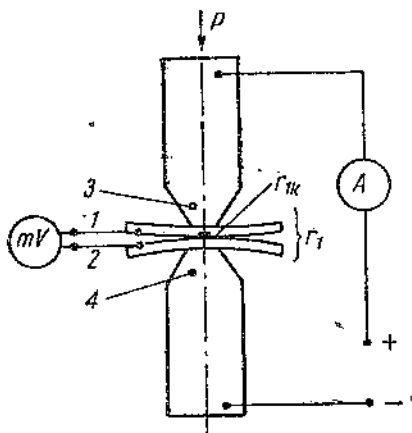
Обращаясь к уравнениям (9) и (10), легко заметить, что размеры контактной поверхности не входят в эти уравнения, так как контактное сопротивление обуславливается элементарными площадками, величина которых определяется свойствами материала, приложенным давлением и формой контактов.

Экспериментальные исследования, проведенные различными авторами, подтверждают правильность вывода о том, что величина поверхности контакта не влияет на его сопротивление, но размеры поверхности электродов играют весьма большую роль и они должны выбираться с учетом необходимой механической прочности, электрической проводимости и теплоотдачи от сварочного контакта.

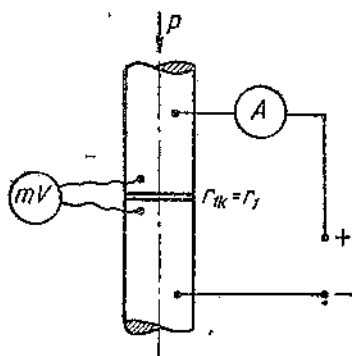
## 8. Опытные коэффициенты единичного сопротивления сварочного контакта

Чтобы определить величину сопротивления сварочного контакта в зависимости от давления по уравнению (10), необходимо найти величины  $r_1$  и  $\alpha$ .

Как явствует из схемы фиг. 26, сопротивление  $r_1$ , найденное подобным образом между точками 3—4, представляет собой сумму сопротивлений трех контактов (два между электродами и св-



Фиг. 26. Схема измерения сопротивления сварочных контактов при точечной сварке.



Фиг. 27. Схема измерения сопротивления сварочных контактов при стыковой сварке.

рочным материалом 1 и 3; 2 и 4 и один между свариваемыми листами 1 и 2), сопротивления столбиков свариваемого металла и конусной части электродов.

Помимо суммарного сопротивления контакта  $r_1$  (при давлении на электроды, равном 1 кг) представляет большой интерес при расчетах распределение

сопротивления в отдельных частях точечного контакта под электродами.

Определение величины сопротивления в самом сварочном контакте  $r_{1k}$  без учета сопротивлений контактов между электродами и материалом, а также сопротивления столбика металла производится по экспериментальной схеме, указанной на фиг. 26—28, в точках 1 и 2. Точки 3 и 4 нужны для измерения полного сопротивления  $r_1$ .

Фиг. 28. Схема измерения сопротивления сварочных контактов при рельефной сварке.

Значения  $r_1$  и  $r_{1k}$  для разных материалов приводятся в табл. 2; все данные единичного сопротивления  $r_1$  представляют собой полное сопротивление всего агрегата точечного контакта между электродами (обозначения по фиг. 23, 26—28), так как

$$r_1 = r_{1k} + r_{2k} + r_{3k} + r_{4k} + r_{5k} + r_{M1} + r_{M2} + \dots,$$

где  $r_M$  — сопротивление металла листа.

Значения коэффициентов  $r_1$  и  $r_{1к}$  для контактов из различных металлов

Материал образцов	Количество и толщина листов мм	$r_1$ в $\Omega$	$r_{1к}$ в $\Omega$
Алюминий . . . . .	0,5 + 0,5	0,005	0,001
" . . . . .	1 + 1	0,006	0,0012
Дуралюмин плакированный, каленый	1 + 1	0,006	0,0015
То же . . . . .	1,5 + 1,5	0,007	0,0015
" . . . . .	2 + 2	0,007	0,0015
" . . . . .	2 + 2 + 2	0,010	—
" . . . . .	2 + 2 + 2 + 2	0,012	—
Электрон . . . . .	1 + 1	0,010	0,0030
То же . . . . .	1 + 1 + 1	0,013	—
" . . . . .	1 + 1 + 1 + 1	0,020	—
Сталь хромансиль, С = 0,28%	1,5 + 1,5	0,020	0,006
То же . . . . .	1,5 + 1,5 + 1,5	0,030	—
Сталь хромансиль, С = 0,36%	1,5 + 1,5	0,02	0,006
Сталь хромомолибденовая	3 + 3	0,016	0,0065
Сталь (М) . . . . .	3 + 3	0,016	0,0065
Железо 0,5 + 0,5 мм	0,5 + 0,5	0,012	0,045
Железо 1 + 1 мм	1 + 1	0,022	0,005
" 1 + 1 + 1 мм	1 + 1 + 1	0,034	—
Сталь (18-8) нержавеющей	0,1 + 0,1	0,018	0,006
То же . . . . .	0,1 + 0,1 + 0,1	0,022	—
" . . . . .	0,1 + 0,1 + 0,1 + 0,1	0,040	—
" . . . . .	0,2 + 0,2	0,020	0,0050
" . . . . .	0,2 + 0,2 + 0,2	0,30	—
" . . . . .	0,2 + 0,2 + 0,2 + 0,2	0,04	—
" . . . . .	0,3 + 0,3	0,025	0,005
" . . . . .	0,6 + 0,6	0,030	0,0055
" . . . . .	0,6 + 0,6 + 0,6	0,035	—
" . . . . .	0,6 + 0,6 + 0,6 + 0,6	0,050	—

Примечание. Образцы во всех случаях были зачищены с обеих сторон.

При вычислении балансов напряжения и энергии необходимо знать как внутреннее сопротивление контакта  $r_{1к}$ , так и полное единичное сопротивление сварочного контакта  $r_1$ . Следует иметь в виду, что для каждого вида контактной сварки важно знать порядок единичного сопротивления, так как сортамент свариваемых металлов и условия сварки настолько многообразны, что абсолютное значение единичного сопротивления в контакте возможно получить только при непосредственном измерении и лишь в лабораторных условиях. Зачистка образцов производится для удаления оксидной пленки.

В табл. 3 даны величины единичного сопротивления для контакта рельефной сварки. В табл. 4 помещены величины единичного сопротивления для стыковой сварки.

## Коэффициент единичного сопротивления для одноточечного контакта рельефной сварки

Сорт металла и состояние контакта	Количество и толщина листов мм	Среднее значение сопротивления $r_1$ в $\Omega$	Среднее значение $r_{1к}$ в $\Omega$
Черное листовое железо (хорошо зачищено) . . . . .	0,35 + 0,35	0,0082	} $r_{1к} = 0,004 \Omega$
То же . . . . .	0,5 + 0,5	0,015	
" . . . . .	1 + 1	0,011	
" . . . . .	1,75 + 1,75	0,012	
" . . . . .	2,5 + 2,5	0,0150	
Алюминий (поверхность хорошо очищена) . . . . .	1 + 1	0,0035	} 0,0006
Дуралюмин (хорошо очищен) . . . . .	0,85 + 0,85	0,0032	
То же . . . . .	1,4 + 1,4	0,00315	
Нержавеющая сталь (зачищена) . . . . .	0,1 + 0,1	0,0185	0,008
То же . . . . .	0,2 + 0,2	0,0215	0,007

Из табл. 4 можно сделать вывод, что единичное сопротивление стыкового контакта не зависит от сечения стержней и лежит в пределе  $0,0025 \div 0,005 \Omega$ .

Среднее значение  $r_{1к}$  для стыкового контакта, как видно из этой таблицы, для мягкого железа равно  $0,0035$ . Сравнивая еди-

Таблица 4

Коэффициент единичного сопротивления  $r_{1к}$  для хорошо зачищенного контакта стыковой сварки

Материал	Размер торца мм	Среднее значение сопротивления $r_{1к}$ в $\Omega$
Мягкое железо . . . . .	$d = 10$	0,0027
" . . . . .	$d = 15$	0,0050
" . . . . .	$d = 20$	0,0025
" . . . . .	$d = 30$	0,0047
" . . . . .	$30 \times 30$	0,0025
Красная медь . . . . .	$d = 10$	0,0001

ничное сопротивление стыкового контакта железных и медных стержней, получаем весьма важный вывод, что сопротивление контакта железных стержней примерно в 35 раз больше сопротивления контакта красной меди. Этот вывод совпадает с данными опытов лаборатории им. проф. Смурова, представленных в табл. 5. В этой таблице даны величины относительных сопротивлений свежезачищенных контактов из раз-

личных металлов в сравнении с сопротивлением медных контактов, принятым равным единице.

Указанные данные включают в себя также и сопротивление металла самых контактов.

Физические явления в контакте при роликовой сварке ничем не отличаются от явлений в точечном контакте, поэтому вычисление сопротивлений для роликового контакта производится точно так же, как и для точечного.

## Относительные сопротивления контактов из различных металлов

Материал контактов	Cu — Cu	Cu — Al	Al — Al	Латунь — латунь	Cu — Fe	Fe — Fe
Относительная величина сопротивления . . . . .	1,0	1,3	1,5÷2,5	1,8÷2,5	7,0	35,0

Величина сопротивления окисленных поверхностей металла<sup>1</sup> зависит от степени их окисления (величины оксидной пленки). Оксидная пленка является полупроводником, и поэтому сопротивление этой пленки в несколько раз больше сопротивления самого металла. Материалы из цветных металлов и легких сплавов покрываются оксидной пленкой в атмосфере воздуха очень быстро, даже непосредственно после их зачистки. Опыты по измерению сопротивления контакта показали, что оксидная пленка на поверхности металла неоднородна. Механические свойства пленки резко отличаются от свойств самого металла, — она весьма хрупка. Поэтому пленка, покрывающая элементарные выступы контакта, быстрее разрушается от усилия, чем деформируется основной материал. Сварка происходит при разрушенной пленке. Однако в контактах между электродом и изделием все же необходимо предварительно снять пленку для уменьшения вредного сопротивления при сварке.

В связи с этим подготовка сварочного контакта играет весьма важную роль, поэтому необходимо уменьшить сопротивление контакта между каждым электродом и деталью путем специальной очистки этих мест непосредственно перед сваркой.

Кроме того, для уменьшения потерь, электропроводность материала электродов должна быть гораздо выше электропроводности свариваемого металла.

Однако существует условие, при котором основной металл не должен подвергаться какой-либо механической обработке, например, если поверхность металла покрыта антикоррозионным оксидным слоем определенной толщины. Это условие является наиболее тяжелым при разработке технологического процесса сварки, так как сопротивление сварочного контакта до разрушения оксидных пленок на образцах в 4—10 раз более контактного сопротивления при частично разрушенных покрытиях.

Следует иметь в виду, что величины единичного сопротивления контакта различных металлов не находятся в строгом соответствии с их удельным сопротивлением. Это, повидимому, объясняется различием физической природы образования оксидных пленок, не поддающихся в одинаковой степени механической обработке.

<sup>1</sup> Здесь речь идет об естественном окислении металлов.



## 9. Определение коэффициента $\alpha$

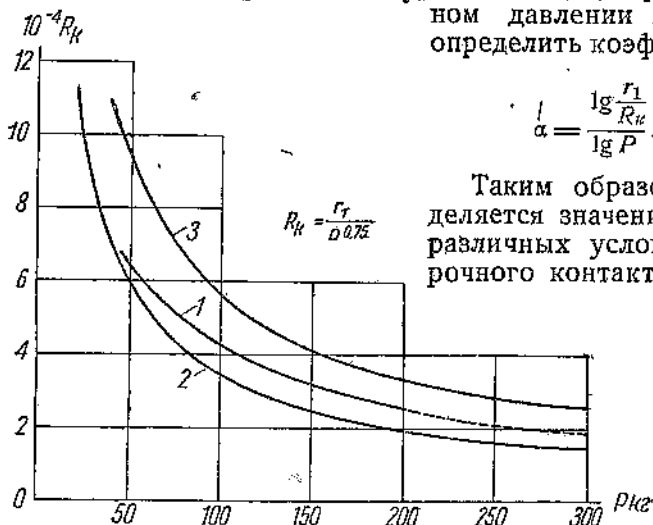
Для практического использования уравнения (10) необходимо знать значение коэффициента  $\alpha$  в условиях сварочного контакта.

Автором были впервые проведены опыты по измерению сопротивления сварочного контакта<sup>1</sup>, применяемого при точечной сварке (для различных металлических листов), в зависимости от приложенного к электродам давления, и были построены кривые  $R_k = f(P)$ .

Для металлов, указанных в табл. 2, уже известно единичное сопротивление контакта  $r_1$ ; тогда из уравнения (10) при заданном давлении  $P$  легко определить коэффициент  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{\lg \frac{r_1}{R_k}}{\lg P}$$

Таким образом определяется значение  $\alpha$  для различных условий сварочного контакта.



Фиг. 29. Сопротивление точечного контакта алюминиевых листов толщиной 1 мм со слегка зачищенными поверхностями.

1 — опытная кривая для листов 1+1 мм; 2 — расчетная кривая для листов 1+1 мм; 3 — то же для листов 1+1+1 мм.

Проведенные исследования показали, что в случае применения электродов из красной меди коэффициент  $\alpha$  для точечного и роликового контакта листов из легких сплавов равен  $0,75 \div 0,85$  (в зависимости от состояния контакта). Для самолетных и малоуглеродистых сталей, а также нержавеющей стали,  $\alpha = 0,65 \div 0,75$ .

На фиг. 29 представлены графики (опытный и расчетные) контактного сопротивления для алюминиевых<sup>2</sup> листов с зачищенными поверхностями  $\alpha = 0,75$ .

Как видно из кривых на фиг. 29, сопротивление сварочного контакта резко меняется в зависимости от приложенного давле-

<sup>1</sup> См. статьи Кислюка Ф. И., опубликованные в журналах: Автогенное дело № 8, 1937. Техника воздушного флота № 8, 1938.

ния на электроды до определенной величины. Затем наступает момент, когда кривая  $R_k = f(P)$  асимптотически приближается к некоторому постоянному значению. Эти величины различны для отдельных сортов металла, и выбор величины усилия на электроды должен производиться из условий величины и характера свариваемого металла, а также от применяемых электродов. Однако значение давления должно быть выбрано таким, чтобы в графике функции  $R_k = f(P)$  оно находилось в более пологой части (с правой стороны), минуя колено кривой.

*Пример 1.* Вычислить внутреннее и полное сопротивление точечного контакта дуралюминовых листов толщиной  $1 + 1$  мм со слегка зачищенными наружными поверхностями, если приложенное к электродам давление  $P = 180$  кг;  $r_1 = 0,015$  Ω;  $r_{1k} = 0,0012$  Ω;  $\alpha = 0,7$ . Вычислить также падение напряжения в сварочном контакте (между электродами) и теряемую мощность, если величина сварочного тока  $I = 6000$  А.

Внутреннее сопротивление контакта по формуле (10)

$$R_{1k} = \frac{0,0012}{180^{0,7}} = \frac{0,0012}{38} = 0,0000315 \text{ } \Omega.$$

Полное сопротивление сварочного контакта

$$R_1 = \frac{0,015}{180^{0,7}} = \frac{0,015}{38} = 0,00039 \text{ } \Omega.$$

Падение напряжения во всем контакте

$$I R_k = 6000 \cdot 0,00039 = 2,35 \text{ V.}$$

Мощность, теряемая во всем контакте,

$$I^2 R_k = 6000^2 \cdot 0,00039 = 14,0 \text{ kW.}$$

## 10. Изменение сопротивления контакта от температуры

Повышение температуры контакта при сварке вызывает, как во всех металлических проводниках, увеличение удельного сопротивления материала контакта. С повышением температуры будет уменьшаться твердость материала контакта и при заданном давлении на электроды увеличится одновременно площадь действительного касания (увеличение элементарных путей тока), поэтому увеличение сопротивления в контакте от температуры происходит медленнее, чем увеличение удельного сопротивления материала в целом проводнике.

Опыты, проведенные автором<sup>1</sup>, показали, что амплитудные значения тока (по осциллограммам) в начальный момент сварки примерно на 30—40% больше амплитуд тока в момент завершения сварки. Следовательно, в этих пределах, можно предполагать, растет и сопротивление контакта в зависимости от изменения температуры.

<sup>1</sup> См. фиг. 82 на стр. 93.

## ТЕОРИЯ И ФИЗИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СВАРКИ МЕТОДОМ СОПРОТИВЛЕНИЯ

### 11. Физические свойства некоторых металлов, влияющие на свариваемость

Как известно, существует три способа отдачи тепла нагретыми телами: теплопроводность, лучеиспускание и конвекция. Теплопроводность обозначается обычно греческой буквой  $\lambda$ . Теплопроводность может быть выражена:

- 1) в физической системе измерений [ $\text{кал}/\text{см} \cdot \text{сек} \cdot ^\circ\text{C}$ ];
- 2) в теплотехнической системе измерений [ $\text{кал}/\text{м} \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{C}$ ];
- 3) в электротехнической системе измерений [ $\text{W}/\text{см} \cdot ^\circ\text{C}$ ].

Обычно значения  $\lambda$  приводятся в физической системе измерений, но для электротехнических расчетов более удобной является электротехническая система измерений.

Для перевода коэффициента теплопроводности из физической системы измерений в электротехническую надо помножить  $\lambda_{\text{физ}}$  на 4,18, а из физической системы в теплотехническую — на 360.

Другие явления теплоотдачи (лучеиспускание и конвекция) играют малую роль в сварочном процессе, так как контактная сварка протекает обычно в короткие промежутки времени, порядка нескольких секунд и меньше. В связи с этим потери тепла лучеиспусканием и конвекцией будут незначительными (по сравнению с потерями от теплопроводности) и ими можно пренебречь.

### 12. Факторы, влияющие на теплопроводность металла

Теплопроводность железа при разных температурах дана в табл. 6.

Таблица 6

Теплопроводность железа  $\lambda$  [ $\text{W}/\text{см} \cdot ^\circ\text{C}$ ] в зависимости от температуры нагревания

$t^\circ$	20°	100°	200°	300°	400°	500°	600°	700°	800°	900°
$\lambda$	0,56	0,55	0,52	0,486	0,444	0,406	0,364	0,335	0,322	0,314

Теплопроводность стали, как известно, меняет свое значение в зависимости от весового содержания компонентов: С, Si, Mn и т. д.

Закалка металла понижает теплопроводность. Механическая обработка металла (проковка, волочение) способствует повышению теплопроводности.

Теплопроводность  $\lambda$  [W/см·°C] углеродистой стали при разных температурах

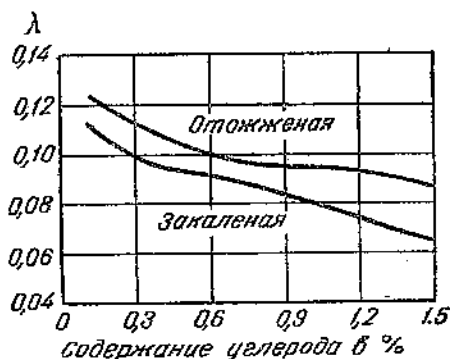
Сорт стали	Количество углерода %	Температура			
		100°	300°	600°	900°
Шведское железо . . . . .		0,445	0,50	0,377	0,335
Сталь, содержащая . . . . .	0,1	0,445	0,46	0,377	0,335
" " " " . . . . .	0,3	0,418	0,377	0,298	0,298
" " " " . . . . .	0,6	0,418	0,418	0,335	0,293
" " " " . . . . .	1,0	0,440	0,418	0,377	0,335
" " " " . . . . .	1,5	0,377	0,355	0,335	0,293

На фиг. 30 даны две кривые, характеризующие влияние закали и отжига металла на величину коэффициента теплопроводности.

С повышением температуры металла коэффициент теплопроводности уменьшается. В табл. 7 помещены значения углеродистой стали различного состава в зависимости от температуры нагрева.

### 13. Теплоемкость металлов

В табл. 8 даны формулы расчета теплоемкости в зависимости от температуры нагрева для наиболее ходовых металлов. Публикуемые здесь данные теплоемкости имеют размерность [W сек/г·°C].



Фиг. 30. Зависимость теплопроводности [кал/см·сек·°C] железоуглеродистых сплавов (0,5% Mn, 0,2% Si) при 20° C от количества содержания углерода.

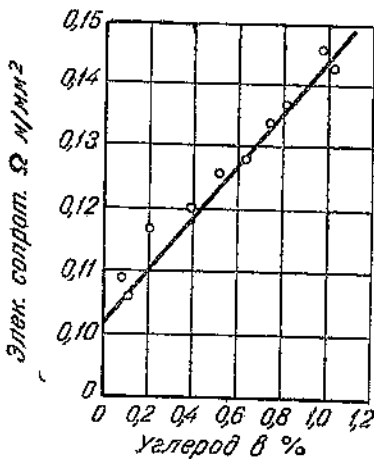
### 14. Удельное сопротивление металлов

Между удельным сопротивлением  $\rho$  металла и его химическим составом существует определенная зависимость. Даже при малых концентрациях примесей, образующих, например, с железом твердые растворы, удельное сопротивление металла повышается очень сильно. Однако в сплавах с гетерогенной смесью двух видов кристаллов, не обладающих взаимной растворимостью, удельное сопротивление меняется в зависимости от состава и приблизительно пропорционально количеству примеси.

Формулы подсчета теплоемкости некоторых металлов при различной температуре

Металл	Температурный интервал	Теплоемкость [Wсек/г·°C]
Алюминий . . . . .	0—500°	$0,87 + 0,217 \times 10^{-3} \times T + 0,716 \times 10^{-7} \times T^2$
Железо . . . . .	0—620°	$0,458 + 0,104 \times 10^{-3} \times T + 0,229 \times 10^{-6} \times T^2$
Медь . . . . .	0—1083°	$0,391 + 0,74 \times 10^{-4} \times T$
Свинец . . . . .	0—300°	$0,1238 + 0,283 \times 10^{-4} \times T$
Цинк . . . . .	0—300°	$0,378 + 0,937 \times 10^{-4} \times T$
Никель . . . . .	0—230°	$0,452 + 0,98 \times 10^{-4} \times T$
„ . . . . .	230—400°	$0,765 + 0,234 \times 10^{-2} \times T + 0,582 \times 10^{-5} \times T^2$
„ . . . . .	400—1050°	$0,412 + 0,257 \times 10^{-3} \times T$

На фиг. 31 показана зависимость значения удельного сопротивления от количества углерода в отожженных сплавах железа.



Фиг. 31. Зависимость удельного электрического сопротивления отожженных сплавов железа от количества содержания углерода (в процентах).

Для вывода уравнения этого процесса представим себе случай стыковой сварки двух металлических стержней силой тока постоянной величины. Через электроды  $A_1, A_2$  подводится ток к двум стержням одинакового металла  $MM$ . Силой  $P$  стержни прижаты друг к другу и касаются торцами (фиг. 32). Температура на противоположных концах стержня весьма различна. Тепловой поток, протекающий по стержню от нагретого края (в месте контакта) к менее нагретому, осуществляет передачу

Изменение удельного сопротивления от температуры  $\rho_T$  в непрерывном металле определяется формулой

$$\rho_T = \rho_0 (1 + \alpha_T).$$

Однако для сопротивления в сварочном контакте, где  $\rho_0$  — удельное сопротивление при нормальной температуре, эта формула недействительна.

### 15. Общее уравнение нагрева металла при сварке методом сопротивления

Рассмотрим процесс нагрева металлических стержней, протекающий при сварке методом сопротивления, при условии изменения температуры лишь в направлении продольной оси стержня.

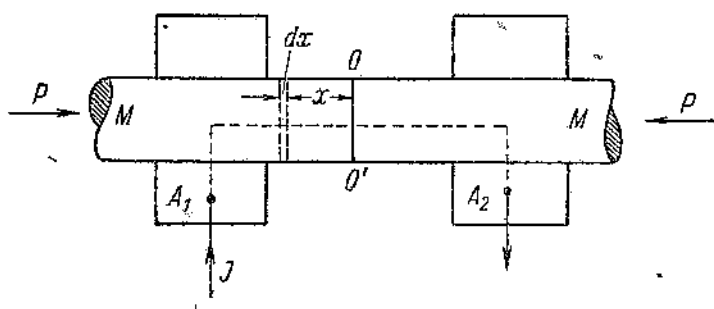
тепла вдоль стержня и стремится при этом выравнять температуру отдельных точек стержня.

В месте контакта  $OO'$ , где генерируется тепло, температура нагрева будет наивысшей. По мере удаления от контакта температура понижается.

При заданном токе температура нагрева зависит еще от продолжительности прохождения тока  $t$ , следовательно, температура в каждой отдельной точке стержня выражается одновременно функцией времени  $t$  и расстояния от контакта  $x$ , т. е.

$$T_x = f(x, t).$$

Принимаем температуру одинаковой по всему поперечному сечению стержня для данного момента времени  $t$ , а распространение тепла вдоль стержня — линейным. Количество тепла, про-



Фиг. 32. Стыковая сварка силой тока постоянной величины.

текающее вследствие теплопроводности через сечение стержня, на расстоянии  $x$  от места контакта  $OO'$  в течение времени  $dt$  выразится:

$$dQ_x' = -\lambda q \frac{\partial T}{\partial x} \cdot dt, \quad (11)$$

где  $q$  — сечение стержня в  $см^2$ ;

$\lambda$  — теплопроводность металла [ $W/см \cdot ^\circ C$ ];

$Q_x'$  — количество тепла в  $W$  сек.

$T$  — температура стержня.

Знак минус в уравнении (11) показывает, что тепловой поток имеет направление от более горячего места (стыка) к более холодному. Тепловой поток  $\Phi$  вдоль стержня, т. е. количество тепла, протекающее через сечение стержня  $q$  на расстоянии  $x$  (от контакта) в единицу времени, пропорционален коэффициенту теплопроводности  $\lambda$ , сечению стержня  $q$  и скорости изменения температуры вдоль стержня  $\frac{\partial T}{\partial x}$ , т. е.

$$\Phi_x = -\lambda q \frac{\partial T}{\partial x},$$

откуда

$$\Phi_x = \frac{dQ_x}{dt}. \quad (12)$$

Для бесконечно близкого сечения  $q_{x+dx}$  температура в данный момент времени будет отличаться от  $T$  и равна по абсолютной величине:

$$T + \frac{\partial T}{\partial x} \cdot dx,$$

тогда количество тепла, проходящее через сечение стержня на расстоянии от контакта  $x + dx$ , равно:

$$dQ'_{x+dx} = -\lambda q \frac{\partial}{\partial x} \left( T + \frac{\partial T}{\partial x} dx \right) dt.$$

Количество тепла  $dQ'_{dx}$ , оставшееся в элементарном объеме  $qdx$  рассматриваемого стержня, получится при следующем вычислении:

$$dQ_{dx}' = dQ'_x - dQ'_{x+dx} = \lambda q \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx \cdot dt. \quad (13)$$

Кроме того, в элементарном объеме  $qdx$  генерировалось тепло за время  $dt$  вследствие прохождения электрического тока по стержню. Обозначим это тепло через  $dQ''$ :

$$dQ'' = \frac{\rho}{q} I^2 dx dt. \quad (14)$$

Далее необходимо учесть теплоотдачу в окружающее пространство с боковой поверхности нагретого стержня  $u dx$  в течение времени  $dt$ . Температуру окружающей среды обозначим через  $T_0$ , а теплоотдачу от поверхности через:

$$dQ''' = ku(T - T_0) dx dt, \quad (15)$$

где  $k$  — коэффициент теплоотдачи с поверхности [ $W/cm^2 \cdot ^\circ C$ ],  
 $u$  — периметр стержня в  $cm$   
(охлаждающая поверхность берется на 1  $cm$  длины стержня).

Наконец, количество тепла, необходимое для повышения температуры рассматриваемого элементарного объема, обусловленного теплоемкостью металла в течение времени  $dt$ , обозначим через  $dQ^{IV}$ :

$$dQ^{IV} = c\gamma q dx \frac{\partial T}{\partial t} \cdot dt, \quad (16)$$

где  $c$  — теплоемкость свариваемого металла [ $Wсек/g \cdot ^\circ C$ ];  
 $\gamma$  — удельный вес материала в  $g/cm^3$ .

Количество тепла, полученное объемом  $qdx$  в любой момент времени, должно равняться количеству израсходованного тепла, следовательно, тепловой баланс для рассматриваемого элементарного объема одного стержня выразится:

$$dQ' + dQ'' - dQ''' - dQ^{IV} = 0. \quad (17)$$



Подставляя значения каждого слагаемого в уравнение (17), получим окончательно:

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - c\gamma \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{ku}{q} (T - T_0) + \frac{p}{q^2} \cdot I^2 = 0. \quad (18)$$

Уравнение (18) представляет собой общее дифференциальное уравнение нагревания стержня. Найти общее решение для данного уравнения весьма трудно. При некотором упрощении могут быть найдены решения, позволяющие производить технические расчеты с достаточной точностью, что и указано далее.

## 16. Сварка металлов кратковременным нагревом

При сварке методом сопротивления процесс нагревания происходит кратковременно (в течение нескольких секунд, а во многих случаях даже долей секунды). В связи с этим можно допустить, что теплоотдача с поверхности стержней в окружающее пространство очень мала, и в дальнейшем мы эти потери не будем учитывать, т. е. примем  $k=0$ .

Точно так же для упрощения задачи не будем учитывать потери на джоулево тепло в самых стержнях, т.е. примем  $\frac{I}{q} = 0$ . Тогда общее дифференциальное уравнение нагрева (18) получит вид

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - c\gamma \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

или

$$a^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \quad (19)$$

где

$$a = \sqrt{\frac{\lambda}{c\gamma}}. \quad (19')$$

Для подсчета  $a$  необходимо знать физические величины металлов.

В табл. 9 помещены значения физических величин для некоторых металлов.

Для решения уравнения (19) задаемся следующими начальными и граничными условиями. До начала процесса при  $t=0$  температура стержней  $T=0$  для всех значений  $x$  (в том числе при  $x=0$ ). После включения сварочной цепи при  $x=0$   $T=T_{\kappa}$  для всех значений  $t$ , больших нуля. Здесь  $T_{\kappa}$  — температура торца стержня в контакте  $OO'$ .

Тейловой поток, устремляющийся от сварочного контакта в каждый из свариваемых стержней, равен

$$2\Phi = I^2 \cdot R_{1\kappa}$$

Физические постоянные для некоторых металлов (при нормальной температуре)

Материал	$\lambda$ [W/см·°C]	$c$ [Wсек/г·°C]	$\gamma$ (г/см <sup>3</sup> )	Температура плавления $T$ °C	$\rho$ (м/мм <sup>2</sup> )
Алюминий . . . . .	2,02—2,1	0,9	2,71	660	0,0283
Бронза . . . . .	0,71	0,433	7,4—8,9	900	0,016
Бронза фосфористая . . . . .	0,5	0,365	8,9	1050	0,10
Дуралюмин . . . . .	1,34—1,47	0,84	2,8	650	0,034
Железо (мягкое) . . . . .	0,65	0,472	7,8	1530	0,13—0,2
Латунь . . . . .	0,6—0,92	0,362—0,394	8,4—8,7	935	0,09
Медь . . . . .	3,6	0,383	8,9	1083	0,0175
Монель . . . . .	0,21	0,582	8,8	1350	0,5
Никель . . . . .	0,56—0,6	0,44—0,46	8,6—8,9	1450	0,09
Нихром . . . . .	0,105	0,45	8,17	1390	0,10
Сталь нержавеющая (18-8) . . . . .	0,17—0,22	0,49—0,52	7,86	1440	0,7—0,75
Электрон . . . . .	0,835—1,26	1,05	1,8	680—700	0,070
Эведор 94,50%Cu, 4,50%Si, 1,00%Mn . . . . .	0,326	0,39	8,46	1019	0,26

Для случая  $x=0$  решение уравнения (19) будет иметь следующий вид <sup>1</sup>:

$$T_k = \frac{I_2^2 R_{1k}}{Aq} \sqrt{t}, \quad (20)$$

где  $I_2^2 R_{1k}$  — мощность, получаемая в сварочном контакте, выраженная в W;

$q$  — сечение стержня в см<sup>2</sup>;

$A$  — коэффициент, учитывающий физические данные металла (теплоемкость, теплопроводность и удельный вес),

$$A = \sqrt{\pi \cdot c \cdot \gamma \cdot \lambda}.$$

Температура в контакте прямо пропорциональна выделяемой мощности в контакте, а также корню квадратному из времени сварки и обратно пропорциональна физическим постоянным сварочных металлов и сечению торца электродов контакта.

Следует иметь в виду, что теплопроводность и теплоемкость являются функцией от температуры свариваемого металла. С увеличением температуры металла теплопроводность его уменьшается, а теплоемкость растет.

В связи с этим значение коэффициента  $A$ , зависящее одновременно как от теплопроводности, так и теплоемкости, мало изменяется от температуры металла (табл. 10).

<sup>1</sup> Во всех обозначениях подстрочный индекс 1 показывает, что речь идет о первичной цепи сварочной машины, а индекс 2 или II — о вторичной цепи этой машины.

Значения коэффициента  $A$  при нормальной температуре

Металл	$A = \sqrt{\pi \cdot c \cdot \gamma \cdot \lambda}$	Металл	$A = \sqrt{\pi \cdot c \cdot \gamma \cdot \lambda}$
Алюминий . . . . .	3,89	Медь . . . . .	6,25
Бронза . . . . .	2,86	Никель . . . . .	2,65
Бронза фосфористая . . . . .	2,26	Сталь . . . . .	2,745
Дуралюмин . . . . .	3,24	Сталь нержавеющая (18-8) . . . . .	1,67
Железо (мягкое) . . . . .	2,74	Электрон . . . . .	2,56
Латунь . . . . .	2,81		

Общее решение уравнения (19) имеет следующий вид:

$$T_{x,t} = T_n F\left(\frac{x}{2a\sqrt{t}}\right), \quad (21)$$

где

$$F\left(\frac{x}{2a\sqrt{t}}\right) = e^{-\frac{x^2}{4a^2t}} - \frac{x}{2a\sqrt{t}} \left[ 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2a\sqrt{t}}} e^{-\frac{x^2}{4a^2t}} d\left(\frac{x}{2a\sqrt{t}}\right) \right]$$

или

$$F(y) = e^{-y^2} - y \left( 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y e^{-y^2} dy \right), \quad (22)$$

где  $y$  — одновременная функция  $x$  и  $t$ .

Выражение  $\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y e^{-y^2} dy$  называется интегралом Гаусса. Точно он не решается, но по имеющимся готовым таблицам можно вычислить температуру на любом расстоянии от сварочного контакта при заданном времени. При помощи этой таблицы построена диаграмма для уравнения (22) (фиг. 33). На оси абсцисс этой диаграммы отложены значения  $\left(\frac{x}{2a\sqrt{t}}\right)$ , а на оси ординат — найденное значение уравнения (22), т. е.

$$F\left(\frac{x}{2a\sqrt{t}}\right).$$

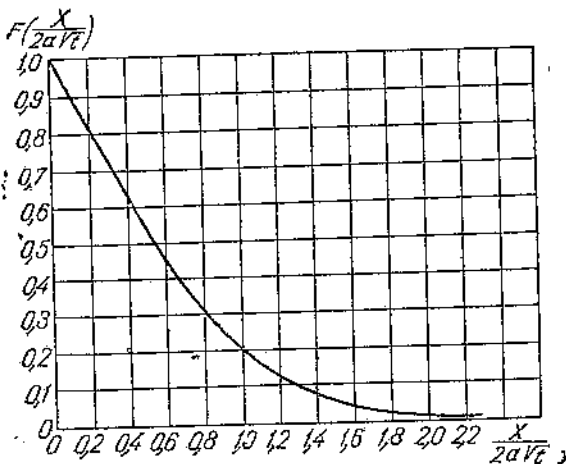
Для определения температуры в любом поперечном сечении стержня вследствие теплоперехода от контакта при заданном времени  $t$  следует пользоваться уравнением (21). Для этого необходимо вначале найти по кривой фиг. 39 значение  $F\left(\frac{x}{2a\sqrt{t}}\right)$ , затем определить температуру в контакте по уравнению (20). Из уравнения (20) явствует, что нагревание в кон-

такте происходит совершенно по другому закону, чем нагревание в целом стержне.

В однородных металлических проводах температура нагрева пропорциональна полному времени протекания тока, а в контактах пропорциональна лишь корню квадратному от полного времени продолжительности протекания тока.

В обычных условиях сварки методом сопротивления температура сваривания каждого металла является известной, заданной величиной и равна температуре плавления.

Неизвестным параметром является обычно величина сварочного тока. Поэтому из уравнения (20) определяем величину сварочного тока, обозначенную нами через  $I_2$ :



Фиг. 33. Диаграмма функции.

$$e^{-Y^2} - Y \left( 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^Y e^{-Y^2} dY \right).$$

для осуществления доброкачественной и надежной сварки.

Уравнение (23) может быть с учетом формулы (10) переписано таким образом:

$$I_2 = \sqrt{\frac{T_k P^2 q A}{r_{1k} V t}}. \quad (23')$$

Время сварки можно определить из уравнения (23) по известным остальным данным, а именно:

$$t = \left( \frac{T_k q A}{I_2^2 R_{1k}} \right)^2. \quad (24)$$

Уравнения (20), (21), (23) и (24) действительны как для постоянного, так и для переменного тока.

Они справедливы для сварочного процесса методом сопротивления, длящегося от 0,02 сек. до нескольких секунд. При

большой длительности процесса вычисленное значение тока будет менее точным.

**Пример 2.** Определить величину сварочного тока при стыковой сварке двух железных стержней  $d=30$  мм для следующих заданных условий:  $P=1000$  кг; время сварки  $t=7,2$  сек;  $A=2,74$ . Единичное сопротивление сварочного контакта для зачищенного контакта и параллельного расположения его торцов на основании исследования автора  $r_{1к}=0,0045$  Ω;  $\alpha=0,75$ .

Температура металла в самой плоскости контакта равна его температуре плавления  $T_k=1530^\circ$ . Сечение каждого стержня  $q=\frac{\pi d^2}{4}=7,06$  см<sup>2</sup>. Внутреннее сопротивление контакта

$$R_{1к} = \frac{r_{1к}}{P\alpha} = \frac{0,0045}{1000^{0,75}} = \frac{0,0045}{178} = 0,253 \cdot 10^{-4} \Omega.$$

По уравнению (23) определяем необходимую величину сварочного тока для заданных параметров:

$$I_2 = \sqrt{\frac{1530 \cdot 7,06 \cdot 2,74}{0,253 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{7,2}}} = \sqrt{43,75 \cdot 10^7} = 21\,000 \text{ А.}$$

Изменение необходимой величины сварочного тока в зависимости от времени продолжительности сварки для этого примера и вычисление по уравнению (23) показаны на фиг. 34 для разных времен.

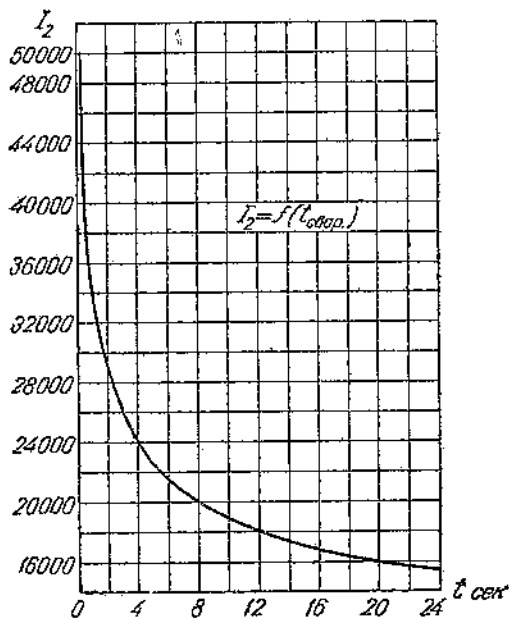
На фиг. 35 представлена кривая зависимости необходимой величины сварочного тока от продолжительности времени сварки для малоуглеродистой стали, найденная опытным путем.

Падение напряжения на сварочном контакте  $e_{1к} = I_2 R_{1к}$ . При заданном времени  $t=7,2$  сек. находим ток  $I_2 = 21\,000$  А, откуда определяем падение напряжения в контакте

$$e_{1к} = 21\,000 \cdot 0,253 \times 10^{-4} = 0,53 \text{ В.}$$

Не касаясь пока вопроса полного расхода мощности, вычислим лишь мощность, выделяемую в контакте  $W_{1к} = I_2 R_{1к}$ .

$$W_{1к} = 21\,000^2 \cdot 0,253 \cdot 10^{-4} = 11,0 \text{ kW.}$$



Фиг. 34. Изменение величины тока от заданного времени, вычисленное по уравнению для стыковой сварки стержней малоуглеродистой стали  $d=30$  мм.

Далее определяем характер распространения тепла вдоль стержня для различных времен сварки.

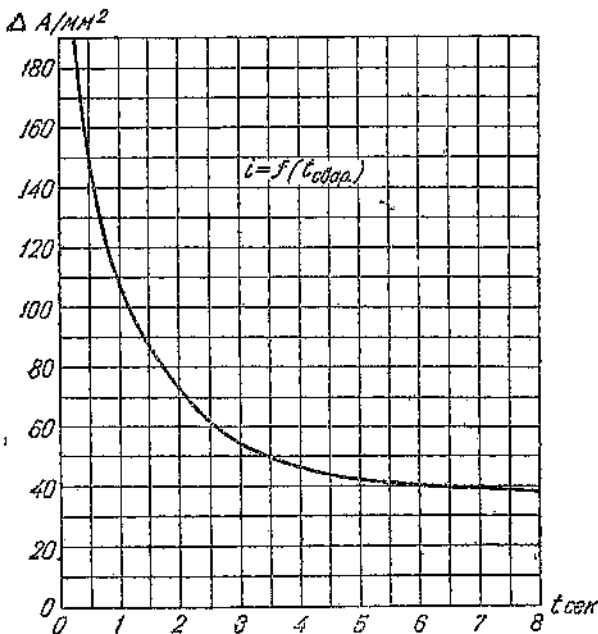
Как видно из уравнения (21), факторами, влияющими на глубину проникания тепла в металле для какого-нибудь расстояния от сварочного контакта, являются физические данные металла каждого стержня, обозначенные нами ранее буквой  $a$ , и время продолжительности сварки  $t$ . Вычислим температуру поперечного сечения стержня в нашем примере на расстоянии 1 см от сварочного контакта в конце сварочного процесса для случая, когда  $t = 7,2$  сек. Для этого определим величину:

$$\frac{x}{2a\sqrt{t}} = \frac{1}{2 \cdot 0,42 \cdot \sqrt{7,2}} = 0,445.$$

По графику (фиг. 33)

$$(F) \frac{x}{2a\sqrt{t}} = 0,59.$$

Следовательно, температура стержня на расстоянии 1 см от контакта согласно уравнению (21)  $T_{x,t} = 1530 \times 0,59 = 900^\circ$ .



Фиг. 35. Опытная кривая зависимости плотности сварочного тока от времени сварки для малоуглеродистой стали.

Подобным образом построены кривые изменения температуры стержня в зависимости от расстояния до контакта при  $t = 1$  сек. и для других времен сварки (фиг. 36).

Из этих кривых видно, что при сварке стержней одинакового сечения, но при различной продолжительности времени, и соответственно вычисленном токе распространение тепла вдоль стержня теплопереходом от контакта резко уменьшается с уменьшением времени сварки. Лишь при завершении сварки и выключенном токе температура стержня медленно спадает и выравнивается по всей его длине.

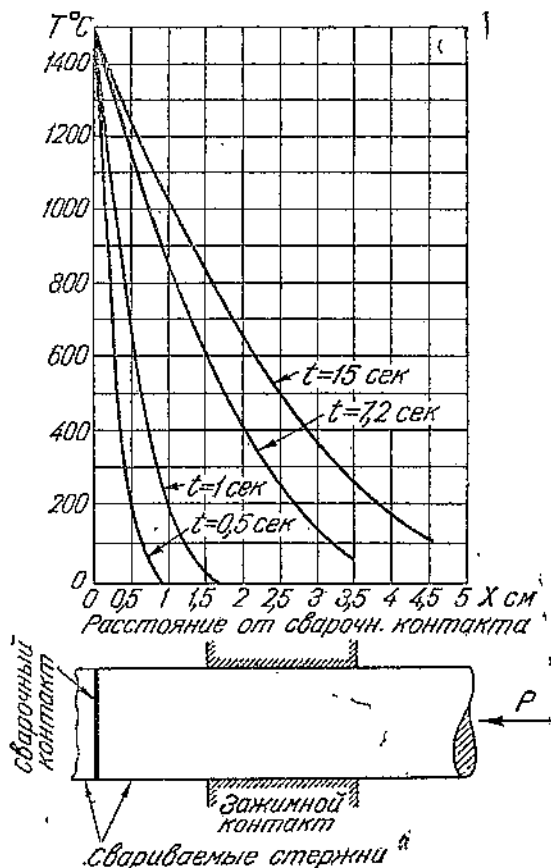
## 17. Физический процесс точечной, роликовой и рельефной сварки и образование сварочной точки

Физический процесс нагревания и сварки металлических частей на аппаратах для точечной, роликовой и рельефной сварки принципиально не отличается от стыковой сварки без

оплавления. Все перечисленные методы сварки характеризуются, как было указано выше, генерированием тепла в сварочном контакте и в свариваемых металлических частях. Отличие стыковой сварки от других перечисленных видов заключается в том, что в первом случае соединение деталей происходит по всей торцевой поверхности касания стержней или листов. В остальных видах сварки методом сопротивления, у которых подводимая мощность локализуется на небольших участках (в отдельных точках), соединение металлических частей происходит по поверхности, приблизительно равной или меньшей поверхности торцов токоподводящих электродов, соприкасающихся со свариваемыми частями.

Основное различие, существующее между отдельными видами сварки методом сопротивления, состоит не в физическом отличии каждого процесса, а лишь в способе подвода электроэнергии к сварочному контакту.

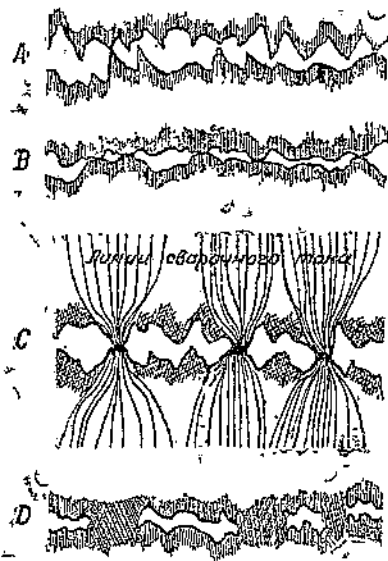
Следовательно, перечисленные виды сварки отличаются друг от друга только специфичностью применяемой аппаратуры. (Попутно заметим, что для некоторых видов сварки методом сопротивления характерны дополнительные потери мощности, связанные с теплопроводностью в электроды, если последние расположены весьма близко от сварочного контакта, равно как и потери мощности в свариваемых деталях. Указанные потери зависят от свойств и толщины материала, расстояния электродов до сварочного стыка и времени сварки. В дальнейшем при вычислении баланса необходимой мощности будет показано, каким образом компенсируются эти потери). Что же касается вычисления величины тока, достаточного для генерирования



Фиг. 36. Кривые, характеризующие проникание тепла теплопроводностью от сварочного контакта вдоль свариваемых стержней в зависимости от продолжительности сварки;

тепла в сварочном контакте для всех указанных видов сварки методом сопротивления, то оно производится по тем же уравнениям (20) и (24), как и при разобранным выше методе стыковой сварки без оплавления.

При точечной сварке двух листов имеет место один внутренний, или главный, контакт в месте сварки листов  $R_{1к}$  и два вспомогательных контакта под электродами  $R_{2к}$  (фиг. 37). Если известен протекаемый ток  $I_2$  и сопротивление каждого в отдельности из рассматриваемых контактов при данном давлении на электроды, то можно вычислить температуру в каждом контакте по уравнению (20). Однако температура главного контакта  $T_k$ , при которой осуществляется сварка, обычно является известной величиной, т. е. температурой плавления металла. Наиболее важным для практических условий является вычисление величины сварочного тока  $I_2$  по известной температуре плавления свариваемых металлов и внутреннему сопротивлению контакта  $R_{1к}$ .



фиг. 37. Схема образования сварочного соединения при контактной сварке—по отдельным этапам: А — вид контакта свариваемых деталей без приложения давления на электроды. В — вид контакта с приложенным давлением на электроды. С — начальный момент прохождения сварочного тока по отдельным микроскопическим выступам в контакте. D — процесс плавления 'во внутреннем сварочном контакте.

Величину сварочного тока  $I_2$  можно, строго говоря, также определить по данным вспомогательных контактов между электродом и деталью, если точно известно сопротивление каждого контакта и развиваемая в нем температура. Такой вариант расчета может быть допущен, так как сопротивления главного и вспомогательных контактов включены между собой последовательно. Однако для практических расчетов лучше всего исходить из условий сопротивления главного контакта, где температура сварки всегда задана свариваемым металлом.

В случае точечной сварки большего количества листов сварочный ток следует вычислять по внутреннему сопротивлению одного из главных контактов между двумя свариваемыми листами  $R_{1к}$ .

Все сказанное относительно точечной сварки в полной мере относится также к роликовой и рельефной сварке. Единственное замечание, которое необходимо сделать, относится к величине сечения стержня  $q$ . При точечной сварке  $q$  представляет собой сечение заточки токоподводящих электродов. Для рельефной сварки  $q$  определяется по диаметру выштамповки листа.

Если при рельефной сварке предусмотрены специальные вставки (электроды) для каждой выштамповки, то площадью



электрода будет являться поверхность торца вставки. При роликовой сварке  $q$  представляет собой площадь касания ролика со свариваемым листом в процессе сварки данной точки.

### Процесс образования сварочного соединения

Для выяснения вопроса о происхождении и развитии сварочной точки прежде всего напомним, что агрегат сварочного контакта состоит из ряда последовательно соединенных элементов сопротивлений отдельных его контактов и столбиков металла.

Наибольшее развитие тепла в агрегате сварочного контакта происходит при данной силе тока в том переходном контакте, где имеет место наибольшее сопротивление. Обычно сопротивление между двумя листами  $R_{1к}$  оказывается большим, чем сопротивление контакта между электродом и листом  $R_{2к}$ . Поэтому нагревание сварочного изделия начинается в контакте между листами.

Нагревание происходит не одновременно по всей поверхности сварной точки, а по отдельным элементарным выступам контакта (фиг. 37, А). После предварительного сжатия деталей между электродами соприкасаются между собой один или два элементарных выступа, представляющих физическую точку касания в контакте (фиг. 37, В). Через эти выступы устремляется вначале весь ток вторичной цепи и благодаря высокой плотности и сужению линии тока происходит быстрый разогрев элементарного объема выступа (фиг. 37, С).

Элементарный объем металла физической точки разогревается и под действием силы сжатия электродов легко деформируется. Тогда приходят в соприкосновение другие рядом расположенные элементарные точки на поверхности того же сварочного контакта, по которым начинает протекать ток, и зона нагретого металла увеличивается (фиг. 37, D).

Нагревание сварочной точки происходит еще вследствие теплопроводности во все стороны от каждой разогретой элементарной физической точки. Основное развитие сварочного тепла, достигающего температуры плавления металла, происходит лишь во внутреннем контакте и на некоторую глубину.

Вследствие охлаждающего действия электродов и меньшего сопротивления контакта между электродом и изделием температура поверхности листа под электродом меньше, чем во внутреннем контакте.

В соответствии с изменением градиента температуры между внутренним контактом и наружной поверхностью листа под электродом происходит изменение структуры металла шва. Это видно будет далее при рассмотрении микроснимков сварных точек.

После разогрева поверхностей внутреннего контакта до температуры плавления происходит сцепление металла шва и под действием механического усилия — рекристаллизация металла. Следовательно, внутренняя часть шва представляет собой литую

структуру, а вокруг литого металла точки образуется зона рекристаллизованного металла.

*Пример 3.* Вычислить величину сварочного тока при точечной сварке двух листов малоуглеродистой стали толщиной  $\Delta = 2,5$  мм; диаметр заточки электродов  $d = 4 \Delta = 4 \cdot 2,5 = 10$  мм; давление на электроды  $P = 250$  кг. Места, подлежащие сварке, тщательно зачищаются перед сваркой. Время продолжительности сварки выбираем  $t = 0,69$  сек.

Внутреннее сопротивление контакта для свежезачищенных поверхностей малоуглеродистой стали  $r_{1к} = 0,005$ ;  $\alpha = 0,75$ , откуда

$$R_{1к} = \frac{0,005}{250^{0,75}} = \frac{0,005}{63} = 0,794 \cdot 10^{-4} \Omega.$$

Площадь торца электрода  $q = \frac{\pi \cdot l^2}{4} = 0,785 \text{ см}^2.$

Из табл. 10  $A = 2,74$ ; тогда по уравнению (23) определяем величину сварочного тока:

$$I_2 = \sqrt{\frac{1530 \cdot 0,785 \cdot 2,74}{0,794 \cdot 10^{-4} \sqrt{0,69}}} = \sqrt{50 \cdot 10^6} = 7100 \text{ А.}$$

Вычислим величины тока при тех же заданных условиях, но для других показателей времени сварки:

при  $t = 0,46$  сек.

$$I_2 = \sqrt{\frac{1530 \cdot 0,785 \cdot 2,74}{0,794 \cdot 10^{-4} \sqrt{0,46}}} = 7800 \text{ А,}$$

при  $t = 0,23$  сек.

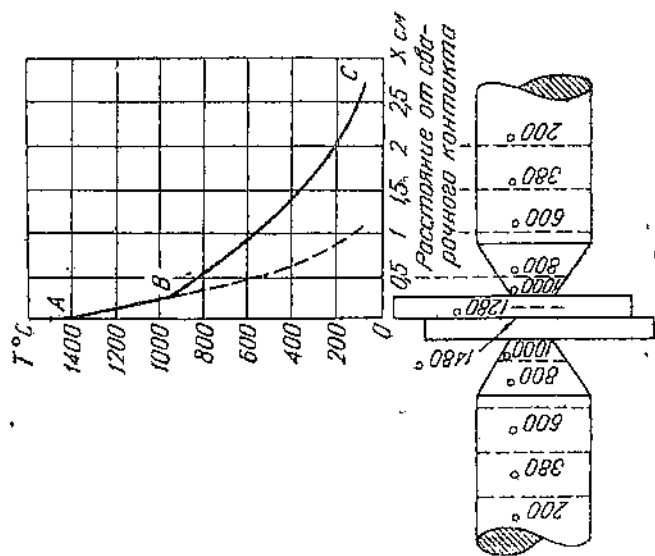
$$I_2 = \sqrt{\frac{1530 \cdot 0,785 \cdot 2,74}{0,794 \cdot 10^{-4} \sqrt{0,23}}} = 9300 \text{ А.}$$

Далее представляют интерес кривые распределения температуры от главного сварочного контакта через металл к электродам. От сварочного стыка до наружной поверхности свариваемого листа под электродом распространение тепла протекает согласно уравнению (21) по кривой  $AB$  (фиг. 38). В электродах тепло, идущее от сварочного контакта, протекает по кривой  $BC$  в соответствии с изменением физических постоянных металла и влияет на значение  $A$  в уравнении (20). Эти кривые построены для времени сварки  $t = 0,69$  сек. При вычислении участка кривой  $BC$  за  $T_k$  необходимо принять температуру торца, контакта, электрода или, что то же самое, температуру наружной поверхности листа под электродом. Пунктирная линия является продолжением кривой  $AB$  и показывает, как распространилось бы тепло от контакта в массу данного металла, но большей толщины.

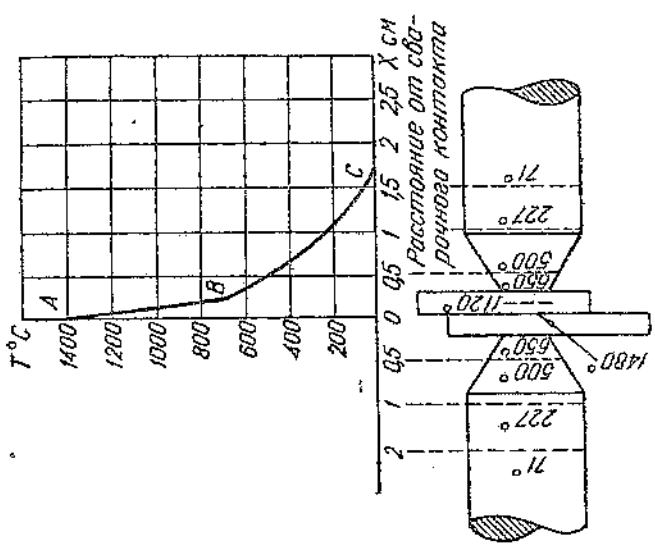
Кривая  $BC$  характеризует распределение тепла в электродах, обусловленное теплопроводностью от сварочного контакта.

Очевидно для верхнего электрода кривая распределения температур имеет зеркальное отображение кривой для нижнего электрода, поэтому на чертеже она не показана.

Представляет также интерес вычисление температуры в контакте между электродом и листом, так как важно знать, какое тепло генерируется в этом контакте дополнительно к тому, которое приходит от сварочного контакта.



Фиг. 38. Распределение температур нагрева теплопроводностью от сварочного контакта к электродам для  $t = 0,69$  сек.



Фиг. 39. Распределение температур нагрева теплопроводностью от сварочного контакта к электродам для  $t = 0,23$  сек.

Из предыдущей главы также известно, что сопротивление свежезачищенного контакта медь—железо в 5 раз меньше сопротивления контакта железо—железо, т. е. для нашего примера будет

$$R_{ик}' = \frac{1}{5} R_{ик} = \frac{1}{5} 0,794 \cdot 10^{-4} = 0,158 \cdot 10^{-4} \Omega.$$

Для вычисления температуры в этом контакте воспользуемся уравнением (20). В это уравнение входит еще коэффициент  $A$ , учитывающий физические постоянные металла. Для каждого металла значение  $A$  различно, поэтому вычислим температуру в этом контакте для двух коэффициентов — для медного ( $A = 6,2$ ) и для железного ( $A = 2,74$ ).

Согласно уравнению (20):

$$1) T_k = \frac{7200^2 \cdot 0,158 \cdot 10^{-4}}{6,2 \cdot 0,785} \cdot \sqrt{0,69} = 140^\circ;$$

$$2) T_k = \frac{7200^2 \cdot 0,158 \cdot 10^{-4}}{2,74 \cdot 0,785} \cdot \sqrt{0,69} = 315^\circ.$$

Следовательно, помимо теплопроводности от сварочного контакта под электродом генерируется еще тепло, имеющее температуру, равную в среднем для нашего примера около  $250^\circ$ .

На фиг. 39 дана картина распределения температуры нагрева теплопроводностью от контакта для времени сварки  $t_c = 0,23$  сек.

При сравнении между собой последних двух графиков распределения температур нагрева металла свариваемых изделий, а равно и электродов (теплопроводностью от сварочного контакта для различных времен сварки) легко убедиться, насколько меняется температура на одном и том же расстоянии от сварочного контакта в зависимости от продолжительности сварочного процесса.

Для времени сварки  $t = 0,69$  сек. (фиг. 38) проникание тепла через толщину одного листа (равную  $2,5$  мм) в направлении от сварочного контакта к электроду, достигает температуры  $1000^\circ$ , а при времени сварки  $t = 0,23$  сек. и прочих равных параметрах (фиг. 39) температура в этом же месте достигает за время сварки лишь  $650^\circ$ . При дальнейшем уменьшении времени сварки температура в данном месте была бы еще ниже.

Отсюда следует, что электроды при более кратковременном режиме сварки менее нагреваются и подвергаются поэтому меньшему износу.

**Пример 4.** Вычислить необходимую величину сварочного тока и падение напряжения при точечной сварке листов алюминия  $0,5 + 0,5$  мм с зачищенными наружными поверхностями листов (под электродами) при следующих заданных условиях: диаметр заточки электрода  $6$  мм, время сварки  $0,02$  сек., давление на электроды  $100$  кг. Согласно данным исследования сварочного контакта (гл. II):  $r_{ик} = 0,001 \Omega$ ;  $r_1 = 0,005 \Omega$ ;  $\alpha = 0,85$ .

Вычислить также величину сварочного тока для времен сварки:  $t = 0,05$  сек. и  $t = 0,08$  сек.

Внутреннее сопротивление контакта

$$R_{1к} = \frac{0,001}{100^{0,85}} = \frac{0,001}{51} = 0,196 \cdot 10^{-4} \Omega.$$

Полное сопротивление сварочного контакта между электродами

$$R_{к} = \frac{0,005}{100^{0,85}} = 0,98 \cdot 10^{-4} \Omega.$$

Согласно уравнению (23) величина сварочного тока

$$I_2 = \sqrt{\frac{660 \cdot 0,283 \cdot 3,89}{0,196 \cdot 10^{-4} \sqrt{0,02}}} = \sqrt{262 \cdot 10^6} = 16\ 200 \text{ A.}$$

С увеличением сварочного времени сила тока для сварки указанного пакета 0,5 + 0,5 мм потребуется меньшей величины, а именно:  
при  $t = 0,05$  сек.

$$I_2 = 13\ 000 \text{ A;}$$

при  $t = 0,08$  сек.

$$I_2 = 11\ 500 \text{ A.}$$

Падение напряжения в сварочном контакте

$$U_{к} = 16\ 200 \cdot 0,98 \cdot 10^{-4} = 1,6 \text{ V.}$$

Теряемая мощность в контакте

$$W_{к} = I_2^2 R_{к} = 16\ 200^2 \cdot 0,98 \cdot 10^{-4} = 26 \text{ kW.}$$

Расход энергии только в контакте при сварке одной точки, выраженный в kWсек., будет равен

$$P_{к} = 26 \cdot 0,02 = 0,52 \text{ kWсек.}$$

*Пример 5.* Определить необходимые данные для точечной сварки дуралюминовых листов 1,5 + 1,5 мм (поверхности слегка зачищены). Условия сварки:  $d_{э,л} = 7$  мм;  $q_{э,л} = 0,385$  см<sup>2</sup>; давление 150 кг; время сварки  $t = 0,04$  сек.;  $r_{1к} = 0,0015 \Omega$ ;  $r_1 = 0,006 \Omega$ ;  $\alpha = 0,85$ ;

$$R_{1к} = \frac{0,0015}{150^{0,85}} = \frac{0,0015}{71} = 0,211 \cdot 10^{-4} \Omega;$$

$$R_{к} = \frac{0,006}{150^{0,85}} = 0,846 \cdot 10^{-4} \Omega.$$

$$I_2 = \sqrt{\frac{650 \cdot 0,385 \cdot 3,24}{0,211 \cdot 10^{-4} \sqrt{0,04}}} = \sqrt{196 \cdot 10^6} = 14\ 000 \text{ A.}$$

Вычислим также изменение сварочного тока для других времен сварки:

$$\text{при } t = 0,06 \text{ сек.} \quad I_2 = 12\ 500 \text{ A;}$$

$$\text{при } t = 0,08 \text{ сек.} \quad I_2 = 11\ 700 \text{ A;}$$

$$\text{при } t = 0,12 \text{ сек.} \quad I_2 = 10\ 500 \text{ A.}$$

Падение напряжения в контакте

$$U_{к} = I_2 R_{к} = 14\ 000 \cdot 0,846 \cdot 10^{-4} = 1,18 \text{ V.}$$

Теряемая мощность в контакте

$$W_{к} = I_2^2 R_{к} = 14\ 000^2 \cdot 0,846 \cdot 10^{-4} = 16,5 \text{ kW.}$$

Расход энергии

$$P_{к} = 16,5 \cdot 0,04 = 0,66 \text{ kW сек.}$$

*Пример 6.* Определить необходимые величины для рельефной сварки малоуглеродистой стали 2,5 + 2,5 мм с пятью выштамповками диаметром 5 мм ( $q = 0,235 \text{ см}^2$ ). Величина общего давления взята из расчета 350 кг на одну точку. Чистое время сварки пакета 0,6 сек.

Для одной сварочной точки  $r_{1к} = 0,004 \Omega$ ;  $r_1 = 0,015 \Omega$ ;  $\alpha = 0,70$ :

$$R_{1к}^I = \frac{0,004}{350^{0,7}} = \frac{0,004}{60} = 0,6 \cdot 10^{-4} \Omega;$$

$$R_k^I = \frac{0,015}{350^{0,7}} = 0,25 \cdot 10^{-3} \Omega;$$

$$I_2 = \sqrt{\frac{1530 \cdot 0,235 \cdot 2,74}{0,6 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{0,6}}} = \sqrt{21 \cdot 10^6} = 4600 \text{ А.}$$

Мощность, выделяемая в одной точке,

$$I_2^2 R_k = 4600^2 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} = 5,3 \text{ kW.}$$

Во всех пяти точках сила тока

$$I V_2 = 5 \cdot 4600 = 23\,000 \text{ А.}$$

Падение напряжения в контакте для всего пакета при сварке

$$U_k = I V_2 R_k = 23\,000 \frac{0,25 \cdot 10^{-3}}{5} = 1,15 \text{ В.}$$

Теряемая мощность в общем контакте

$$W_k = 23\,000^2 \frac{0,25 \cdot 10^{-3}}{5} = 26,5 \text{ kW.}$$

Расход электроэнергии в общем контакте для сварки одного пакета

$$P_k = 26,5 \cdot 0,6 = 16 \text{ kWсек.}$$

*Пример 7.* Вычислить необходимый ток и расход мощности в сварочном контакте при роликовой сварке пакета листов из нержавеющей стали 18-8 толщиной 0,3 + 0,3 мм и времени сварки  $t = 0,02$  сек. Давление на ролики 200 кг; ширина ролика 5 мм. Для нержавеющей стали 0,3 + 0,3 мм  $r_{1к} = 0,005 \Omega$ ;  $r_1 = 0,025 \Omega$ ;  $\alpha = 0,7$ ;

Примем для упрощения площадь соприкосновения ролика с материалом в виде круга, тогда

$$q = \frac{\pi \cdot 0,5^2}{4} = 0,2 \text{ см}^2.$$

Далее определяем:

$$R_{1к} = \frac{0,005}{200^{0,7}} = \frac{0,005}{41} = 0,122 \cdot 10^{-3} \Omega;$$

$$R_k = \frac{0,025}{200^{0,7}} = 0,61 \cdot 10^{-3} \Omega.$$

Сварочный ток

$$I_2 = \sqrt{\frac{1425 \cdot 0,2 \cdot 1,67}{0,122 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{0,02}}} = \sqrt{27,7 \cdot 10^6} = 5300 \text{ А.}$$

Падение напряжения в контакте

$$U_k = 5300 \cdot 0,61 \cdot 10^{-3} = 3,23 \text{ В.}$$

Потеря мощности в контакте

$$W_k = 5300^2 \cdot 0,61 \cdot 10^{-3} = 17 \text{ kW.}$$

Примем количество сварных точек на расстоянии 1 см равным 5, тогда расход электроэнергии без учета явления шунтирования тока, только в контакте 1 пог. см шва, будет

$$P_k = 17 \cdot 0,02 \cdot 5 = 1,7 \text{ kWсек. на 1 см.}$$

## 1. Расчет баланса мощности и напряжения внешнего контура сварочной машины

Для расчета трансформатора сварочного аппарата методом сопротивления следует вначале определить потребление мощности внешним контуром этого аппарата и необходимое напряжение холостого хода сварочной цепи.

Необходимая мощность составляет из суммы потерь мощности в отдельных частях внешнего контура сварочного аппарата. При определении величины сварочного тока  $I_2$  мы пользовались единичным сопротивлением внутреннего контакта  $r_{1к}$ , для определения внутреннего сопротивления в контакте при данном давлении [см. уравнение (10)]:

$$R_{1к} = \frac{r_{1к}}{P^2}.$$

Однако кроме величины  $r_{1к}$  имеет еще весьма важное значение величина полного единичного сопротивления между электродами  $r_1$ , с помощью которой можно легко определить полное сопротивление сварочного контакта при заданном давлении:

$$R_k = \frac{r_1}{P^2}.$$

Тогда мощность, теряемая во всем сварочном контакте между электродами, равна

$$W_k = I_2^2 R_k. \quad (25)$$

Если значение  $r_1$  неизвестно, как это имеет место при стыковой сварке, то мощность  $W_k$  определяется следующим образом:

1. Мощность, выделяемая во внутреннем сварочном контакте при нагреве его до температуры сварки, определяется по формуле

$$W_{1к} = I_2^2 R_{1к}.$$

2. Мощность, теряемая в металлических изделиях от протекающего по ним сварочного тока при стыковой сварке,

$$W_m = I_2^2 R_m, \quad (26)$$

где  $R_m$  — активное сопротивление сварочных металлических изделий на пути протекания тока  $I_2$ , причем

$$R_m = \frac{2 \cdot l}{q} \cdot \rho_T,$$

где  $l$  — толщина материала при точечной сварке;  $\rho_T$  — удельное сопротивление при данной температуре металла.

Для стыковой сварки обозначим:  $l$  — длина стержня, обтекаемого током, от сварочного контакта до середины зажимных губок;  $q$  — сечение электродов в  $\text{см}^2$ ;

$$\rho_T = \rho_0 (1 + \alpha T_{\text{ср}}).$$

3. Мощность, выделяемая в контактах между электродами и сварочными изделиями,

$$W'_{\text{к.к}} = I_2^2 2R_{2\text{к}}. \quad (26')$$

Полный расход мощности для сварочного контакта складывается из отдельных потерь между электродами

$$W_{\text{к}} = W_{1\text{к}} + W_{2\text{к}} + W'_{\text{к.к}}. \quad (27)$$

Для полного баланса активной мощности необходимо еще учесть мощность, теряемую в активном сопротивлении самого металла проводника внешнего контура. Сопротивление проводника внешнего контура состоит из двух различных потерь:

а) потерь, связанных с активным сопротивлением материала внешнего контура аппарата,

$$W_r = I_2^2 r m, \quad (28)$$

где  $r$  — омическое сопротивление внешнего контура;  $m$  — коэффициент поверхностного эффекта;

б) потерь в постоянных контактах внешнего контура

$$W_{\text{п.к}} = I_2^2 \sum R_{\text{п.к}}, \quad (29)$$

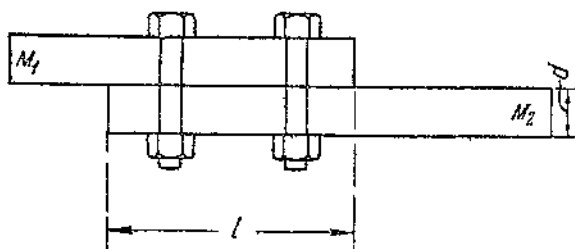
где  $R_{\text{п.к}}$  — сопротивление в постоянном контакте.

Потери в постоянных контактах зависят не только от количества контактов, но также от того, насколько последние тщательно приготовлены при сборке.

Постоянные контакты вторичного контура сварочной машины осуществляются обычно внахлестку, как это изображено на фиг. 40. В таком контакте следует определить два сопротивления — сопротивление в постоянном контакте  $R_{\text{п.к}}$  и сопротивление металла  $M_1 - M_2$  на расстоянии  $l$ :

$$R_{\text{общ}} = R_{\text{п.к}} + R_{\text{м}}.$$

В таком соединении наилучший контакт получается непосредственно вокруг шейки зажимного болта, где давление наибольшее. Если шинный контакт осуществлен несколькими бол-



Фиг. 40. Постоянный контакт вторичной цепи сварочной машины.



тами, затянутыми в одинаковой мере, сопротивление во всем контакте выразится следующей формулой:

$$R_{\kappa} = \frac{r_1}{n p_1^a},$$

где  $n$  — количество стяжных болтов в месте соединения;  $p_1$  — сила затяжки каждого болта.

Сопротивление в контакте двух прямоугольных шин, соединенных внахлестку, приближенно выражается следующими формулами (коэффициенты определялись в Лаборатории им. проф. Смулова в Ленинграде):

а) контакт двух медных шин

$$R_{1\kappa} = \frac{2,4 \cdot 10^{-4}}{p^{0,7}} \Omega; \quad (30)$$

б) контакт двух алюминиевых шин

$$R_{1\kappa} = \frac{8,2 \cdot 10^{-4}}{p^{0,7}} \Omega; \quad (31)$$

в) контакт между алюминиевой и медной шиной

$$R_{1\kappa} = \frac{3 \cdot 10^{-4}}{p^{0,7}} \Omega; \quad (32)$$

г) контакт двух медных шин с лужеными поверхностями

$$R_{1\kappa} = \frac{2,8 \cdot 10^{-4}}{p^{0,7}} \Omega. \quad (33)$$

Сопротивление отрезков цепи контактного соединения производится по эмпирической формуле

$$R_{\kappa} = \rho \frac{l}{q} k;$$

$$k = 3,2 \lg \left[ 1,43 \left( 1 + \frac{d}{l} \right) \right], \quad (34)$$

где  $l$  — длина накладки в см;  $q$  — сечение шины в см<sup>2</sup>;  $\rho$  — удельное сопротивление шины в  $\Omega/\text{см}^2$ ;  $d$  — толщина материала в см;  $k$  — коэффициент, учитывающий искривление путей тока.

Падение напряжения в каждом постоянном контакте может быть принято равным 0,05 — 0,1 В.

Таким образом полная активная мощность, потребляемая при сварке внешним контуром,

$$W_{\text{акт}} = W_{\kappa} + W_r + W_{\text{н.к.}} \quad (35)$$

Картина распределения активной мощности, забираемой из сети при стыковой сварке, показана на диаграмме (фиг. 41) в виде отдельных потерь. Далее, по найденной активной мощности и коэффициенту мощности в сварочной цепи  $\cos \varphi_2$  опре-

деляют кажущуюся мощность, на которую должен быть рассчитан трансформатор (в kVA):

$$W_{\text{общ}} = \frac{W_{\text{акт}}}{\cos \varphi_2}$$

Зная полную мощность и сварочный ток, определяют необходимую величину вторичного напряжения холостого хода

$$U_2 = \frac{W_{\text{общ}}}{I_2} \quad (36)$$

Активное падение напряжения во всем внешнем контуре

$$U_r = I_2 \sum R_2$$

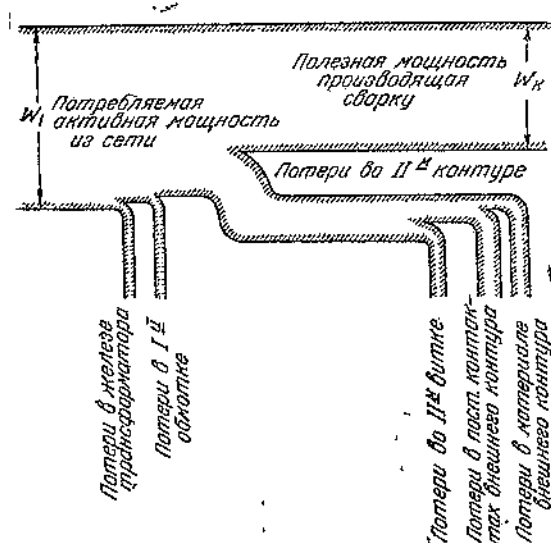
Тогда индуктивное падение напряжения равно

$$U_x = \sqrt{U_2^2 - U_r^2} \quad (37)$$

При расчете внешнего контура необходимо вычислить индуктивное сопротивление и  $\cos \varphi$  внешней цепи. Метод расчета индуктивного сопротивления внешнего контура покажем в дальнейшем.

*Приме 8.* Вычислить полный расход мощности во вторичном контуре для примера 2:

$$1. W_{1к} = I_2^2 R_{1к} = 21 600^2 \cdot 0,253 \cdot 10^{-4} \approx 11 \text{ kW}$$



Фиг. 41. Диаграмма распределения джоулевых потерь в машинах для стыковой сварки методом сопротивления.

2. Мощность, теряемая в свариваемых стержнях при протекании по ним ячюльного сварочного тока, согласно уравнению, равна

$$W_{ж} = I_2^2 R_{ж}$$

$$R_{ж} = \rho_0 (1 + \alpha T_{ср}) = 0,13 \cdot 10^{-4} (1 + 0,0045 \cdot 800) = 0,6 \cdot 10^{-4} \Omega \text{ см}^2$$

Пусть далее длина выступающего конца каждого стержня от сварочного контакта до середины зажимающего электрода  $l = 2d = 6$ , тогда:

$$R_{ж} = \rho_{ж} \frac{2l}{q} = 0,6 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{2 \times 6}{7,06} = 1 \cdot 10^{-4} \Omega$$

Наконец,

$$W_{ж} = 20 600^2 \cdot 10^{-4} = 42,3 \text{ kW}$$

3. Потеря мощности в контактах зажимного устройства электродов  $W_{к.м.}$  определяется из сопротивления  $r_{к.м.}$  в этих контактах.

$$r_{к.м.} = \frac{r}{P_{\alpha}}$$

$$P = 1500 \text{ кз}; \alpha = 0,8;$$

$$r = 1/5 r_{1a} = \frac{0,0045}{5} = 0,001 \Omega,$$

следовательно

$$r_{к.м.} = \frac{0,001}{1500^{0,8}} = \frac{0,001}{346} = 0,58 \cdot 10^{-5} \Omega;$$

$$I^2 r_{к.м.} = 21\,000^2 \cdot 0,58 \cdot 10^{-5} = 2,55 \text{ kW}.$$

Потери мощности в постоянных контактах и в материале внешнего контура можно вычислить по имеющимся формулам. Здесь эти вычисления для краткости опущены. Указанные потери определены в данном случае из опытных величин исследования аппарата АСН-25, у которого суммарное сопротивление вторичного витка  $R_{II} = 0,425 \cdot 10^{-4} \Omega$ , откуда

$$W_{II} = 20\,600^2 \cdot 0,425 \cdot 10^{-4} = 18 \text{ kW}.$$

Таким образом активные потери во всем вторичном контуре:

$$W_{акт} = 11 + 42,3 + 2,55 + 18 = 74 \text{ kW}.$$

Следует иметь в виду, что расход мощности, обозначенный через  $W_{к} = W_{1к} + W_{м}$ , тратится на разогрев металлических деталей до необходимой сварочной температуры, а также на компенсацию неизбежных (по физическим свойствам металлов) потерь тепла, постоянно сопутствующих нагреву металлических изделий.

Следовательно, из всего баланса активной мощности внешнего контура при сварке на аппарате АСН-25 53,5 kW (или 72%) представляют собой полезные потери, а лишь 20,5 kW (или 28%) составляют вредные потери. Если же учесть коэффициент мощности внешнего контура, равный, согласно нашим опытным данным, для стыкового аппарата АСН-25  $\cos \varphi = 0,8$ , то полная кажущаяся мощность внешнего контура

$$W_{общ.} = \frac{74}{0,8} = 92,5 \text{ kVA}.$$

Полезная мощность составляет 58% кажущейся мощности, затраченной при сварке:

$$\frac{W_{к}}{W_{общ.}} = \frac{53,3}{92,5} = 58\%.$$

Напряжение холостого хода во вторичной цепи

$$U_{02} = \frac{92,5}{20\,600} = 4,5 \text{ V}.$$

Расчетная величина напряжения холостого хода во вторичной цепи  $U_{02}$  позволяет выбрать число вольт на виток  $e_0$ , необходимое для расчета трансформатора. В сварочных машинах  $e_0$  колеблется от 3 до 10 V и зависит от назначения и мощности машины. Зная величину  $U_{02}$ , мы можем приступить к расчету сварочного трансформатора, как для нормального силового трансформатора.

Из приведенных вычислений следует, что трансформатор должен быть рассчитан на повторно-кратковременную мощность, равную 92,5 kVA.

Для сравнения теоретических данных с результатами опыта приводим два случая сварки стержней из малоуглеродистой стали при разных временах выдержки. В табл. 11 наряду с опытными величинами приведены также расчетные величины.

Таблица 11

Сравнение опытных величин с расчетными

Опытные величины							Расчетные величины			
$d$ мм	$U_1$ V	$I_1$ A	$W_1$ kW	$I_2$ A	$t$ сек	$U_2$ V	$\cos \varphi_2$	$t$ сек.	$I_2$ A	$W$ kW
30	184,5	474	70,4	21 300	7,2	3,4	0,8	7,2	20 600	74
30	200,0	382	56,0	19 000	9,3	2,8	0,77	9,3	19 200	62

$W_1$  — активная мощность, потребляемая сварочным аппаратом в сети;

$U_2$  — падение напряжения на токоподводящих зажимах стыкового аппарата (фиг. 32),  $A_1$  —  $A_2$  в момент сварки.

Ниже помещены опытные данные необходимой мощности при сварке малоуглеродистой стали, рекомендуемые некоторыми фирмами (табл. 12—14).

Таблица 12

Необходимая мощность при стыковой сварке малоуглеродистой стали (фирма Тейлор-Винфельд)

Свариваемые сечения, мм <sup>2</sup>	Потребляемая мощность при сварке, kW	Время сварки, сек.	Среднее количество сварок в час	Свариваемые сечения, мм <sup>2</sup>	Потребляемая мощность при сварке, kW	Время сварки, сек.	Среднее количество сварок в час
32	2,0	3,0	400	445	11,5	17,0	85
50	3,0	4,5	375	506	12,0	18,0	80
72	4,0	6,0	350	642	16,0	20,0	75
96	5,0	6,5	300	794	19,0	25,0	70
126	6,0	7,0	250	962	25,0	30,0	65
160	7,0	7,5	200	1256	31,0	35,0	60
198	8,0	8,0	150	1320	38,0	37,0	55
238	9,0	9,0	130	1520	45,0	40,0	48
284	10,0	10,0	100	1800	53,0	43,0	40
332	10,5	12,0	95	2042	60,0	45,0	30
390	11,0	15,0	90				

Необходимая мощность при точечной сварке малоуглеродистой стали  
(фирма Тейлор-Винфельд)

Суммарная толщина листов, мм	Потребляемая мощность при сварке, kVA	Время сварки сек.	Суммарная толщина листов, мм	Потребляемая мощность при сварке, kVA	Время сварки сек.
0,32	3,0	0,25	3,57	14	1,8
0,40	4,0	0,30	4,00	15	1,9
0,64	5,0	0,45	4,36	16	2,0
0,95	6,5	0,60	4,76	17	2,1
1,27	8,0	0,80	5,16	18	2,2
1,59	9,5	1,00	5,56	19	2,4
2,00	10,0	1,30	5,95	20	2,7
2,77	12,0	1,60	6,35	21	3,0
3,18	13,0	1,70	—	—	—

Таблица 14

Необходимая мощность при роликовой сварке малоуглеродистой стали  
(фирма Тейлор-Винфельд)

Суммарная толщина листов, мм	Продолжительность сварки 1 м, сек.	Потребляемая мощность, kVA	Суммарная толщина листов, мм	Продолжительность сварки 1 м, сек.	Потребляемая мощность, kVA
0,4	30	6	2,5	110	16
0,8	50	8	3,0	120	20
1,0	60	10	4,0	150	25
1,5	75	12	5,0	180	30
2,0	90	14	—	—	—

При стыковой сварке больших сечений (свыше 10000 мм<sup>2</sup>) рекомендуется фирмой выбор мощности производить, исходя из расчета 50 kVA на 1000 мм<sup>2</sup>. При стыковой сварке цветных металлов, имеющих более высокий коэффициент теплопроводности и меньшее удельное сопротивление, чем черные металлы, рекомендуются ориентировочные величины, занесенные в табл. 15.

Таблица 15

## Потребляемая мощность при стыковой сварке цветных металлов

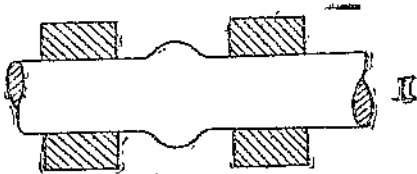
Свариваемые сечения, мм <sup>2</sup> . . . . .	10—20	20—50	50—100	100—200	200—300	300—500
Потребляемая мощность, kVA . . . . .	4—8	8—15	15—25	25—50	50—100	100—150

## ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СВАРКА МЕТОДОМ ОПЛАВЛЕНИЯ

## 19. Техничко-экономические преимущества

Электрическая сварка методом оплавления наиболее распространена в системе стыковой сварки. Объясняется это следующими значительными преимуществами этой сварки перед стыковой сваркой без оплавления:

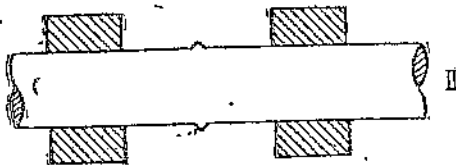
1. Соединяемые части металла после сварки имеют в стыке структуру, почти одинаковую с металлом изделия, вследствие



вытеснения из шва во время осадки вместе с жидким металлом посторонних включений.

2. Имеется возможность сварки встык тонких листов сравнительно больших длин, а также деталей из различных металлов.

3. В отличие от стыковой сварки без оплавления, где обычно после осадки возникают значительные утолщения деталей (фиг. 42, I), при сварке оплавлением вокруг стыка образуется лишь незначительный налет в виде грата (фиг. 42, II). Этим достигается экономия в последующей обработке свариваемых деталей.



Фиг. 42. Виды швов, полученных при сварке двух стержней встык.

I — методом сопротивления, II — методом оплавления.

4. Сварка оплавлением не требует специальной предварительной подготовки и точной подгонки торцов, необходимой при сварке сопротивлением.

5. Имеет место меньший расход электрической энергии.

При сварке оплавлением площадь свариваемого поперечного сечения достигает на современных машинах 25 000—35 000 мм<sup>2</sup>. В частности, на Челябинском тракторном заводе производится стыковая сварка металлических изделий сечением до 15 000 мм<sup>2</sup>.

## 20. Физический процесс сварки оплавлением

Физический процесс, сопутствующий сварке методом оплавления, так же, как и теоретическая сторона вопроса, еще недостаточно изучен, и это становится тем более ошутительным, чем более мы интересуемся дальнейшим расширением области применения этого вида сварки, а также определением минимальной величины оплавления металла, неизбежного при сварке этим методом.

При сварке оплавлением нагревание металла происходит также за счет джоулева тепла, выделяемого в сварочном контакте. При стыковой сварке сопротивлением без оплавления начальное давление, приложенное к электродам, можно считать приблизительно одинаковым в продолжение всего сварочного процесса.

При сварке сопротивлением давление изменяют отдельными ступенями, а сопротивление контакта изменяется в соответствии с уравнением.

$$R_{1к} = \frac{r_{1к}}{P_{1к}}$$

В начальный момент сварки осуществляют надежный контакт свариваемых деталей усилием, приложенным к электродам, затем включают электрический ток. Протекающий по деталям ток разогревает место стыка до определенной температуры точно так же, как это имеет место при стыковой сварке сопротивлением, т. е. вначале приходят в соприкосновение отдельные элементарные выступы контакта, а затем благодаря высокой плотности тока и сужению его линий они быстро разогреваются и легко деформируются при сжатии деталей. Далее начинают соприкасаться между собой другие элементарные выступы торцов, а нагрев всего сечения торца происходит благодаря высокой плотности тока (в отдельных элементарных точках касания) и теплопроводности от более нагретых точек к менее нагретым частям сечения контакта.

В отличие от стыковой сварки без оплавления, у которой полное нагревание деталей совершается указанным выше способом, при сварке оплавлением такой предварительный подогрев торцов до определенной температуры завершает лишь первую ее стадию.

Затем давление на электроды уменьшают, сопротивление в контакте от этого возрастает, а величина сварочного тока уменьшается до определенного значения, обусловленного увеличением сопротивления в контакте.

При ослабленном давлении в контакте уменьшается действительная площадь касания торцов стержней, ток устремляется при этом в одну или две физические точки, где касание противоположных выступов еще не нарушено, и нагревает их до температуры плавления металла.

Когда торцы деталей нагрелись до определенной температуры, происходит уменьшение теплопроводности от контакта в соседние зоны металла, поэтому в элементарных выступах сварочного контакта при дополнительном нагревании происходит перегрев металла до температуры паробразования.

Вследствие избыточного давления в контакте пары металла вырываются наружу и выталкивают в воздух частицы жидкого горящего металла в виде снопа искр, часть же расплавленного металла стекает вниз. Вслед за разрушенными выступами соприкасаются между собой следующие выступы в контакте,

образуя новые пути для прохождения сварочного тока с полным повторением процесса.

Это происходит настолько интенсивно и быстро, что создается впечатление непрерывного процесса плавления и выгорания торцов, получившего название оплавления. Такой последовательный процесс выжигания концов деталей по элементарным выступам продолжают до того момента, пока концы свариваемых стержней листов или труб не нагреются на определенном расстоянии от стыка до сварочной температуры (температура пластического состояния).

Нагревание выступающих концов осуществляется, главным образом, теплопроводностью от сварочного контакта, где температура нагрева имеет наибольшее значение.

Нагревание детали в части от стыка до токоподводящих электродов протекающим током в процессе оплавления весьма незначительно. Величина обгорающего металла устанавливается в зависимости от необходимой глубины прогрева металла и еще ряда других факторов, о которых будет указано ниже.

После того как установленная заранее масса металла уже выгорела, производят тотчас же сжатие свариваемых деталей большим усилием, приложенным к электродам, причем остаток расплавленного металла в контакте выдавливается наружу в виде грата. Частицы металла, нагретые до пластического состояния, приходят в неразъемное соединение, образующее сварной шов.

Таким образом сварка оплавлением в отличие от стыковой без оплавления производится при переменном (трехступенчатом) сопротивлении сварочного контакта.

При сварке оплавлением применяются два вида выжигания металла. Различие между ними состоит в способе перемещения деталей в момент оплавления. Поступательно-возвратное перемещение детали часто применяется при ручной сварке и фактически сводится к усилению или ослаблению силы сжатия деталей.

Полный разрыв вторичной цепи редко производят. Аппараты, предназначенные для автоматической сварки деталей методом оплавления, имеют обычно только одно поступательное движение. Здесь давление, приложенное к деталям, остается, примерно, постоянным, а перемещение детали — равномерным. В случае прерывания тока во вторичной цепи, имеющего иногда место при ручной сварке оплавлением, происходит выравнивание температуры нагрева по всей поверхности контакта.

На фиг. 43 представлена осциллограмма, на которой записан весь процесс сварки оплавлением двух круглых стержней  $d = 16$  мм продолжительностью 8 сек. на сварочной машине АСН-25 и шестой ступени мощности. Верхняя кривая, представляющая ток вторичной цепи, резко меняет свое значение по причине переменного сопротивления контакта. Очевидно падение напряжения в контакте полностью следует за кривой тока



вторичной цепи и имеет ту же форму. Однако напряжение на клеммах вторичного витка едва меняет свою амплитуду, что видно из нижней кривой напряжения  $E_2$ .

На основе приведенного выше описания физических процессов, происходящих при сварке оплавлением, можно будет в дальнейшем разрешить ряд практических вопросов, как то:

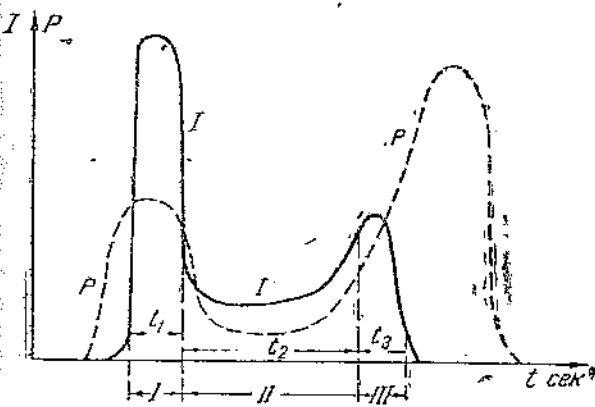
1) определить оптимальное время предварительного подогрева деталей и их оплавления;

2) определить необходимую мощность аппарата и расход электроэнергии;

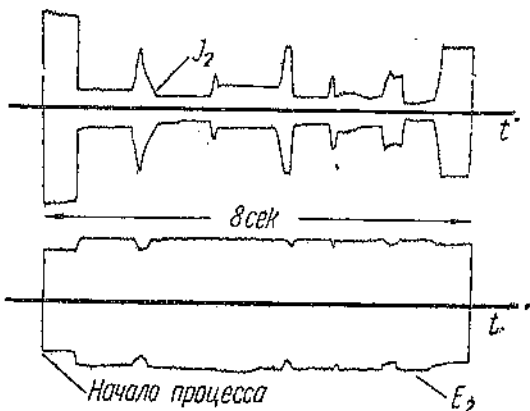
3) определить минимальную величину обгорания металла;

4) установить предельную скорость передвижения детали в зависимости от длительности оплавления.

Как было указано выше, весь процесс сварки оплавлением делится на три отдельные стадии работы: к первой стадии относится начальный момент сварки, при котором происходит предварительный подогрев металла.



Фиг. 44. Энергетические графики тока и давления, приложенных к изделию при сварке оплавлением.



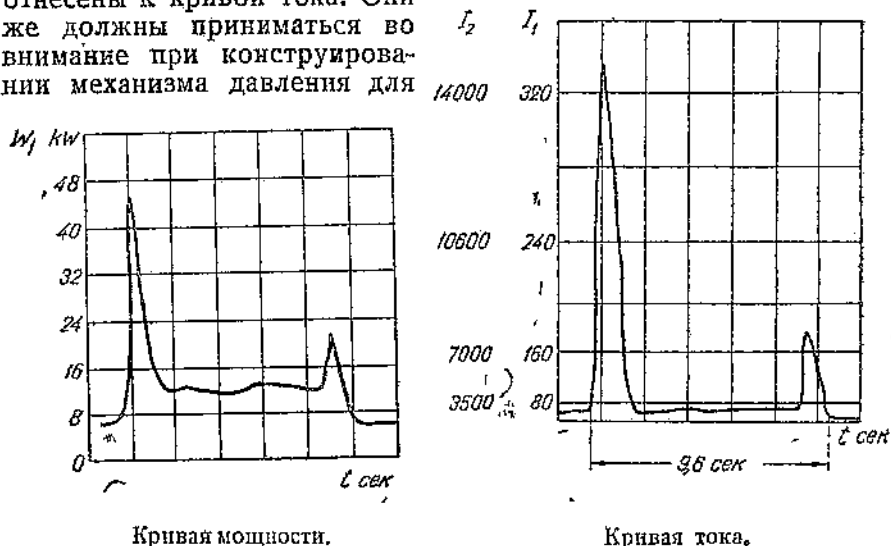
Фиг. 43. Осциллограмма сварочного тока и напряжения на вторичной обмотке трансформатора для всего процесса сварки методом оплавления.

Энергетический график процесса сварки оплавлением схематически представлен на фиг. 44.

Вторая стадия характеризуется выжиганием и оплавлением торцов деталей.

С точки зрения экономии количество выжигаемого металла должно быть минимальным. Это может быть достигнуто увеличением предварительного подогрева в первой стадии процесса сварки.

Третья стадия является наиболее кратковременной и охватывает момент окончательного сжатия деталей при полной осадке. Выключение тока производится в начале третьей стадии с тем, однако, чтобы в процессе окончательного сжатия металл шва еще некоторое время подогревался протекающим током. Как видно из схемы фиг. 44, наибольшая величина тока при сварке оплавлением протекает в сварочной цепи в момент первой стадии процесса; в остальных двух стадиях средняя величина тока резко снижается до 20—40% от первоначального значения. На диаграмме (фиг. 44) отдельные стадии процесса отнесены к кривой тока. Они же должны приниматься во внимание при конструировании механизма давления для



Кривая мощности.

Кривая тока.

Фиг. 45, 46. Диаграммы мощности и тока при сварке оплавлением круглых стержней сечением 200 мм<sup>2</sup>. Полное время сварки равно 9,6 сек.

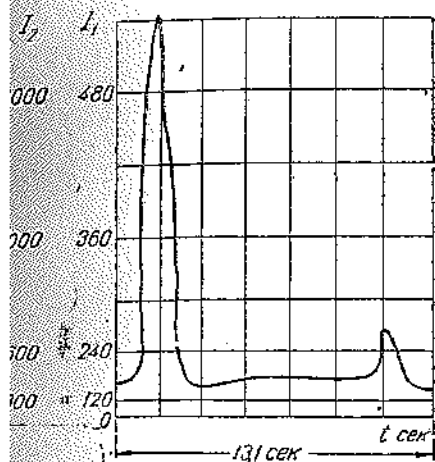
указанных стадий. Здесь уместно будет отметить новую тенденцию в области точечной и роликовой сварки, заключающуюся в применении переменного давления и приближении его графика к графику давления, имеющему место при сварке оплавлением.

Впервые аппараты с переменным давлением, предназначенные, главным образом, для точечной и роликовой сварки больших толщин малоуглеродистой стали, были предложены французской фирмой Сяки (Sciaky).

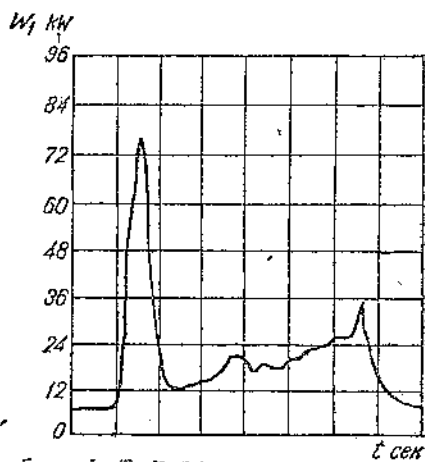
Картина процесса сварки оплавлением представлена на диаграммах тока и мощности, снятых одновременно самопишущими приборами.

На фиг. 45—46 даны кривые сварки оплавлением круглых стержней сечением в 200 мм<sup>2</sup>. Сварка производилась на седьмой ступени мощности аппарата АСН-25 в продолжение 9,6 сек. В этом случае вторая стадия процесса производилась при мощности, равной, примерно, одной четверти от максималь-

ого значения мощности первой стадии. Ток в сварочной цепи был авен при этом 2500 А, в то время как пиковое значение тока для первой стадии равно было 15500 А. Сварка стержней сечением 450 мм<sup>2</sup> на той же ступени мощности аппарата АСН-25, о в течение 13,1 сек., показана на фиг. 47—48. На диаграмме фиг. 47 средняя величина тока в момент оплавления приблизительно равнялась 8000 А, а для первой стадии—7000 А. Средняя величина мощности только во время оплавления равнялась 18 кВт (фиг. 48). Приведенные графики показывают, что при хорошей квалификации сварщика процесс



Кривая тока.

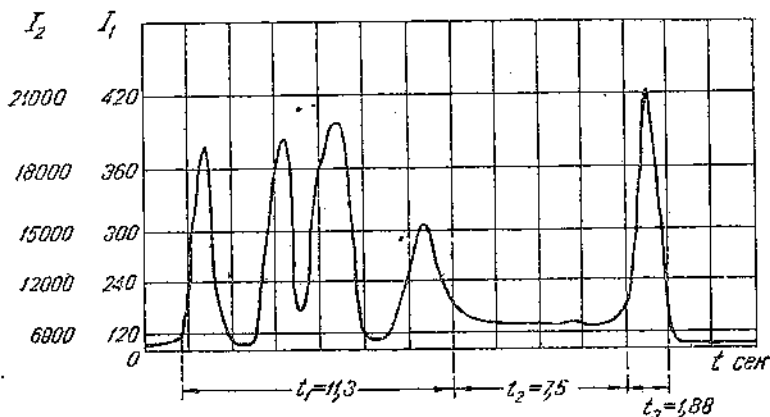


Кривая мощности.

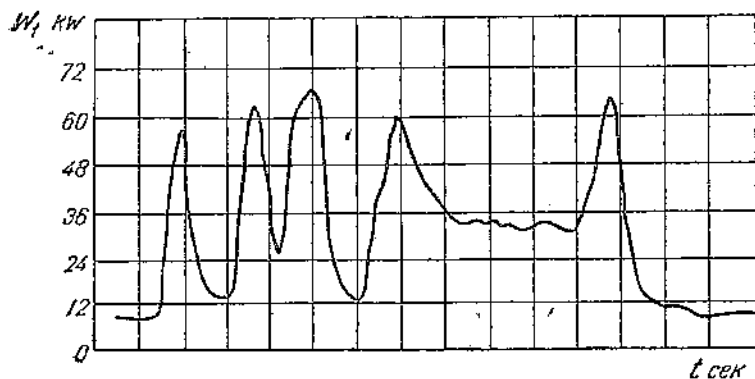
фиг. 47, 48. Диаграммы сварки оплавлением стержней сечения 450 мм<sup>2</sup> на VII ступени мощности машины АСН-25. Продолжительность сварки 13,1 сек.

плавления, даже в случае ручной регулировки, протекает довольно плавно. Для полноты картины приведем кривые тока (фиг. 49) и мощности (фиг. 50), записанные в момент сварки вух стержней малоуглеродистой стали большего сечения  $\gamma = 900 \text{ мм}^2$ , но на меньшей ступени мощности, чем в предыдущем случае, а именно, шестой. Полное время сварки равнялось 20,6 сек. В данном случае из-за недостатка мощности для гали этого сечения и неравномерности нагрева свариваемых контактов предварительный подогрев деталей пришлось производить поступательно-возвратными движениями стержня. Такое резкое изменение давления на электродах, производимое от уки, дает впечатление частого выключения вторичной цепи, как как во время сварки не удается заметить временного спаяния в сварочном контакте одного или, быть может, двух противоположащих выступов, замыкающих вторичный контур трансформатора и представляющих значительное сопротивление протекающему току.

В случае полного разрыва вторичной цепи ток, а также мощность первичной цепи должны быть равны величинам, соответствующим состоянию холостого хода трансформатора. В действительности же кривые фиг. 49—50 показывают, что никакого разрыва в данном случае нет, так как наименьшая мощ-



Кривая тока.



Кривая мощности.

Фиг. 49, 50. Диаграммы тока и мощности при сварке оплавлением стержней малоуглеродистой стали сечением  $900 \text{ мм}^2$  на VI ступени мощности машины АСН-25.

ность в момент подогрева равна по графику  $12 \text{ kW}$ , а расход мощности этого аппарата при холостом ходе для указанной ступени равен приблизительно  $0,7 \text{ kW}$ .

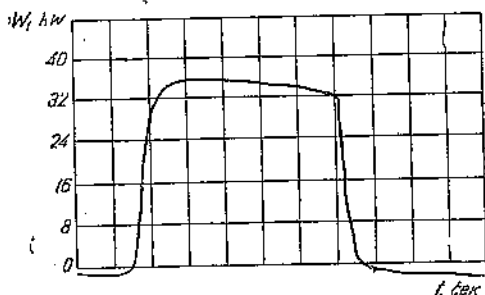
## 21. Расход мощности при сварке оплавлением

При сварке оплавлением расход мощности, примерно, на  $50\%$  меньше, чем при стыковой сварке без оплавления.

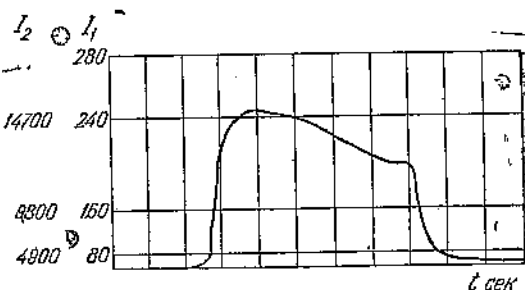
Для подтверждения сказанного приведем сравнение двух графиков тока и мощности, записанных при стыковой сварке, с приведенными выше графиками для сварки оплавлением. На диаграмме (фиг. 51—52) представлены кривые стыковой сварки без оплавления круглых стержней из малоуглеродистой стали сечением  $450 \text{ мм}^2$  при полном времени 11,3 сек. Эти условия технологического процесса весьма близки к приведенным уже выше для сварки оплавлением на графиках фиг. 47—48. Диаграммы фиг. 51—52 являются наиболее типичными для процесса стыковой сварки и характерны своим отличием от графиков сварки оплавлением.

Чтобы получить величину расхода мощности для сварки оплавлением по записанным кривым, необходимо прибегнуть к помощи планиметра. Разделив площадь кривой мощности на время продолжительности сварки (известное также по скорости передвижения регистрирующей ленты), легко получить величину средней мощности за весь процесс сварки одного образца. Так, например, средняя мощность при сварке оплавлением графика фиг. 48 равна  $19 \text{ kW}$ . При стыковой сварке таких же образцов без оплавления (фиг. 51) средняя мощность оказывается равной  $35 \text{ kW}$ . Приводя оба графика к величине энергии, выраженной в  $\text{kWсек.}$ , получим следующую картину: при сварке оплавлением указанных образцов расход энергии был равен  $250 \text{ kWсек.}$ , а при стыковой сварке таких же образцов без оплавления было израсходовано  $400 \text{ kWсек.}$  Таким образом можно считать установленным, что при сварке оплавлением расход энергии приблизительно наполовину меньше, чем при стыковой сварке без оплавления.

В табл. 16 приведены опытные данные расхода мощности, полученные при работе на аппарате АСН-25. Данные мощности в этой таблице являются средними величинами, найденными по снятым графикам на регистрирующем приборе.



Кривая мощности.



Кривая тока

Фиг. 51, 52. Диаграммы мощности и тока при стыковой сварке машины АСН-25 стержней сечением  $450 \text{ мм}^2$  без оплавления на VII ступени. Время сварки 11,3 сек.

Расход электроэнергии при сварке оплавлением малоуглеродистой стали на аппарате АСН-25

Сечение стержней мм <sup>2</sup>	Полное время сварки, сек.	Средняя мощность, забираемая из сети, kW	Расход электро- энергии, kWсек.
1000	13,0	38	500
900	17,0	33	560
450	6,0	31	186
450	17,0	18	305
300	7,5	18	135
200	8,7	9	70
200	6,0	18	90

Данные этой таблицы показывают, как увеличивается расход электроэнергии от продолжительности сварки. Так, например, при сварке стержней сечением 450 мм<sup>2</sup> и времени сварки 6' сек. было израсходовано 186 kWсек., а для сварки таких же образцов на меньшей ступени мощности, но при времени, равном 17 сек., расход энергии равнялся 305 kWсек.

Возвращаясь вновь к приведенным выше графикам, следует отметить, что при сварке оплавлением продолжительность нагревания деталей при первой стадии процесса безусловно влияет на величину времени выжигания металла. В случае быстрого предварительного нагревания (первая стадия) большой мощностью область нагревания деталей в процессе оплавления (вторая стадия) будет гораздо меньше, а следовательно, и количество обгорающего металла будет также меньше.

Если же процесс сварки деталей производить с малым предварительным подогревом, то количество обгорающего металла будет больше. Наименьший объем металла, который действительно необходимо оплавить, чтобы обеспечить нагрев, соответствующий температуре сварки, является неизвестной величиной. В связи с этим приводим аналитическое определение необходимой мощности, а также величины объема обгорающего металла.

## 22. Метод расчета

Диаграммы мощности, рассмотренные в этой главе, записанные для различных режимов сварки оплавлением, подтверждают, что наиболее высокая величина мощности требуется для первой стадии сварочного процесса. Далее при исследовании физических явлений сварки оплавлением было установлено, что первая стадия процесса ничем не отличается от стыковой сварки без оплавления, поэтому вычисление мощности, необходимой:

ля предварительного и вместе с тем интенсивного нагревания сталеи, ничем не отличается от приведенного выше метода асчета энергетического баланса для стыковой сварки.

Определение мощности аппарата для сварки оплавлением производится по максимальной величине мощности, необходимой для первой стадии процесса, с учетом продолжительности нагрузки в отношении всего цикла. Необходимой мощностью для первой стадии процесса следует считать ту мощность, при которой температура в сварочном контакте приближается к температуре плавления при заданном времени нагрева.

Что же касается вычислений продолжительности второй гадии, а также необходимого объема оплавления металла, то ни производятся на основании изложенной в предыдущей главе теории передачи тепла от контакта по всей детали. Напомним равнение распространения тепла от сварочного контакта, являющегося функцией времени продолжительности сварки и астояния от контакта, т. е.

$$T_{x,t} = T_k F\left(\frac{x}{2a\sqrt{t}}\right).$$

При оплавлении металла температура в отдельных физических точках контакта  $T_k$  достигает примерно величины температуры испарения металла. Температура металла в сечении детали, отдаленном от контакта на расстояние  $x$  и приходящем осле оплавления и осадки в неразъемное соединение, равна температуре пластического состояния данного металла и обозначена через  $T_{x,t}$ .

Чтобы определить продолжительность времени оплавления, о истечении которого температура сечения детали на расстоянии  $x$  от контакта достигнет значения пластического состояния равномерно по всему сечению, достаточно задаться величиной  $x$ .

Значение  $x$  относится к начальному моменту оплавления. аким образом по известным величинам  $T_k$  и  $T_{x,t}$  определяем значение сложной функции, т. е.

$$\frac{T_{x,t}}{T_k} = F\left(\frac{x}{2a\sqrt{t}}\right),$$

по диаграмме (фиг. 59) находим значение

$$m = \frac{x}{2a\sqrt{t}},$$

ткуда

$$\sqrt{t} = \frac{x}{2am},$$

де  $a$  вычисляют по данным табл. 15 и формулы (19');  $m$  определяют из графика фиг. 53.

Равным образом можно задаться временем продолжительности второй стадии  $t_2$  и по нему определить величину оплавления концов  $x$ .

**Пример 9.** Требуется сварить встык методом оплавления два стержня малоуглеродистой стали  $d = 30$  мм. Внутреннее сопротивление контакта, очищенного при распиловке прутков,  $r_{1к} = 0,005 \Omega$ ,  $\alpha = 0,7$ . Начальное давление, приложенное к электродам при помощи ручного рычага,  $P_1 = 100$  кг.

Вычислить ток, необходимый для подогрева деталей в первой стадии процесса, если нагрев поверхности контакта должен достигнуть при этом температуры плавления свариваемых металлов  $1530^\circ$ . Найти также время продолжительности оплавления концов.

**Решение**

$$R_{1к} = \frac{0,005}{100^{0,7}} = \frac{0,005}{25} = 0,0002 \Omega;$$

сечение стержня

$$q = \frac{\pi 3^2}{4} = 7,05 \text{ см}^2.$$

Задаемся, далее, продолжительностью первой стадии  $t_1 = 0,5$  сек.,

$$A = 2,74, \quad a = 0,42.$$

$$I_2^2 = \sqrt{\frac{T_p A q}{R_{1к} \sqrt{t}}} = \\ = \sqrt{\frac{1530 \cdot 7,05 \cdot 2,74}{0,0002 \cdot \sqrt{0,5}}} = \\ = \sqrt{21 \cdot 10^7} = 14500 \text{ А.}$$

Представляет интерес вычислить также температуру сечения стержня на некотором расстоянии от контакта, чтобы получить представление, как быстро нагреваются концы стержней, когда сварочный контакт нагрев до температуры плавления. Пусть  $x = 0,5$  см. Тогда

$$\frac{x}{2a\sqrt{t}} = \frac{0,5}{2 \cdot 0,42 \cdot \sqrt{0,5}} = 0,86.$$

По диаграмме фиг. 53 получаем  $F(0,86) = 0,28$ , откуда  $T_{x,t} = 0,28 \cdot 1530 = 430^\circ$ . Падение напряжения в контакте

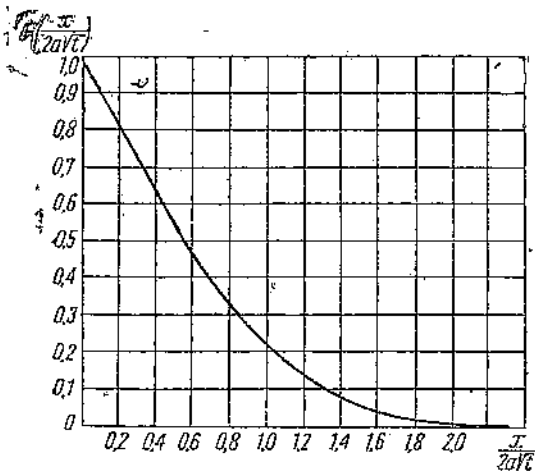
$$e_{1к} = I_2^2 R_{1к} = 14500^2 \cdot 0,0002 = 2,9 \text{ В.}$$

Мощность, выделяемая в контакте,

$$W_{1к} = I_2^2 R_{1к} = 14500^2 \cdot 0,0002 = 42 \text{ кВт.}$$

Полная мощность, расходуемая во всем внешнем контуре аппарата для первой стадии процесса, а также необходимое напряжение холостого хода вторичной цепи составляют из отдельных потерь в постоянных контактах и самом металлическом проводнике вторичного контура.

Подробное изложение метода расчета перечисленных потерь и необходимой суммарной мощности сделано выше для стыковой сварки без оплавления.



Фиг. 53. Диаграмма интеграла Гаусса.



Остается теперь определить время  $t_2$ , необходимое для оплавления концов стержней. Оно определяется заданной температурой отдаленного сечения стержня на расстоянии  $x$  от контакта, т. е.

$$\frac{T_{xt}}{T_k} = F\left(\frac{x}{2a\sqrt{t}}\right),$$

$$\frac{1450}{2400} = 0,6.$$

По графику фиг. 53 находим для  $F(0,6)$ :

$$\frac{x}{2a\sqrt{t}} = 0,43.$$

Знаясь теперь глубиной проникания тепла в толщу металла, равной, например, половине диаметра свариваемого стержня, определим время оплавления  $t_2$ , а именно:

$$\sqrt{t} = \frac{x}{2a \cdot 0,43} = \frac{1,5}{2 \cdot 0,42 \cdot 0,43} = 4,23,$$

т. е.  $t = 18$  сек.

Вычислим величину тока во время оплавления. Для этого необходимо сперва нажать усилием, приложенным к деталям в момент оплавления. Пусть давление электроды при второй стадии процесса в среднем составляет 300% от давления при первой стадии:

$$P_2 = 0,3P_1 = 30 \text{ кг.}$$

Внутреннее единичное сопротивление контакта при этой температуре следует считать (на основании исследований сопротивлений сварочного контакта в первом приближении) на 500% большим, чем в холодном состоянии:

$$r_{1k}' = 1,5r_{1k} = 1,5 \cdot 0,005 = 0,0075 \Omega.$$

Сопротивление сварочного контакта

$$R_{1k}'' = \frac{0,0075}{30^{0,5}} = \frac{0,0075}{5,5} = 0,00135 \Omega.$$

Вследствие ухудшений сварочного контакта  $\alpha$  берем равным 0,5. Ток во время давления генерирует в элементарных выступах контакта тепло, достигающее приблизительно температуры испарения металла.

Для малоуглеродистой стали температуру испарения металла принимаем равной 2400°. Тогда

$$I_2'' = \sqrt{\frac{2400 \cdot 7,05 \cdot 2,74}{0,00135 \cdot \sqrt{18}}} = \sqrt{9 \cdot 10^6} = 3000 \text{ А.}$$

Очевидно, что при другой продолжительности времени оплавления величина тока будет иной.

Теперь не представляет труда построить график тока и мощности за весь процесс сварки, имея в виду, что в начале осадки производят выключение тока, и в зависимости от давления в этот момент ток будет менять свое значение. В момент осадки исчисляется полное сращивание материала, и расчет величины тока должен быть произведен по формуле Джоуля для непрерывного проводника с указанной температурой. Усадочное да-

вление рекомендуется принимать порядка 2—5 кг/мм<sup>2</sup>, и даже более для случая сварки деталей с развитым периметром. Расчетный график тока для нашего примера представлен на фиг. 54.

Падение напряжения в контакте во время оплавления

$$e_{1\kappa}^{\text{II}} = I_2^{\text{II}} R_{1\kappa}^{\text{II}} = 3000 \cdot 0,00135 = 4\text{V.}$$

Полное напряжение холостого хода вторичной цепи трансформатора будет складываться из отдельных потерь напряжения в омическом и индуктивном сопротивлениях.

Этих данных достаточно для вычисления расхода электроэнергии для сварки двух деталей, а также для вычисления необходимой мощности сварочной машины.

Фиг. 54. Диаграмма тока для сварки оплавлением, полученная расчетным путем.

Таким образом необходимая мощность трансформатора машины для сварки оплавлением вычисляется по максимальной мощности (с учетом п. к. р.), требуемой для первой стадии сварки.

## Глава V

### СВАРОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

#### 23. Особенности сварочных трансформаторов

Для сварочных аппаратов применяется понижающий однофазный трансформатор с нормальным первичным напряжением в 220, 380 или 500 V. Вторичная цепь этого трансформатора состоит обычно из одного или двух витков с напряжением холостого хода, колеблющимся в зависимости от мощности аппарата и размеров внешнего контура в пределах от 2 до 25 V. Величина тока во вторичном контуре определяется тысячами и десятками тысяч ампер.

Такой трансформатор обычно не имеет холостого хода и включается каждый раз в сеть для производства одной сварки в тот момент, когда вторичный контур трансформатора замкнут на определенную нагрузку (сварочная деталь). Коммутация тока производится исключительно со стороны первичной обмотки. После сварки данной детали трансформатор отключают от сети при замкнутом вторичном контуре. Количество включений трансформатора в сеть, или количество отдельных сварок, довольно велико. Оно исчисляется при непрерывной работе от 500 до 3600 и более в час при точечной сварке, а при роликовой сварке доходит до 20000 в час и более.

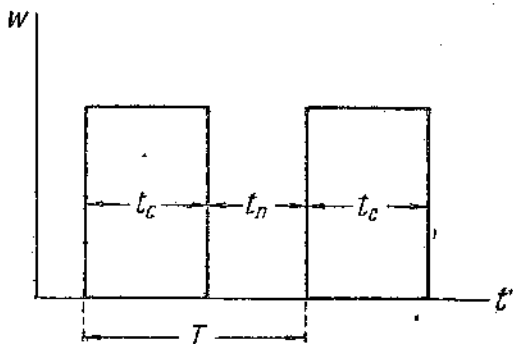
Трансформаторы в сварочных аппаратах методом сопротивления имеют повторно-кратковременный режим работы (сокращенно п. к. р.). П. к. р. определяется как отношение времени сварки к полному времени одного цикла  $T$  (сварка плюс пауза) (фиг. 55):

$$\text{п. к. р.} = \frac{t_{св}}{T} \cdot 100\%$$

В зависимости от технологического процесса, механизма управления машиной и вида сварки п. к. р. колеблется в широких пределах. Для точечных машин п. к. р.  $= 1 \div 40\%$ . Аппараты, предназначенные для роликовой сварки, имеют п. к. р.  $= 20 \div 60\%$ . Если аппарат предназначен для сварки определенных деталей с заранее известной продолжительностью сварки, то обмотки трансформатора необходимо рассчитать на величину тока, соответствующую среднему значению п. к. р.:

$$I_{расч} = I_{св} \sqrt{\frac{t_{св}}{T}}$$

Здесь  $I_{расч}$  — величина тока первичной обмотки эквивалентная длительному режиму, на которую рассчитывают трансформатор;  $I_{св}$  — величина тока первичной обмотки в момент сварки;  $t_{св}$  — время сварки;  $T$  — время полного сварочного цикла, куда входит продолжительность сварки, а также время, необходимое для закрепления и смены свариваемых деталей.



Фиг. 55. График мощности сварочного цикла  $t_c$  — время сварки в сек.;  $t_n$  — время паузы;  $T$  — полное время сварочного цикла.

Смысл этой формулы в том, что вследствие имеющих периодических перерывов в работе трансформатора, токовая нагрузка обмоток может быть увеличена, чтобы нагревание их приблизилось к допускаемым по нормам температурам в обмотках. Поэтому величина расчетного тока при учете п. к. р. оказывается меньше действительной величины тока.

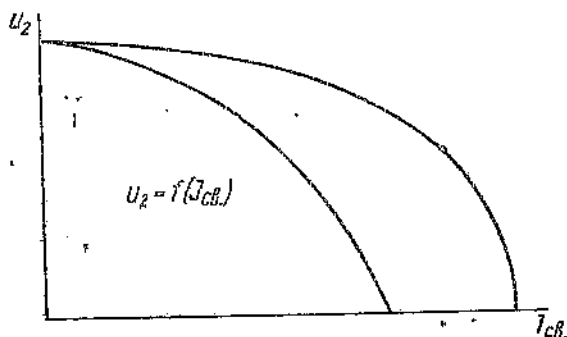
По общесоюзному стандарту на сварочные машины (ОСТ 2839) наибольшая длительность рабочего цикла  $T$  машины при указанных п. к. р. принимается равной 10 мин.

Нагрузка трансформатора в виде сварки является активной нагрузкой, однако коэффициент мощности сварочных машин колеблется обычно в пределах  $\cos \varphi = 0,4 \div 0,8$ . Понижение  $\cos \varphi$  происходит, главным образом, за счет индуктивного сопротивления внешнего контура, образованного верхней и нижней шинами, подводящими электрический ток от вторичного витка к сварочным электродам. Благодаря индуктивности вторичного

контура, неизбежной для таких аппаратов, внешняя характеристика

$$U = f(I_{св})$$

сварочной машины имеет спадающий вид (фиг. 56). Падающая характеристика ограничивает величину сварочного тока. При сварке тонких листов встык методом оплавления повышенная индуктивность внешнего контура обеспечивает более плавный и спокойный процесс сварки.



Фиг. 56. Внешняя характеристика  $U_2 = f(I_{св})$  машины для контактной сварки.

При роликовой или точечной сварке тонких листов круто падающая внешняя характеристика является более желательной, в особенности тогда, когда процесс ведется при помощи асинхронных токопрерывателей.

Кроме ограничения сварочного тока индуктивность внешнего контура позволяет также использовать повышенное напряжение вторичной обмотки в момент включения для частичного электрического пробоя тонких оксидных пленок, покрывающих обычно поверхность свариваемых деталей.

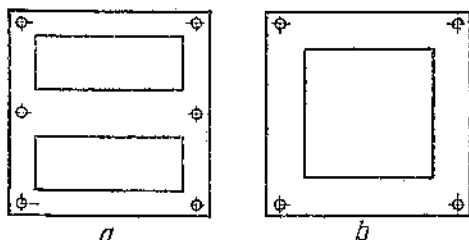
## 24. Конструкции сварочных трансформаторов

По сравнению с обычным силовым трансформатором к сварочному трансформатору предъявляются следующие дополнительные требования: 1) сварочный трансформатор должен давать достаточной мощностью, чтобы дать необходимую величину тока для сварки деталей наибольшего сечения, на которое рассчитана данная машина; 2) трансформатор должен обладать достаточной мощностью, чтобы обеспечить наибольшую производительность при сварке; 3) нагревание трансформатора не должно превышать допустимую температуру нагрева для данного класса изоляции обмоток.

Согласно ОСТ 2839 на сварочное оборудование „наибольшая наблюдаемая температура железного сердечника ограничивается температурой, допускаемой для первичной обмотки в зависимости от ее изоляции, но не должна превышать 95° С“. „Наибольшая наблюдаемая температура и превышение температуры для вторичного витка должны быть ограничены таким нагревом, при котором температура изоляции соседних частей не превосходит допускаемого для нее предела, но превышение температуры вторичного витка при этом не должно быть больше 140° С“.

Мощность сварочного трансформатора определяется, главным образом, заданной суммарной толщиной свариваемого материала, а также продолжительностью сварки.

Сердечники для сварочных трансформаторов применяются как броневые (фиг. 57, *a*), так и стержневые (фиг. 57, *b*). Характерными особенностями броневых трансформаторов являются большое сечение сердечника и малая высота его; следовательно, средняя длина магнитной цепи у них мала, а средняя длина витков обмотки велика. Стержневой трансформатор имеет обычно меньшее сечение сердечника и большую высоту, поэтому средняя длина магнитной цепи их довольно большая, а средняя длина витков обмотки малая. Таким образом при данной мощности стержневой трансформатор будет иметь меньшую площадь поперечного сечения железа сердечника и большее число витков обмотки, чем броневой трансформатор. Стержневые трансформаторы, как правило, выполняются с вертикальным расположением сердечников, а броневые — с горизонтальным. Выбор между стержневым и броневым трансформатором зависит отчасти от типа применяемой обмотки: дисковой или цилиндрической.



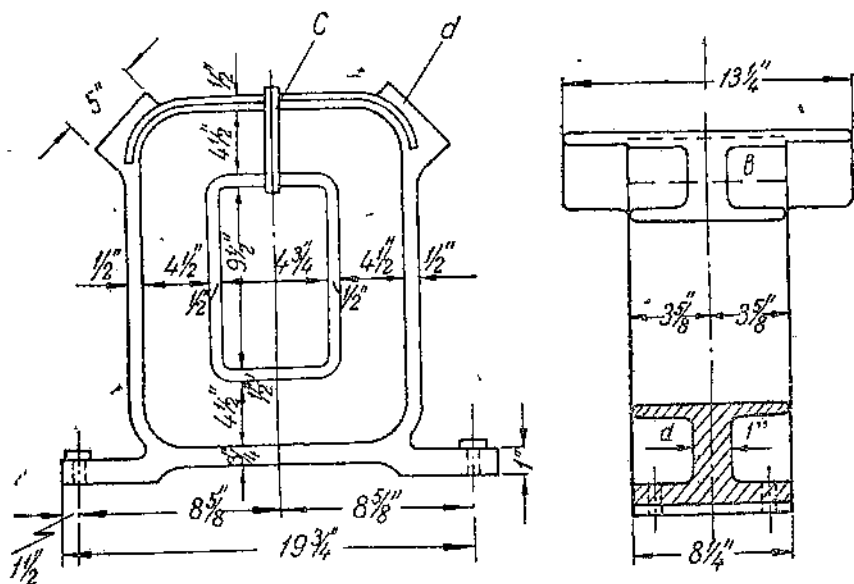
Фиг. 57. Сердечники трансформаторов:  
*a* — броневой; *b* — стержневой.

При естественном воздушном охлаждении трансформатора вертикальные каналы в обмотках активнее отводят тепло, чем горизонтальные каналы, поэтому при горизонтальном расположении сердечников предпочитают дисковую обмотку, а при вертикальном — цилиндрическую. Для сварочных трансформаторов, в которых имеется большое число отключений для ступенчатого регулирования мощности, дисковая обмотка является более удобной, чем цилиндрическая. Кроме того, так как в обмотках сварочных трансформаторов нагрузка носит ударный характер, в них возникают большие механические усилия. Однако дисковая обмотка вследствие жесткости крепления меньше влияет на понижение механической надежности трансформатора, чем менее жесткая конструкция у цилиндрической обмотки с большим количеством отводов. Поэтому для сварочных машин предпочитают применять трансформаторы броневых типа с дисковой обмоткой.

Вторичный контур сварочного трансформатора делится на две части: на вторичный виток, охватывающий железо трансформатора, и на токоподводящие шины (к электродам), образующие внешний контур. Весь вторичный контур может быть изготовлен из тонкой фольги (от 0,2 до 0,5 мм) или гибкого кабеля.

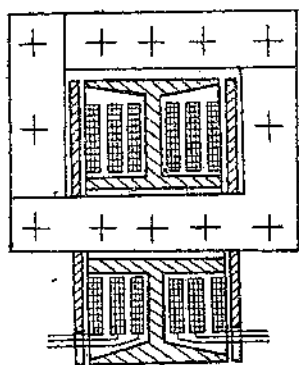
Наибольшее распространение для крупных машин получили вторичные витки, отлитые из меди, алюминия и других метал-

лов высокой электропроводности. На фиг. 58 показан литой вторичный виток из алюминиевой бронзы с основными размерами для стыкового аппарата на 100 кВА. Первичная обмотка



Фиг. 58. Вторичный виток, изготовленный из литой алюминиевой бронзы. Размеры в дюймах.

трансформатора расположена внутри вторичного витка, как это изображено на фиг. 59. Такое расположение обмоток защищает первую обмотку трансформатора от искр и механических повреждений, однако, теплоотдача с этой обмотки в окружающую среду ухудшается вследствие малого доступа воздуха. Охлаждение первой обмотки происходит отчасти через вторичный виток, охлаждаемый водой. Охлаждение вторичного витка осуществляется водой, циркулирующей в стальном или медном трубопроводе, залитом внутри витка. Диаметр такой трубки принимают равным  $6 \div 10$  мм.



Фиг. 59. Расположение первичной обмотки внутри вторичного витка.

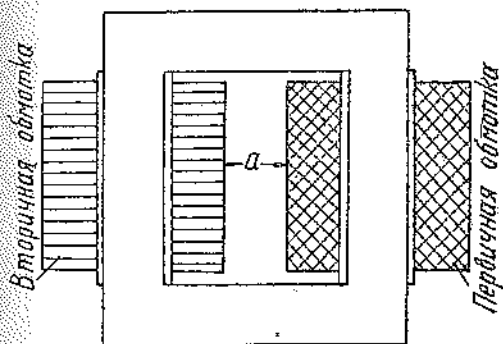
Отрицательная сторона литого алюминиевого витка заключается в том, что сечение его должно быть, примерно, в два раза больше, чем у витка литой меди, и под влиянием воды и тепла на контактной поверхности соединения с шинами быстро образуются окиси большого сопротивления. Литой вторичный виток является неподвижным, и для соединения его с подвижным электродом применяют обычно медную фольгу.

Трансформатор должен быть защищен от воды и масла, а также от попадания на него искр и брызг горящего металла при сварке. Особенно в аппаратах для сварки оплавлением необходимо защитить трансформатор от металлической пыли, образующейся при сварке. Эта тонкая металлическая пыль, падая сначала на изоляцию первичной обмотки, очень скоро проникает сквозь изоляцию и может вызвать (при достаточном количестве) короткое замыкание между катушками или между катушкой и корпусом.

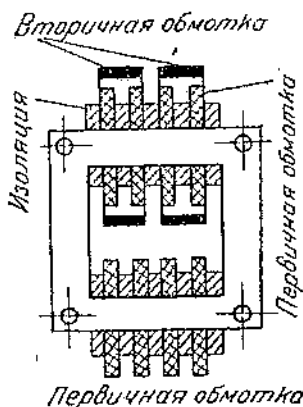
Чтобы вторичная обмотка охватывала полностью первичную, она должна быть как можно тоньше и выше.

## 25. Расположение обмоток в сварочных трансформаторах

От расположения обмоток по стержню магнитопровода зависит величина индуктивного рассеяния трансформатора, а, следовательно, и значение отдаваемой активной мощности. На фиг. 60—64 показаны различные способы расположения обмоток на стержне трансформатора. Если первичную обмотку по-



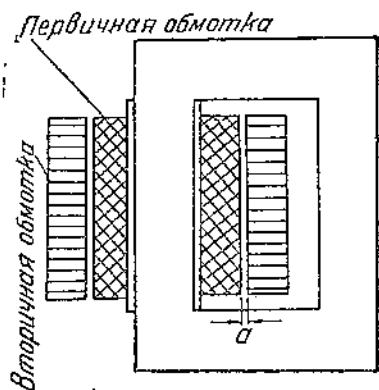
Фиг. 60. Сварочный трансформатор, у которого первичная обмотка сидит на одном стержне, а вторичная — на другом.



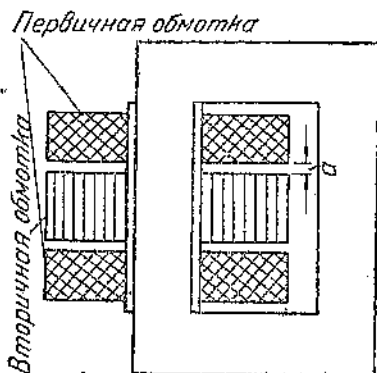
Фиг. 61. Первичная обмотка расположена на обоих стержнях, а вторичная обмотка — на одном стержне.

лечь на одном или двух стержнях трансформатора, а вторичную — на одном из них, как это показано на фиг. 60 и 61, то индуктивное сопротивление рассеяния самого трансформатора сильно возрастет. В результате такого расположения  $\cos \varphi$  самого трансформатора без внешнего контура будет значительно ниже, например, в зависимости от расстояния между внутренними краями катушек  $a \cos \varphi \approx 0,6 \rightarrow 0,7$ . Вместе с внешним контуром общий коэффициент мощности такого трансформатора еще больше понизится и может достигнуть в случае большого вылета порядка  $\cos \varphi_{\text{общ.}} \approx 0,3$ . Низкий  $\cos \varphi$  вызывает в свою очередь сильное уменьшение коэффициента полезного действия всей машины.

Обмотки располагают по керну так же, как и в нормальных силовых трансформаторах, придерживаясь правила создать трансформатор с наименьшими потерями. Это может быть до-

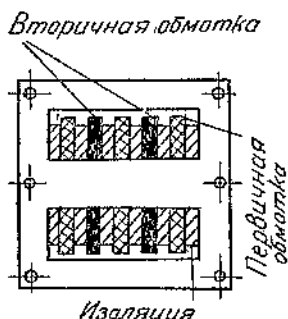


Фиг. 62. Цилиндрические обмотки сварочного трансформатора, расположенные на одном стержне.



Фиг. 63. Дисковые обмотки, расположенные на одном стержне.

стигнуто правильным выбором сечения проводников и наиболее тесным „переплетением“ первичной и вторичной обмоток между собой на одном и том же керне. При конструировании сварочных машин следует отделить неизбежные индуктивные потери вследствие магнитного рассеяния во внешнем контуре машины от рассеяния внутри самого трансформатора. Внутренние индуктивные потери должны быть доведены до минимума известными в трансформаторостроении методами расчета. Только при этом случае конструкция трансформатора обеспечивает более высокий коэффициент полезного действия для всей сварочной машины. В связи с этим расположение обмоток по керну сварочного трансформатора принципиально не отличается от расположения обмоток в нормальных силовых трансформаторах.



Фиг. 64. Дисковые обмотки, расположенные на броневом сердечнике.

Как при цилиндрических, так и при дисковых обмотках первичная и вторичная обмотки должны быть расположены на одном и том же керне.

## 26. Элементы расчета сварочного трансформатора

Выше были выведены уравнения для расчета необходимых данных мощности и вторичного напряжения при сварке методом сопротивления. Такой расчет сварочной машины применяется для сварки определенных деталей. Каждый сварочный



трансформатор имеет несколько ступеней мощности для регулирования сварочного процесса. Регулирование мощности обычно осуществляется при помощи переключения числа витков первичной обмотки. Сварочный аппарат малой мощности имеет 4—6 ступеней регулировки мощности. У машин большой мощности число ступеней выбирают в среднем равным от 7—8 до 15—25. Полученные вычислением данные тока и мощности следует отнести к предпоследней ступени, чтобы сварочная машина имела еще некоторый разрез мощности на последней ступени.

Исходными данными для определения величины напряжения каждой ступени является коэффициент, характеризующий отношение величины напряжения предпоследней ступени к значению напряжения первой ступени. В практических условиях этот коэффициент принимают равным  $1,5 + 1,7$ , т. е.

$$\frac{U_{2(n-1)}}{U_{2(1)}} = 1,7;$$

откуда

$$U_{2(1)} = \frac{U_{2(n-1)}}{1,7},$$

где  $n$  — число ступеней;

$U_{2(1)}$  — напряжение холостого хода во вторичной цепи для первой ступени;

$U_{2(n-1)}$  — напряжение холостого хода вторичной цепи для предпоследней ступени регулировки.

Разница величины напряжения между одной ступенью и последующей определяется эмпирической формулой

$$\Delta U = \frac{U_{2(n-1)} - U_{2(1)}}{n - 2}.$$

В этой формуле напряжение предпоследней ступени известно из расчета внешнего контура сварочной машины, а число ступеней  $n$  обычно задаются. Тогда напряжение остальных ступеней определяется

$$U_{2(II)} = U_{2(I)} + \Delta U;$$

$$U_{2(III)} = U_{2(II)} + \Delta U;$$

$$U_{2(IV)} = U_{2(III)} + \Delta U;$$

и

$$U_{2(n)} = U_{2(n-1)} + \Delta U.$$

Однако указанное распределение напряжения точно не выдерживается. Оно определяется расположением витков первой обмотки и удобствами отпайки отвлечения для каждой ступени. Число витков для каждой ступени на первичной стороне определяется по коэффициенту трансформации для каждой ступени

$$W_1 = \frac{U_1}{U_{2(I)}} \cdot W_2; \quad W_{1(II)} = \frac{U_1}{U_{2(II)}} \cdot W_2; \quad W_{1(III)} = \frac{U_1}{U_{2(III)}} \cdot W_2.$$

Трансформатор, следовательно, должен быть рассчитан на предпоследнюю ступень мощности. Однако обмотки трансформатора воспринимают повышенную плотность тока благодаря прерывистой нагрузке сварочных машин. Сечение проводника обмоток определяется, исходя из длительного тока нагрузки согласно приведенной выше формуле.

Плотность тока первичной обмотки с естественным воздушным охлаждением для катаной меди принимают  $1,7-2,0 \text{ А/мм}^2$ .

Индукция в железе допускается порядка  $12\,000-14\,000$  гауссов для предпоследней ступени мощности трансформатора.

Расчет вторичного витка производится также для длительного режима. Допускаемая (длительная) плотность тока для электролитической меди при условии водяного охлаждения вторичного витка  $\Delta = 2,2-2,5 \text{ А/мм}^2$ ; для листовой меди и при водяном охлаждении  $\Delta = 1,8-2 \text{ А/мм}^2$ ; для литого алюминия с водяным охлаждением  $\Delta = 1-1,2 \text{ А/мм}^2$ . При естественном воздушном охлаждении указанные данные должны быть снижены на  $20-25\%$ .

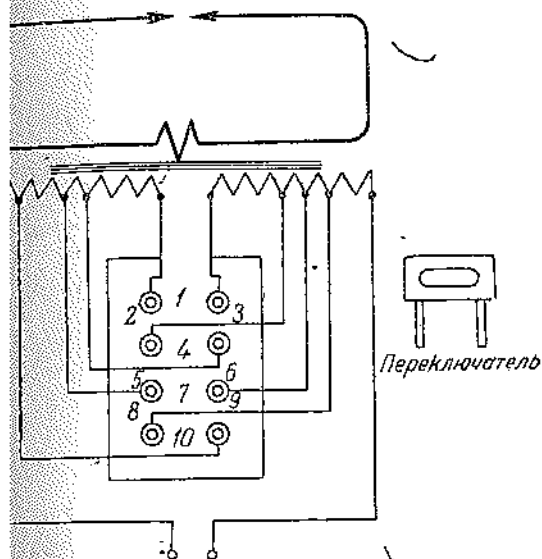
Количество витков вторичной обмотки зависит от величины напряжения на вторичной стороне. До напряжения в  $10-12 \text{ В}$  обычно обходятся одним витком. При точечной сварке переносными клещами, где вторичное напряжение достигает  $12-25 \text{ В}$ , вторичная обмотка трансформатора изготавливается из двух витков. Внешний контур сварочной машины составляет из медной фольги толщиной  $0,2-0,5 \text{ мм}$  марки М1 (ОСТ 8616). Внешний контур обычно не имеет изоляции и подвергается интенсивному воздушному охлаждению. Допускаемая (длительная) плотность тока  $\Delta = 2,8-3,2 \text{ А/мм}^2$ . При точечной сварке переносными клещами внешний контур составляет из гибких кабелей длиной  $3-4 \text{ м}$ . Для большей гибкости переплетают между собой  $3-4$  кабеля и укладывают в одном резиновом шланге, по которому для охлаждения циркулирует вода. Длительная плотность тока для такого кабеля допускается  $6-12 \text{ А/мм}^2$ . Коэффициент заполнения для гибкого провода принимают равным  $0,7-0,8$ . Резиновый шланг подбирается по ОСТ 831. Внутренний диаметр шланга берется на  $50-60\%$  более диаметра скрученных вместе кабелей. Что же касается расчета самого трансформатора сварочной машины, то он ничем не отличается от расчета нормальных силовых трансформаторов.

## 27. Схемы регулирования мощности сварочных машин

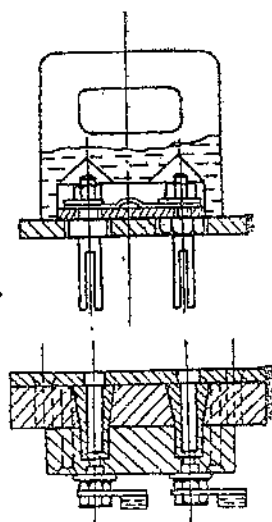
Регулирование мощности по отдельным ступеням производится при помощи переключения витков первичной обмотки. Переключение ступеней производится при разомкнутой вторичной цепи (холостой ход). Следует отметить три основных вида переключателей: штепсельные, рубящие и скользящие. Плотность тока в штепсельном и рубящем контактах допускают  $11-15 \text{ А/мм}^2$  для материала медь — латунь. Плотность тока скользящих контактов зависит от силы их сжатия и материала контактов.

На фиг. 65 показана схема регулирования мощности штепсельным переключателем. Штепсельный переключатель показан на фиг. 66. Схемы переключения ступеней мощности при помощи рубящих контактов приведены на фиг. 67. Кроме способа изменения витков в первичной обмотке применяют еще способ регулирования мощности при помощи отдельного автотрансформатора (фиг. 68).

В сварочных машинах автотрансформатор применяется, главным образом, для ступенчатого понижения подводимого напряжения сети вместо многочисленных отводов в первичной обмотке



Переключатель



Фиг. 65. Схема переключения мощности со стороны первичной обмотки сварочного трансформатора. 1—10 — ступени мощности.

Фиг. 66. Штепсельный переключатель к сварочной машине.

автотрансформатора. Эквивалентная схема понижающего автотрансформатора показана на фиг. 69. Напряжение  $V_1$  между точками  $A—B$ , идущее к сварочному трансформатору, относится к напряжению сети  $V_c$ , как числа их витков.

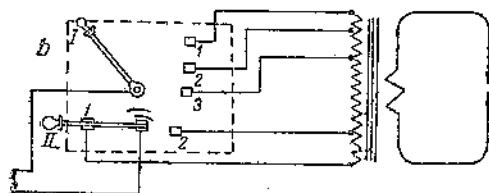
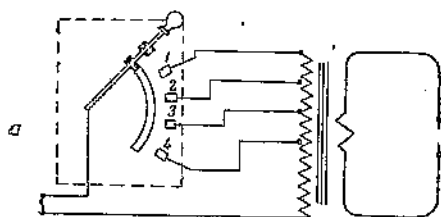
$$\frac{V_1}{U_c} = \frac{W_2}{W_1 + W_2} \quad (38)$$

Пренебрегая током холостого хода, можно написать следующее равенство:

$$I_1 (W_1 + W_2) = I_2 W_2,$$

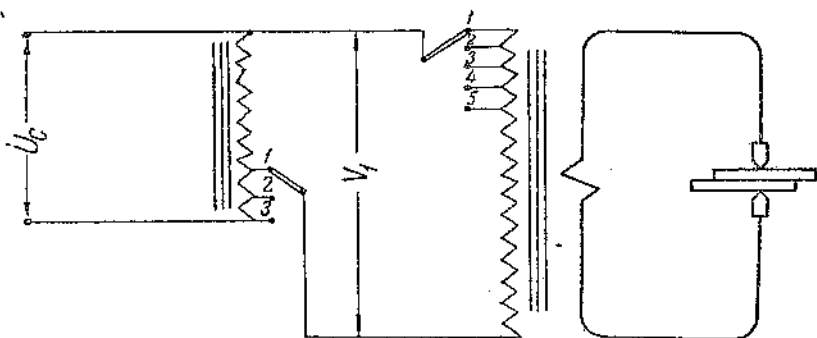
$I_1$  — ток, потребляемый из сети. Из фиг. 69 видно, что

$$I_1 = I_2 - I_1 \cdot \frac{W_1}{W_2} = I_2 \cdot \frac{W_2}{W_1 + W_2} \quad (39)$$



Фиг. 67. Схема переключения мощности при помощи рубящих контактов.

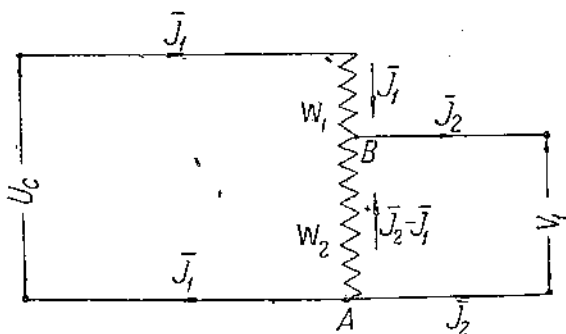
*a* — схема для машин малой мощности; *b* — схема с двумя рубильниками I и II для машин средней и большой мощности; 1—3 — контакты.



Фиг. 68. Схема регулирования мощности сварочной машины при помощи автотрансформатора.

1—3 — клеммы;  $U_c$  — напряжение сети;  $V_1$  — напряжение, снимаемое с автотрансформатора.

Фиг. 69. Эквивалентная схема регулирования мощности сварочной машины с автотрансформатором.



Обмотка автотрансформатора имеет несколько ответвлений и ступенчатой регулировки напряжения, подводимого к сварочному трансформатору. Помимо двух или трех ступеней регулировки автотрансформатора имеется иногда также ряд ответвлений на самом сварочном трансформаторе. Если ступенчатый переключатель автотрансформатора находится на первой ступени, то подводимое к сварочному трансформатору напряжение выше напряжения сети, если на третьей — то сварочный трансформатор оказывается включенным непосредственно в сеть и имеет наивысшую мощность, а автотрансформатор остается включенным параллельно сварочному трансформатору и не участвует в сварочном процессе.

В сварочных машинах с автотрансформатором коэффициент мощности понижается и находится в диапазоне  $\cos \varphi = 0,25—0,5$ . Такое понижение  $\cos \varphi$  объясняется тем, что часть обмотки автотрансформатора, включенная последовательно со сварочным трансформатором, работает как дроссельная катушка и увеличивает тем самым суммарное индуктивное сопротивление сварочной машины. В сварочных машинах без автотрансформатора  $\cos \varphi = 0,5—0,80$ . Для ступенчатого регулирования мощности сварочных машин может быть применен также отдельный дроссель, включенный последовательно со сварочным трансформатором, как это имеет место в трансформаторах для дуговой сварки, а регулировка — при помощи переключения витков обмотки дросселя.

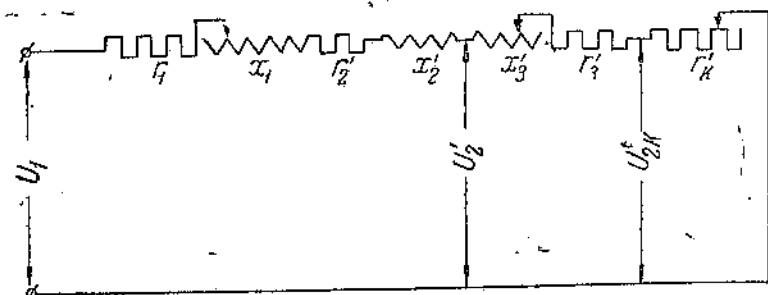
### Эквивалентная схема и диаграммы сварочной машины при нагрузке

На фиг. 70 представлена эквивалентная схема сварочного трансформатора. На этой схеме обозначают:

- $r_1$  и  $X_1$  — активное и индуктивное сопротивления в первичной цепи;
- $r_2'$  и  $X_2'$  — активное и индуктивное сопротивления вторичной обмотки, приведенные к первичной цепи;
- $X_3'$  — приведенное к первичной цепи индуктивное сопротивление внешнего контура машины;
- $r_3'$  — приведенное к первичной цепи активное сопротивление шин и постоянных контактов внешнего контура;
- $r_k'$  — приведенное к первичной цепи активное сопротивление сварочного контакта.

Согласно эквивалентной схеме пять сопротивлений из семи ( $X_2, X_2', X_3'$  и  $r_k'$ ) представляют собой переменные значения, которые изменяются в широком диапазоне и зависящие от технологии сварочного процесса. Сопротивления  $r_1, X_1$  и  $X_2'$  меняются при соответственном переключении витков (ступени мощности) первичной обмотки. Лишь два сопротивления ( $r_2'$  и

$r_3'$ ) остаются постоянными при условии постоянства частоты тока.  $X_3'$  меняется только в случае изменения размеров окна внешнего контура.  $r_k'$  меняется от характера свариваемых деталей. Как видно из эквивалентной схемы, ток холостого хода  $i_0$



Фиг. 70. Эквивалентная схема машины для контактной сварки.

не принят здесь во внимание, несмотря на то, что в сварочных трансформаторах он достигает, примерно, 10—20% нагрузочного тока. Значение тока холостого хода действительно велико,

но необходимо иметь в виду, что ток  $i_0$  складывается с нагрузочным током геометрически, поэтому ошибка получается весьма незначительной.

Векторная диаграмма сварочного трансформатора, соответствующая эквивалентной схеме, представлена на фиг. 71. На этой диаграмме все параметры соответствуют одному какому-нибудь сварочному режиму.

$\bar{U}_1$  есть вектор напряжения сети; чтобы найти интересующие нас величины, например,  $\bar{U}_2'$ , надо сперва из вектора  $\bar{U}_1$

Фиг. 71. Потенциальная диаграмма сварочной машины.

вычесть вектор падения напряжения в первичной цепи  $I_1 Z_1$ , являющийся результирующим вектором при сложении векторов активного и индуктивного падения напряжений  $AC = AB + BC$ .  $OC$  есть вектор индуцированной э. д. с.  $E_1 = E_2'$ , равной  $OC = OA - AC$ . Из вектора  $E_2'$  вычитаем активные и индуктивные падения напряжения во вторичном витке сварочного трансформатора и получаем искомый вектор напряжения  $\bar{U}_2'$ ;  $OC - CG = OG$ .

Треугольники  $ABC$  и  $CDG$  имеют две параллельные стороны, а именно:  $AB \parallel CD$  и  $BC \parallel DG$ , поэтому можно складывать вначале векторы индуктивных падений напряжений, а затем векторы активных падений напряжений, т. е.  $\overline{AG} = \overline{AB} + \overline{BF} + \overline{FD} + \overline{DG}$ . Полученный треугольник  $AFG$  характеризует параметры самого трансформатора и называется треугольником короткого замыкания. Вектор падения напряжения в сварочном контакте  $\overline{U}'_{2к}$  может быть найден, если вычесть из вектора  $\overline{U}'_2$  вектор  $\overline{GL} = \overline{I}'_2 \overline{Z}'_3$ , где  $\overline{I}'_2 \overline{Z}'_3$  есть вектор, равный сумме векторов падений напряжений в активном и индуктивном сопротивлениях внешнего контура сварочной машины.

Как видно из векторной диаграммы, вектор  $\overline{U}'_{2к}$  совпадает по фазе с вектором тока, так как сварочный контакт является омической нагрузкой. Треугольник внешнего контура  $GKL$  характеризует падение напряжения во внешней цепи.

## 29. Индуктивность рассеяния обмоток сварочного трансформатора

Выше уже было указано, что расположение обмоток сварочного трансформатора будет наиболее правильным тогда, когда

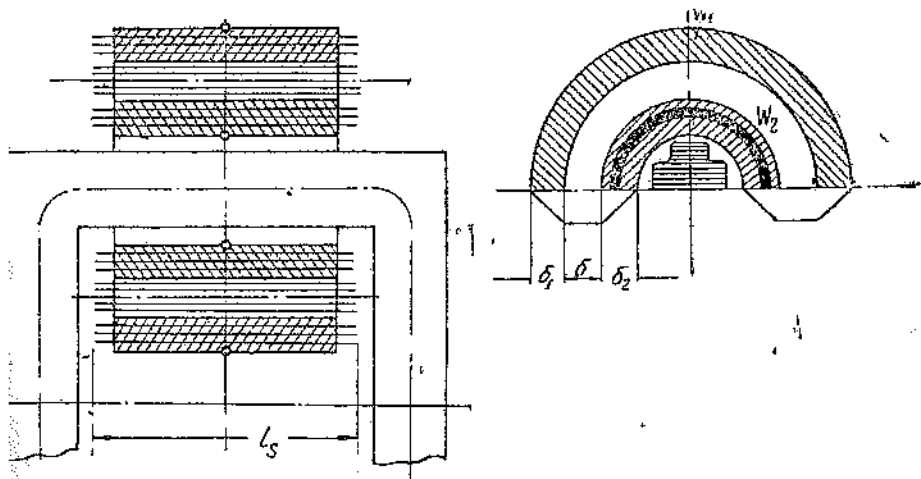


Рис. 72, 73. Приведенная картина полей рассеяния цилиндрических обмоток трансформатора.

на одном и том же керне расположены первичная и вторичная обмотки, независимо от того, является ли обмотка цилиндрической или дисковой. Не вдаваясь здесь в подробное исследование физического явления рассеяния в обмотках трансформатора так как оно обстоятельно изложено во всех нормальных курсах (соответствующей дисциплине), приводим все же окончательные формулы расчета рассеяния без их аналитического вывода.

## Цилиндрическая обмотка

На фиг. 72—73 представлено схематическое изображение трансформатора с цилиндрическими обмотками. На этой фигуре обозначают:

- $W_1$  — число витков первичной обмотки;
- $W_2$  — число витков вторичной обмотки;
- $\delta_1$  и  $\delta_2$  — ширина первичной и вторичной обмоток в см;
- $\delta$  — величина зазора между обмотками.

Обозначим:

- $d_1'$  и  $d_1''$  — внутренний и внешний диаметры первичной обмотки;
- $d_1$  — средний диаметр первичной обмотки, равный

$$d_1 = \frac{d_1' + d_1''}{2}.$$

- Средняя длина витка первичной обмотки  $l_1 = \pi d_1$  см;  $d_2'$  и  $d_2''$  — внутренний и внешний диаметры вторичной обмотки в см;
- $d_2$  — средний диаметр вторичной обмотки, равный

$$d_2 = \frac{d_2' + d_2''}{2}.$$

$l_2 = \pi d_2$  см — средняя длина витка вторичной обмотки.

Средняя длина витка обеих обмоток  $l = \frac{l_1 + l_2}{2}$  см;

$b$  — высота рассеивающей обмотки, измеренная параллельно к линиям рассеяния в см;

$l_s$  — расчетная длина индукционной линии рассеяния в см, которая определяется по формуле проф. Роговского:

$$l_s = \frac{b}{1 - \frac{\delta_1 + \delta_2 + \delta}{\pi \cdot b}} \text{ см.}$$

Одним из методов уменьшения джоулевых потерь в цилиндрической обмотке с естественным воздушным охлаждением является увеличение ее поверхности охлаждения. С этой целью иногда цилиндрическую обмотку на отдельные катушки и образуют между ними воздушные каналы, перпендикулярные к оси стержня. Ширина этих каналов также входит в размеры высоты рассеивающей обмотки.

Коэффициент самоиндукции рассеяния для первичной обмотки равен:

$$L_{S_1} = 1,25 W_1^2 \frac{l_1}{l_s} \left( \frac{\delta_1}{3} + \frac{\delta}{2} \right) 10^{-8} \text{ Н,} \quad (40)$$

для вторичной обмотки:

$$L_{S_2} = 1,25 W_2^2 \frac{l_2}{l_s} \left( \frac{\delta_2}{3} + \frac{\delta}{2} \right) 10^{-8} \text{ Н.} \quad (41)$$



Суммарный коэффициент самоиндукции обеих обмоток:

$$L_S = L_{S_1} + L_{S_2}' = L_{S_1} + L_{S_2} \frac{W_1^2}{W_2} \text{H.} \quad (42)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обеих обмоток трансформатора выразится:

$$X_S = \omega L_S = 7,95fW_1^2 \frac{l}{l_S} \left( \delta + \frac{\delta_1 + \delta_2}{3} \right) 10^{-8} \Omega. \quad (43)$$

В последней формуле вторичная обмотка приведена к первичной.

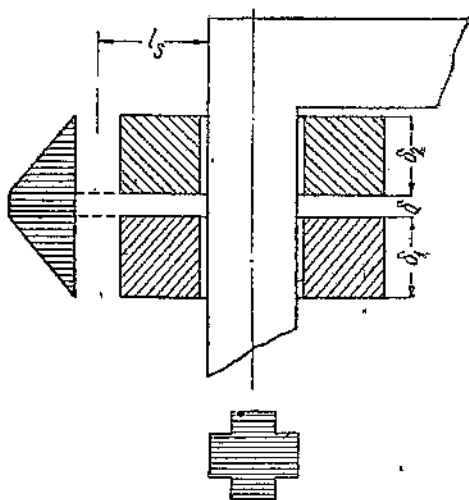
### Дисковая обмотка

На фиг. 74 показан трансформатор с дисковыми обмотками (обозначения прежние). Расчет индуктивности рассеяния для трансформаторов с дисковыми обмотками производят для одной катушки и полученный результат умножают на число всех катушек  $m$  первичной обмотки, полагая при этом, что вторичная обмотка приведена к первичной:

$$X_S = 3,95fW_1^2 m \frac{l}{l_S} \left( \delta + \frac{\delta_1 + \delta_2}{6} \right) 10^{-8} \Omega. \quad (44)$$

Указанные формулы справедливы и для стержневого и для броневого трансформаторов.

В сварочных трансформаторах имеются еще отвлечения в первичной обмотке для регулирования мощности. Кроме того, вторичный виток не всегда охватывает полностью по высоте первичную обмотку, поэтому рассеяние трансформатора должно возрасти. Для учета дополнительного сопротивления рассеяния следует увеличить значение  $X_S$  на 10%.



Фиг. 74. Расположение дисковых обмоток на стержне трансформатора.

### 30. Индуктивность рассеяния внешнего контура сварочной машины

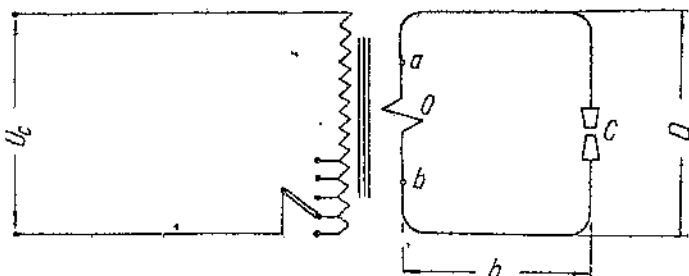
Общая индуктивность рассеяния вторичного контура в сварочных аппаратах является суммой индуктивности вторичного витка  $a-o-b$  и внешнего контура  $a-c-b$  фиг. 75. Вторичный виток  $a-o-b$  магнитно связан с первичной обмоткой, и его индуктивность определяют по параметрам первичной цепи

расчетным или опытным путем. Что же касается внешнего контура  $a-c-b$ , то индуктивность его зависит, главным образом, от геометрических размеров самого контура  $h$  и  $D$ . Индуктивность внешнего контура  $a-c-b$  будет найдена, если вычислим магнитный поток, пронизывающий всю площадь внешнего контура.

Обозначим через  $H_x$  напряженность магнитного поля на расстоянии  $x$  от оси одного из проводов, тогда

$$H_x = \frac{2I_{abc}}{x}. \quad (45)$$

Далее, найдем поток, пронизывающий элементарную площадку  $dx$  общей площади контура  $a-c-b$ . Этот поток будет очевидно равен  $B_x l \cdot dx$ . Для воздуха и немагнитных материалов коэффициент проницаемости  $\mu = 1$ , следовательно,  $B_x = H_x$ . Количество



Фиг. 75. Обозначение участков внешнего контура сварочной машины.

магнитных линий, созданное одной шиной, получим при суммировании выражения элементарного потока в пределах от  $R$  до  $D-R$ , где  $R$  — радиус сечения шины, а  $D$  — расстояние между шинами (фиг. 75). Для получения всего магнитного потока между проводниками контура необходимо найденную сумму удвоить, чтобы учесть симметричный поток, созданный вокруг другой шины. Затем необходимо еще прибавить к вычисленному значению влияние магнитного потока, развиваемого внутри самой шины.

Полное количество индукционных линий, пронизывающих контур  $a-c-b$ , будет в свою очередь равно сумме магнитного потока в пространстве внешнего контура и среднего числа индукционных линий, с которыми сцеплена каждая шина внутри себя; оно будет равно окончательно (без подробного вывода):

$$\Phi = 4I_{abc} l \ln \frac{D-R}{R} + 2\mu I_{abc} \frac{l}{2} = I_{abc} l \left( 4 \ln \frac{D-R}{R} + \mu \right).$$

Индуктивность рассматриваемого внешнего контура получим из последнего уравнения при токе, равном единице:

$$L = l \left( 4 \ln \frac{D-R}{R} + \mu \right) 10^{-9} \text{ H.}$$

$$X = l \omega \left( 4 \ln \frac{D-R}{R} + \mu \right) 10^{-9} \Omega. \quad (46)$$

Значения  $l$ ,  $R$  и  $D$  взяты в см.

Выведенное значение индуктивности относится к контуру, состоящему из параллельных шин одинакового диаметра. Этой формулой можно воспользоваться при расчете индуктивного сопротивления внешнего контура точечного аппарата с переносными сварочными клещами. После того как вычислено индуктивное сопротивление внешнего контура, можно определить суммарную индуктивность всего сварочного аппарата (индуктивность внешнего контура плюс индуктивность трансформатора).

### 31. Формулы для приближенного вычисления индуктивного сопротивления внешнего контура сварочных машин

1. Круглый прямолинейный стержень длиной  $l$  см радиуса  $R$  см, состоящий из металла с магнитной проницаемостью  $\mu$ , имеет следующую формулу для определения индуктивного сопротивления  $X$  в омах:

$$X = l\omega \left[ \left( \ln \frac{4l}{R} - 1 + \mu \right) - \mu \frac{k^2}{48} \left( 1 - \frac{13}{180} k^2 \right) \right] 10^{-9} \Omega, \quad (47)$$

где  $k = \mu\omega\gamma q$ ;  $\omega = 2\pi f$  — круговая частота;

$q$  — сечение проводника в см<sup>2</sup>;

$\gamma = \frac{1}{\rho}$  — удельная проводимость материала проводника, взятая в электромагнитных единицах.

Если  $k > 2$ , то формула (47) принимает следующий вид:

$$X = l\omega \left[ \left( \ln \frac{4l}{R} - 1 + \mu \right) - \frac{1}{2} \mu \left( 1 - \sqrt{\frac{2}{k}} \right) \right] 10^{-9} \Omega. \quad (48)$$

Здесь  $\ln$  — натуральный логарифм при основании  $e$ .

2. Стержень имеет прямоугольное сечение  $b \cdot h$ ; длина его равна  $l$ , а  $\mu = 1$ . Тогда

$$X = l\omega \left[ \ln \frac{4l}{h+b} + 1 + \frac{0,447(h+b)}{l} \right] 10^{-9} \Omega. \quad (49)$$

Если  $h \gg b$ , то

$$X = l\omega \left( \ln \frac{4l}{h} + 1 \right) 10^{-9} \Omega. \quad (50)$$

Разобранные два случая применимы для расчета индуктивного сопротивления внешнего контура, составленного из отдельных частей шин. Для такого контура расчет должен производиться по отдельным участкам, а затем суммироваться.

3. Индуктивное сопротивление прямоугольного контура со сторонами прямоугольника  $a$  и  $b$  и состоящего из шин круглого сечения радиуса  $R$ , выражается следующей формулой:

$$X = 4\omega \left[ a \ln \frac{2ab}{R(a + \sqrt{a^2 + b^2})} + b \ln \frac{2ab}{R(b + \sqrt{a^2 + b^2})} - \xi(a+b) + \right. \\ \left. + 2\sqrt{a^2 + b^2} + 2R \right] 10^{-9} \Omega, \quad (51)$$

где

$$\xi = 2 - \frac{1}{4} \mu + \mu \frac{k^2}{96} \left( 1 - \frac{13}{180} k^2 \right). \quad (52)$$

4. Индуктивное сопротивление прямоугольного контура сторонами прямоугольника  $a$  и  $b$  и состоящего из шины прямоугольного сечения  $p \cdot h$  при  $\mu = 1$  выражается следующей формулой:

$$X = \omega \left[ 4a \ln \frac{2ab}{(p+h)(a + \sqrt{a^2 + b^2})} + 4b \ln \frac{2ab}{(p+h)(b + \sqrt{a^2 + b^2})} - 2(a+b) + 8\sqrt{a^2 + b^2} + 1,788(p+h) \right] 10^{-9} \Omega. \quad (53)$$

При расположении проводника вблизи магнитных масс индуктивное сопротивление контура значительно возрастает. Однако последнее обстоятельство не учитывается приведенными формулами, хотя индуктивное сопротивление может увеличиться в два-три раза.

*Пример 10.* Вычислить индуктивное сопротивление внешнего контура сварочной роликовой машины АШ-40 для минимального расстояния между электроподдержателями. Размеры внешнего контура таковы: длина  $a = 80$  см, высота  $b = 16$  см, диаметры обоих электрододержателей принимаем одинаковыми, т. е.  $D = 6$  см. Для этого случая подходит формула (51)

$$q = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) = \frac{\pi}{4} (6^2 - 2^2) = 25 \text{ см}^2.$$

Определяем вначале значение  $k = \mu \omega \gamma q$ ;  $\gamma = \frac{1}{p} 10^{-9}$ , где  $p$  берут в омах на см/см<sup>2</sup>; для бронзы  $p = 0,15 \cdot 10^{-4}$ , тогда

$$\gamma = \frac{10^{-9}}{0,15 \cdot 10^{-4}} = 0,67 \cdot 10^{-4},$$

откуда

$$k = 314 \cdot 0,67 \cdot 10^{-4} \cdot 25 = 0,527.$$

Затем находим

$$\xi = 2 - 0,25 + \frac{0,527^2}{96} \left( 1 - \frac{13}{180} \cdot 0,527^2 \right) \approx 1,75.$$

$$X = 4 \cdot 314 \left[ 80 \ln \frac{2 \cdot 80 \cdot 16}{3(80 + \sqrt{80^2 + 16^2})} + 16 \ln \frac{2 \cdot 80 \cdot 16}{3(16 + \sqrt{80^2 + 16^2})} - 1,75(80 + 16) + 2\sqrt{80^2 + 16^2} + 6 \right] 10^{-9} \Omega,$$

$$X = 1256(80 \ln 5,28 + 16 \ln 8,75 + 1) 10^{-9} = 0,00021 \Omega.$$

*Пример 11.* Вычислить индуктивное сопротивление внешнего контура точечного аппарата с переносимыми клещами на повторно-кратковременную мощность  $W = 40$  kVA, если длина токоподводящих кабелей от трансформатора к клещам  $l = 320$  см, среднее расстояние между кабелями  $D = 11$  см, сечение кабеля  $q = 4$  см, откуда  $R = 1,13$  см; для меди  $\mu = 1$ . Для разрешения этой задачи воспользуемся формулой (46)

$$X = I \omega \left( 4 \ln \frac{D-R}{R} + \mu \right) 10^{-9} \Omega$$

или

$$X = 320 \cdot 314 \left( 4 \ln \frac{11 - 1,13}{1,13} + 1 \right) 10^{-9} = 100\,000(8,65 + 1) 10^{-9} \Omega$$

и окончательно

$$X = 0,000\,965 \Omega.$$

Далее вычисляем индуктивность самых клещей, имеющих следующие размеры:  $a = 27$  см;  $b = 25$  см; средний диаметр сторон  $d = 4$  см. Для этого случая воспользуемся формулой определения индуктивности для прямоугольного контура

$$X = 4 \times 314 \left[ 27 \ln \frac{2 \times 27 \times 25}{2(27 + \sqrt{27^2 + 25^2})} + 25 \ln \frac{2 \times 25 \times 27}{2(25 + \sqrt{27^2 + 25^2})} - 1,75(27 + 25) + 2\sqrt{27^2 + 25^2} + 4 \right] 10^{-9},$$

или окончательно,

$$X = 1256(27 \cdot 2,35 + 25 \cdot 2,29 - 13) 10^{-9} = 1256 \cdot 107,8 \cdot 10^{-9} = 0,000135 \Omega.$$

Полное индуктивное сопротивление внешнего контура будет равно сумме индуктивностей кабеля и клещей:

$$X_{S_{вн}} = 0,000965 + 0,000135 = 0,0011 \Omega.$$

Примечание. Согласно опытным данным,  $X_{S_{вн}} = 0,00132 \Omega$  (среднее значение). Небольшое расхождение между расчетными и опытными величинами объясняется тем, что расстояния между токоведущими кабелями во время опыта невозможно было точно сохранить, как принято в настоящем примере.

Пример 12. Вычислить индуктивное сопротивление внешнего контура установки с переносными клещами для точечной сварки на 200 кВА повторно-кратковременной мощности и 100 кВА длительной мощности.

Длина внешнего контура вместе с клещами, приведенными приближенно к одному общему контуру,  $l = 450$  см, сечение кабеля  $q = 7$  см<sup>2</sup>, откуда  $R = 1,5$  см,  $\mu = 1$ , среднее расстояние между токоведущими кабелями  $D = 12$  см. Тогда по формуле (46)

$$X = 450 \cdot 314 \left( 4 \ln \frac{12 - 1,5}{1,5} + 1 \right) 10^{-9} \Omega$$

или

$$X = 141500 \cdot 8,8 \cdot 10^{-9} = 0,00125 \Omega.$$

Согласно опытным данным  $X_{S_{вн}} = 0,0015 \Omega$ .

Таблица 17

Опытные данные индуктивного сопротивления рассеяния некоторых сварочных машин

Тип машины	Сила тока $I$	$X_S$	$X_{S_0}$	$X_{S_{вн}}$
	А	Ω	Ω	Ω
АСН-25 АЩ-40	VI ступень 176 А	0,233	—	—
	VI ступень мощности 300 А	0,513	0,189	0,00016
Установка сварочных клещей на 40 кВА с внешним контуром $l = 3,2$ м	VI ступень мощности 200 А	0,518	0,044	0,00146
	V ступень мощности 900 А	0,213	0,0167	0,0016

Примечание. Полные данные всех электрических параметров указанных машин приведены в конце книги.

В таблице обозначают:

$X_S$  — индуктивное сопротивление рассеяния всей установки при работе;

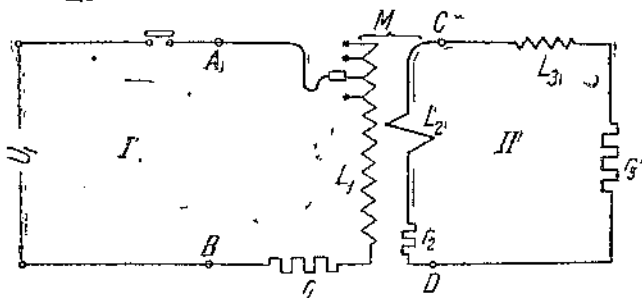
$X_{S_0}$  — индуктивное сопротивление самого трансформатора без внешнего контура;

$X_{S_{вн}}$  — индуктивное сопротивление рассеяния внешнего контура.

В табл. 17 приведены опытные данные рассеяния в сварочном трансформаторе и внешнем контуре для некоторых сварочных машин. Более подробные данные помещены в последней главе настоящей книги.

### 32. Уравнения токов для сварочной машины при установившемся режиме

Нагрузка сварочной машины по методу сопротивления является повторно-кратковременной, при которой продолжительность включения длится, как известно, начиная от малых долей секунды до целых секунд и более. В связи с этим необходимо будет исследовать работу трансформатора при установив-



Фиг. 76. Обозначение электрических параметров активного и индуктивного сопротивлений сварочной машины.

шемся и неустановившемся режимах, пренебрегая насыщением железа трансформатора. Исследование работы трансформатора при холостом ходе здесь будет опущено, так как сварочные аппараты не работают вхолостую.

Вначале будут выведены уравнения токов для установившегося режима. Электрическая схема аппарата с полными ее обозначениями показана на фиг. 76. Первичная цепь  $AB$  имеет индуктивность  $L_1$  и активное сопротивление  $r_1$  для данной ступени регулировки. Вторичная цепь состоит из двух частей. К первой части  $CD$  относится индуктивность  $L_2$  самого вторичного витка и активное сопротивление  $r_2$ , учитывающее сопротивление витка и подводющих шин. Ко второй части относятся индуктивность внешнего контура  $L_3$  и омическое сопротивление сварочного контакта  $r_3$ . Указанные параметры могут иметь различные значения для одного и того же аппарата.

Приключенный к напряжению сети трансформатор устанавливает электрическое равновесие напряжений, а также магнитное равновесие токов в каждый отдельный момент времени. Индуктируемая во вторичном витке э. д. с. (главным потоком трансформатора) уравновешивается падением напряжения в индуктивных и активных сопротивлениях вторичного контура.

Напишем уравнения равновесия э. д. с. и напряжений для обоих контуров согласно обозначениям на фиг. 76.

Для контура I:

$$U_1 = I_1 r_1 + L_1 \frac{dI_1}{dt} + M \frac{dI_2}{dt}.$$

Для контура II:

$$-M \frac{dI_1}{dt} = I_2 (r_2 + r_3) + (L_2 + L_3) \frac{dI_2}{dt}.$$

$$U_1 = U_1 \sqrt{2} \sin \omega t.$$

(54)

Приложенное напряжение, а также индуцируемые токи имеют синусоидальную форму, поэтому систему дифференциальных уравнений (54) можно выразить в векторной форме и решить относительно  $I_1$  и  $I_2$ .

$$\left. \begin{aligned} \bar{U} &= \bar{I}_1 r_1 + I_1 j\omega L_1 + I_2 j\omega M \\ 0 &= \bar{I}_2 (r_2 + r_3) + \bar{I}_2 j\omega (L_2 + L_3) + I_1 j\omega M \end{aligned} \right\} \quad (54')$$

Обозначим:  $r_2 + r_3 = R$ ;  $L_2 + L_3 = L$ ;  $j\omega L_1 = jX_1$ ;  $j\omega L = jX$ ;  $\omega L_2 + \omega L_3 = X_2 + X_3 = X$ ; тогда уравнение (54') будет иметь такой вид:

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= I_1 (r_1 + jX_1) + \bar{I}_2 j\omega M; \\ 0 &= \bar{I}_2 (R + jX) + \bar{I}_1 j\omega M. \end{aligned}$$

Для решения последней системы даны следующие обозначения:  $\bar{Z}_1 = r_1 + jX_1$ ;  $\bar{Z}_2 = R + jX$ ;  $\bar{Z}_M = j\omega M$ ; тогда система уравнений окончательно получит следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_1 &= I_1 \bar{Z}_1 + \bar{I}_2 \bar{Z}_M \dots (I) \\ 0 &= I_2 \bar{Z}_2 + I_1 \bar{Z}_M \dots (II) \end{aligned} \right\} \quad (54'')$$

Из уравнения (II) определяется  $\bar{I}_2$

$$\bar{I}_2 = -\frac{I_1 \bar{Z}_M}{\bar{Z}_2} \quad (II')$$

Подставляя (II') в уравнение (I) той же системы, получаем:

$$\bar{U}_1 = I_1 \bar{Z}_1 - \bar{I}_1 \frac{\bar{Z}_M^2}{\bar{Z}_2} = \bar{I}_1 \left( \bar{Z}_1 - \frac{\bar{Z}_M^2}{\bar{Z}_2} \right),$$

откуда

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{U}_1 \bar{Z}_2}{\bar{Z}_1 \bar{Z}_2 - \bar{Z}_M^2} \quad (III)$$

Заменяя в уравнении (II) значение  $I_1$  и пользуясь равенством (III), получаем

$$I_2 = -\frac{\bar{U}_1 \bar{Z}_2}{\bar{Z}_1 \bar{Z}_2 - \bar{Z}_M^2} \cdot \frac{\bar{Z}_M}{\bar{Z}_2}$$

или

$$\bar{I}_2 = -\frac{\bar{U}_1 \bar{Z}_M}{\bar{Z}_1 \bar{Z}_2 - \bar{Z}_M^2} \quad (IV)$$

После замены  $\bar{Z}_1$ ,  $\bar{Z}_2$  и  $\bar{Z}_M$  их комплексами, последовательного отделения в полученном комплексе действительных членов от мнимых и ряда других алгебраических преобразований и сокращений получим окончательный вид уравнения для установившегося тока во вторичном контуре:

$$I_2 \text{ уст.} = \frac{-\sqrt{2} U_1 \omega M}{\sqrt{(r_1 r_2 + r_1 r_3 - X_1 X_2 - X_1 X_3 + \omega^2 M^2)^2 + (r_1 X_2 + r_1 X_3 + r_2 X_2 + X_3 X_1)^2}} \quad (55)$$

Знак минус показывает, что вектор тока  $\bar{I}_2$  направлен в противоположную сторону от вектора  $\bar{I}_1$ .

Из уравнения (II) системы (54'')

$$\bar{I}_1 = -I_2 \frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_M},$$

следовательно, легко доказать, что

$$I_1 = I_2 \frac{Z_2}{Z_M};$$

окончательный вид уравнения для установившегося тока первичного контура после преобразований будет

$$I_1 \text{ уст.} = \frac{U_1 \sqrt{2}}{\sqrt{(r_1 r_2 + r_1 r_3 - X_1 X_2 - X_1 X_3 + \omega^2 M^2)^2 + (r_1 X_2 + r_1 X_3 + X_1 r_2 + X_1 r_3)^2}} \cdot \frac{1}{(r_2 + r_3)^2 + (X_2 + X_3)^2} \quad (56)$$

Угол сдвига между током и напряжением будет:

$$\varphi = \arctg \frac{X}{r}.$$

Для нашей задачи угол сдвига равен:

$$\varphi = \arctg \frac{r_1 r_2 + r_1 r_3 - X_1 X_2 - X_1 X_3 + \omega^2 M^2}{r_1 X_2 + r_1 X_3 + r_2 X_1 + r_3 X_1} \quad (57)$$

Уравнения (55), (56) и (57) позволяют вычислить токи установившегося режима при любой ступени мощности сварочной машины, для любых размеров внешнего контура и для каждого свариваемого металла. Параметры, входящие в эти уравнения, были определены ранее. Остается теперь определить значение коэффициента взаимоиנדукции:

$$M = L_1 \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right);$$

при  $\omega_2 = 1$ ,

$$M = \frac{L_1}{\omega_1} \text{ Н.}$$

Индуктивность рассеяния первичной обмотки

$$L_{S1} = L_1 - M \frac{\omega_1}{\omega_2}.$$



Индуктивность рассеяния вторичного витка (без внешнего контура).

$$L_{S_2} = L_2 - M \frac{\omega_2}{\omega_1}.$$

Из приведенных формул явствует, что с изменением ступени мощности сварочного аппарата путем переключения числа витков в первичной обмотке эти коэффициенты будут соответственно меняться, так как меняется число витков  $\omega_1$ .

### 33. Уравнения токов для сварочной машины при неустановившемся режиме

Как уже было указано в начале этой главы, одна из особенностей режима работы трансформатора сварочной машины та, что последний подвергается частому включению и выключению под нагрузкой. В связи с этим кроме найденных уравнений для установившегося тока необходимо исследовать явления, возникающие дополнительно в обоих контурах сварочной машины в момент включения.

Напомним, что, как правило, включение машины в сеть происходит лишь в том случае, когда ее вторичный контур уже замкнут на свариваемую деталь, представляющую нормальную нагрузку для сварочной машины.

Чтобы определить характер изменений свободных токов в момент включения, необходимо приравнять к нулю суммы вызываемых ими напряжений. Для составления уравнений обозначим через  $r_1$  и  $L_1$  — омическое и индуктивное сопротивления первичной цепи,  $L$  и  $R_2$  — суммарные омические и индуктивные сопротивления второй цепи,  $M$  — взаимную индукцию обоих контуров и напишем дифференциальные уравнения для свободных токов:

$$\left. \begin{aligned} I_1'' r_1 + L \frac{dI_1''}{dt} + M \frac{dI_2''}{dt} &= 0 \\ I_2'' R_2 + L \frac{dI_2''}{dt} + M \frac{dI_1''}{dt} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (58)$$

Для определения неизвестных в этой системе  $I_1''$  и  $I_2''$  продифференцируем оба уравнения:

$$\left. \begin{aligned} r_1 \frac{dI_1''}{dt} + L \frac{d^2 I_1''}{dt^2} + M \frac{d^2 I_2''}{dt^2} &= 0 \\ R_2 \frac{dI_2''}{dt} + L \frac{d^2 I_2''}{dt^2} + M \frac{d^2 I_1''}{dt^2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (58')$$

Помножим первое уравнение на  $L$ , а второе на  $M$ , вычтем одно из другого и сгруппируем члены уравнения:

$$\left( \frac{LL_1 - M^2}{MR_2} \right) \frac{d^2 I_1''}{dt^2} + \frac{Lr_1}{MR_2} \cdot \frac{dI_1''}{dt} = \frac{dI_2''}{dt} \quad (59)$$

Подставляя уравнение (59) в первое уравнение системы (58), получим окончательное дифференциальное уравнение для свободного тока  $I_1''$ :

$$(LL_1 - M^2) \frac{d^2 I_1''}{dt^2} + (L_1 R_2 + L r_1) \frac{d I_1''}{dt} + I_1'' r_1 R_2 = 0. \quad (60)$$

Очевидно  $I_2''$  подчиняется тому же закону, так как в уравнениях системы (58) они взаимозаменяемы; поэтому нет необходимости повторить еще раз вывод для  $I_2''$ . Чтобы найти величину тока  $I_1''$ , надо решить полученное линейное дифференциальное уравнение второго порядка.

Общее решение такого уравнения будет:

$$\left. \begin{aligned} I_1'' &= K_1 e^{-\alpha_1 t} + K_2 e^{-\alpha_2 t} \\ I_2'' &= K_3 e^{-\alpha_1 t} + K_4 e^{-\alpha_2 t} \end{aligned} \right\} \quad (61)$$

Из уравнений (61) явствует, что кривая свободного тока является экспоненциальной кривой, причем скорость затухания зависит от величины активного и индуктивного сопротивления обоих контуров.

Значение  $\alpha$  получим из решения характеристического уравнения, составленного для уравнения (60) и имеющего следующий вид:

$$A\alpha^2 + B\alpha + C = 0,$$

где

$$A = LL_1 - M^2; \quad B = L_1 R_2 + L r_1; \quad C = r_1 R_2.$$

Корни характеристического уравнения будут:

$$\alpha_1 = -\frac{L_1 R_2 + L r_1}{2(LL_1 - M^2)} - \sqrt{\frac{(L_1 R_2 + L r_1)^2}{4(LL_1 - M^2)^2} - \frac{r_1 R_2}{LL_1 - M^2}}; \quad (62)$$

$$\alpha_2 = -\frac{L_1 R_2 + L r_1}{2(LL_1 - M^2)} + \sqrt{\frac{(L_1 R_2 + L r_1)^2}{4(LL_1 - M^2)^2} - \frac{r_1 R_2}{LL_1 - M^2}}. \quad (63)$$

Для определения постоянных интегрирования  $K$  задаемся следующими пограничными условиями. Полный ток в каждом контуре равен сумме установившегося и свободного токов

$$I = I_{уст} + I''. \quad (64)$$

В момент включения цепи, содержащей индуктивность ( $t=0$ ;  $I=0$ ),

$$I_{уст} + I'' = 0$$

или

$$I'' = -I_{уст}.$$

Это значит, что свободный ток в момент включения ( $t=0$ ) будет равен мгновенному значению установившегося тока, взятому с обратным знаком. Следовательно, уравнения (61) при  $t=0$  будут равны:

$$\left. \begin{aligned} I_1'' &= -I_{1уст} = K_1 + K_2; \\ I_2'' &= -I_{2уст} = K_3 + K_4. \end{aligned} \right\} \quad (65)$$

Из уравнения (81)

$$K_1 = -K_2 - I_{1\text{уст.}} \quad (65')$$

Подставляя значение  $K_1$  в уравнение (61), а последнее — в уравнение (60), определяем последовательно значение искомого постоянного. После всех необходимых алгебраических операций получаем:

$$K_1 = -1,5I_{1\text{уст.}}; \quad K_2 = 0,5I_{1\text{уст.}}; \\ I_1'' = -I_{1\text{уст.}}(1,5e^{-a_1 t} - 0,5e^{-a_2 t}); \quad (66)$$

$$I_2'' = -I_{2\text{уст.}}(1,5e^{-a_1 t} - 0,5e^{-a_2 t}). \quad (67)$$

Полный ток при сварке

$$I_{\text{свар}} = I_{\text{уст.}} + I_{\text{своб}}$$

или, окончательно:

для первой обмотки трансформатора

$$I_1 = I_{1\text{уст.}} [1 - (1,5e^{-a_1 t} - 0,5e^{-a_2 t})]; \quad (68)$$

для второй обмотки

$$I_2 = I_{2\text{уст.}} [1 - (1,5e^{-a_1 t} - 0,5e^{-a_2 t})]. \quad (69)$$

*Пример 18.* Вычислить величину свободного тока  $I''$ , начиная с момента приключения аппарата к напряжению сети до момента полного затухания кривой свободного тока после включения для сварочного аппарата АТН-25 в пятый ступени мощности, имеющего при этом следующие параметры:  $r_1 = 0,016 \text{ } \Omega$ ;  $L_1 = 0,08 \text{ Н}$ ;  $L_2 = 0,0000265 \text{ Н}$ ,  $M = 0,00145 \text{ Н}$ .

Суммарное сопротивление вторичного контура со сварочным изделием  $R_2 = 0,00006 \text{ } \Omega$ .

Определяем вначале по уравнениям (62) и (63) коэффициенты  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .

После произведенных вычислений получаем окончательно:  $\alpha_1 = -343$ ;  $\alpha_2 = -179$ . Пользуясь формулой (67), вычисляем значения свободного тока для различных времен. Результаты приведены в табл. 18.

Таблица 18

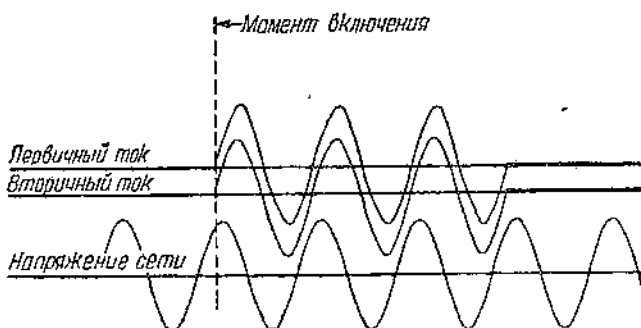
Значения свободного тока

$t$ сек.	0	0,001	0,002	0,003	0,005
$I''$	$-I_{\text{уст.}}$	$-0,64 I_{\text{уст.}}$	$-0,39 I_{\text{уст.}}$	$-0,25 I_{\text{уст.}}$	$-0,07 I_{\text{уст.}}$

Для получения кривой действительного тока графическим путем необходимо вначале построить кривую (синусоиду) установившегося тока  $I_{\text{уст.}}$  и в точке, соответствующей моменту включения (т. е. при  $t=0$ ), отложить ординату силы тока в противоположную сторону и нанести кривую свободного тока.

Результирующий ток, протекающий по цепи, получим при наложении кривой свободного тока на кривую установившегося тока. В нашем примере кривая свободного тока полностью затухает через 0,005 сек. после включения. Величина свободного тока зависит также от момента включения сварочного аппарата в сеть переменного тока.

Если включение происходит в момент, когда установившийся ток в своем периодическом изменении должен был бы пройти через свое нулевое значение, то в этом случае свободный ток будет равен нулю, так как при  $t=0$ ,  $I'' = -I_{уст}$ , а первая амплитуда тока будет равна установившемуся току, как это было получено на осциллограмме фиг. 77. Во всех прочих случаях включения в сеть возникают свободные токи различной величины, зависящие как от момента включения, так и от индуктивности внешней цепи. Наибольшее значение свободного тока получится в такой момент, когда установившийся ток должен проходить через свое максимальное значение. Выведенные уравнения для резуль-



Фиг. 77. Осциллограмма сварочного тока (момент включения производится при нулевом значении тока и максимальном значении напряжения).

тирующего сварочного тока (68) и (69) действительны для любого вида сварки методом сопротивления за исключением сварки оплавлением.

**Пример 14.** Вычислить величину свободного тока  $I_1''$ , начиная с момента включения до полного его затухания, для сварочного точечного аппарата с переносными клещами, имеющего следующие данные:  $r_1 = 0,0041 \Omega$ ;  $L_1 = 0,111 \text{ Н}$ ;  $L_2 = 0,00039 \text{ Н}$ ;  $R_2 = 0,00095 \Omega$ . Пользуясь уравнениями (62) и (63) и приведенными здесь параметрами, определяем величину  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . В этом примере  $\alpha_1 = -58,5$ ;  $\alpha_2 = -48,5$ . Подставляя далее полученные значения  $\alpha$  в уравнение (67), вычисляем значение свободного тока для различных моментов времени после включения. Результаты вычисления приведены в табл. 18а. Вследствие значительного индуктивного сопротивления внешнего контура свободный ток затухает через 0,04 сек., т. е. через два периода тока.

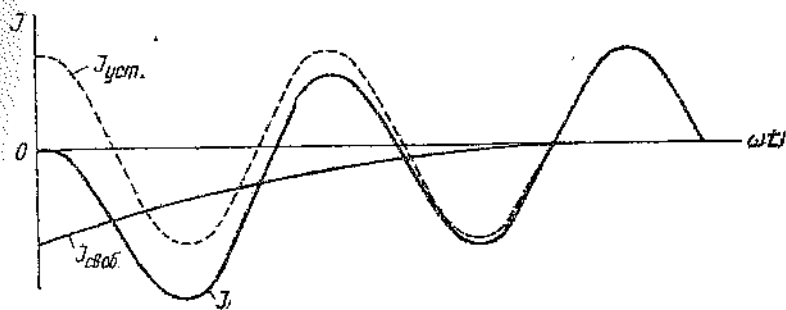
Таблица 18а

Значения свободного тока

$t$ сек.	0	0,002	0,005	0,01	0,015	0,02	0,03
$I''$	$-I_{уст}$	$-0,88 I_{уст}$	$-0,73 I_{уст}$	$-0,51 I_{уст}$	$-0,38 I_{уст}$	$-0,27 I_{уст}$	$-0,13 I_{уст}$

Абсолютные значения токов будут зависеть также от момента включения. На фиг. 78 построена кривая изменения тока, начиная с момента включения до установившегося режима.

Произведенные вычисления показывают, что в сварочных аппаратах свободные токи быстро затухают. В обычных сварочных машинах активное сопротивление вторичного контура вместе с контактным сопротивлением места сварки примерно в два-три раза более индуктивного сопротивления того же контура, поэтому в таких контурах свободным током можно практически пренебрегать. В особых условиях, когда индуктивное сопротивление вторичного контура такого же порядка, что и активное сопротивление этого же контура, кривая свободного тока более пологая, и затухание этой кривой происходит медленнее. Последний случай может иметь место, например, при



Фиг. 78. Расчетная кривая токов  $J_{уст}$  — составляющая установившегося режима;

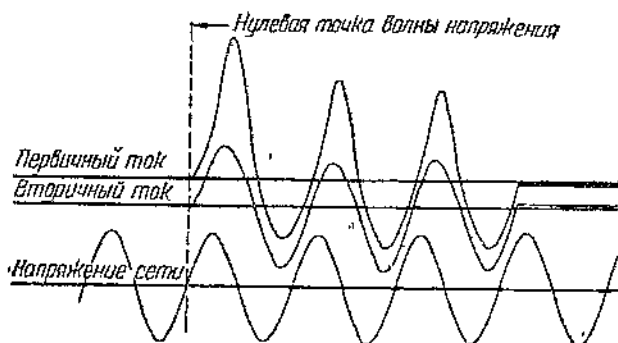
$J_{своб}$  — составляющая свободного (неустановившегося) тока;  $J$  — результирующая кривая сварочного тока.

точечной сварке легких сплавов на аппарате с переносными клещами, имеющем длинный внешний контур, или на машинах, имеющих автотрансформатор в первичной цепи.

### 34. Осциллограммы сварочных токов

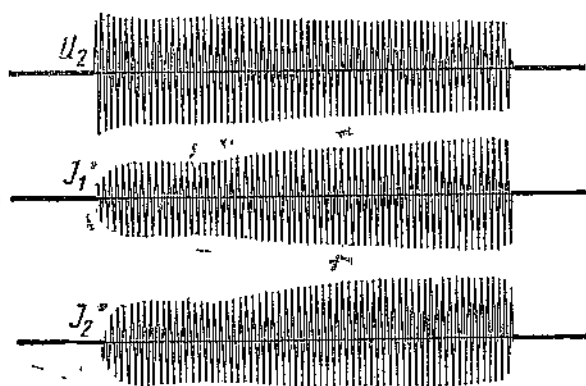
При экспериментальном исследовании характера изменения кривых тока и напряжения могут быть получены кривые, отличающиеся друг от друга даже по своему общему виду. Это изменение происходит, главным образом, в зависимости от электрических величин сварочного аппарата, его внешнего контура, а также от момента включения. На осциллограмме фиг. 79 сфотографированы кривые токов первичной и вторичной цепей точечной машины при сварке, а также кривая напряжения сети. При этом вторичная цепь указанной машины имеет повышенную индуктивность, характеризующуюся низким коэффициентом мощности ( $\cos \varphi \approx 0,3$ ). Включение сварочного процесса на этой осциллограмме произошло в момент, когда фаза напряжения была близка к своему нулевому значению. Если разложить результирующую кривую тока на ее составляющие кривые — установившегося и свободного тока, — то легко убедиться, что кривая установившегося тока должна была бы приближаться

к своему максимальному значению. Как видно из рассматриваемой осциллограммы, затухание свободного тока произошло (вследствие высокой индуктивности) лишь через два периода.



Фиг. 79. Осциллограмма сварочного тока (момент включения тока производился при нулевом значении напряжения и максимуме тока).

При более продолжительном сварочном процессе (порядка 0,2 сек. и более) величина свободного тока мало отражается на качестве сварки даже в том случае, если включение происходит в различные моменты времени по отношению к волне



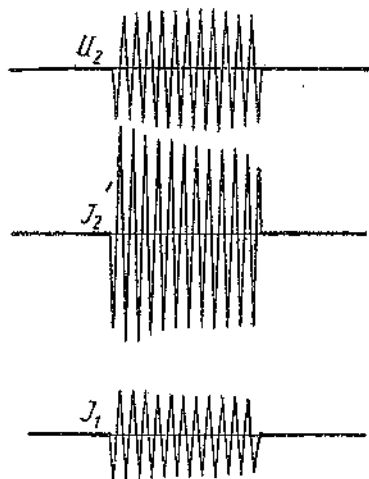
Фиг. 80. Осциллограмма точечной сварки неочищенного листового железа 1,5 + 1,5 мм.  
 $I_2 = 3200 \text{ A}$ ,  $U_2 = 0,66 \text{ V}$ ,  $I_1 = 32 \text{ A}$ .

напряжения сети. Если же сварочный процесс протекает кратковременно (до 0,10 сек.), то включение сварочной машины в различные моменты времени (что имеет место при асинхронном токопрывателе) повлияет на качество сварки, так как в каждой свариваемой точке благодаря большой индуктивности машины величина тока будет различной. Указанный эффект при асинхронном

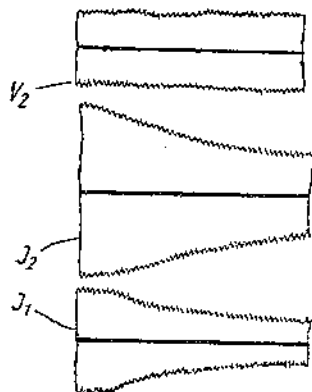
включении будет тем больше, чем больше индуктивное сопротивление машины. На фиг. 80 представлена осциллограмма токов и напряжения во вторичном контуре точечного аппарата при сварке образцов неочищенного железа суммарной толщиной 1,5 + 1,5 мм. Время сварки равнялось при этом  $t_{св} = 1,16 \text{ сек.}$  Из этой осциллограммы видно, что в начальный момент сварки, когда сопротивление сварочного контакта было довольно велико, оно огра-

ичивало нарастание тока. Таким образом ток в начале процесса имел меньшее значение, чем при установившемся режиме.

На фиг. 81 показана осциллограмма точечной сварки образцов малоуглеродистой стали с зачищенными перед сваркой поверхностями. Давление на электроды  $P \approx 125$  кг. На кривой

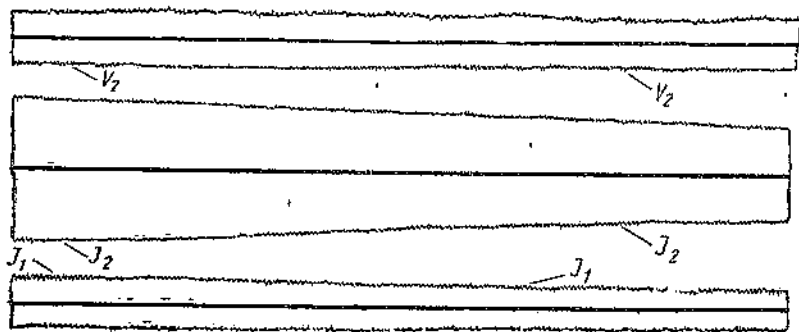


Фиг. 81. Осциллограмма точечной сварки очищенного железа при времени сварки, равном 11 пер.



Фиг. 82. Осциллограмма токов при стыковой сварке ( $t = 0,76$  сек.).

вторичного тока этой осциллограммы видно характерное уменьшение первой амплитуды после момента включения аппарата в сеть, что объясняется наличием свободной составляющей



Фиг. 83. Осциллограмма токов при стыковой сварке ( $t = 3,74$  сек.).

тока, затухающей примерно в течение одного полупериода (0,01 сек.). На этой осциллограмме видно также полное изменение кривой тока от начала процесса сварки до конца. При этом легко заметить, что последняя амплитуда полуволны тока оставляет 65% от начальной амплитуды.

На фиг. 82 дана осциллограмма токов и напряжения при

стыковой сварке сопротивлением круглых стержней малоуглеродистой стали сечения  $q = 95 \text{ мм}^2$  на первой ступени мощности сварочного аппарата АСН-25. Время сварки  $t = 0,76 \text{ сек}$ . Осциллограмма тока и напряжения при сварке стержней малоуглеродистой стали сечением  $q = 200 \text{ мм}^2$  на второй ступени мощности АСН-25 показана на фиг. 83.

Из приведенных здесь осциллограмм сварочного процесса видно, что начальная амплитуда сварочного тока больше конечных амплитуд. Это объясняется в данном случае изменением сопротивления нагретого сварочного контакта в конце сварки по сравнению с начальным моментом сварки. Многократная проверка этого явления показала, что конечные амплитуды составляют примерно 65—70% величины начальных амплитуд. Отсюда следует, что сопротивление в контакте возрастает на 30—35%. Однако при сварке более кратковременными импульсами разница между амплитудами оказывается еще меньше.

### 35. Влияние поверхностного эффекта на сварочный процесс

При постоянном токе плотность тока в любой точке сечения проводника или шины имеет одинаковое значение. В случае обтекания проводов переменным током сопротивление их отличается от сопротивления при постоянном токе вследствие неравномерного распределения тока по всему поперечному сечению проводника.

Неодинаковое распределение тока в проводнике происходит по причине возникновения переменного магнитного поля внутри проводника, которое наводит в нем неодинаковые электродвижущие силы в различных его частях. Под действием внутреннего магнитного поля ток отодвигается от центра проводника ближе к поверхности. Отсюда это явление получило название поверхностного эффекта (по-английски скин-эффект). Этим обусловливается во многих случаях повышенный нагрев токоведущих частей переменного тока по сравнению с постоянным, если плотность тока выбрана одинаковой. Особенно сильно поверхностный эффект сказывается в токоведущих частях больших сечений, а также при повышенных частотах протекающего тока.

В сварочных аппаратах по методу сопротивления, где поперечное сечение вторичного контура достигает нескольких тысяч квадратных миллиметров, поверхностный эффект повышает активное сопротивление этого контура. Кроме того, при стыковой сварке весь сварочный ток протекает через свариваемые стержни или листы, поэтому здесь крайне важно выяснить, насколько возрастает благодаря поверхностному эффекту сопротивление свариваемых металлических частей.

Полный вывод теории поверхностного эффекта является весьма сложным и приводится в теоретических основах электротехники, поэтому он здесь не приведен.

Падение напряжения в проводнике, обтекаемом электриче-



ским током, при омическом сопротивлении проводника, равном  $R_0$ , будет

$$U = IZ,$$

где  $Z$  есть полное сопротивление проводника на длине  $l$ :

$$Z = \sqrt{R_0^2 + X^2}.$$

Активное сопротивление проводника при переменном токе  $R_{акт}$  учитывает неравномерность распределения тока по сечению проводника. Отношение сопротивления проводника переменному току  $R_{акт}$  к сопротивлению его постоянному току  $R_{пост}$  является коэффициентом, учитывающим влияние поверхностного эффекта ( $m$ ).

$$m = \frac{R_{акт}}{R_{пост}} = \sqrt{1 + \left(\frac{X}{R_{пост}}\right)^2}, \quad (70)$$

$$R_{пост} = \rho \frac{l}{q} \Omega.$$

Здесь  $l$  выражено в  $m$ ;  $q$  — в  $mm^2$ ;  $\rho$  — в  $\Omega \cdot mm^2/m$ .

Практические формулы для расчета поверхностного эффекта

а) Материал немагнитный. Обозначим через  $X_0$  следующее выражение:  
для круглого сечения

$$X_0 = \frac{r}{100} \sqrt{\frac{f}{\rho}}; \quad (71)$$

для сечения любой формы

$$X_0 = \frac{2}{100} \cdot \frac{q}{p} \cdot \sqrt{\frac{f}{\rho}}. \quad (72)$$

Здесь  $r$  — радиус сечения стержня в  $cm$ ;  $q$  — сечение стержня в  $cm^2$ ;  $p$  — периметр стержня в  $cm$ ;  $f$  — частота переменного тока в  $Hz$ .

Если найденное значение  $X_0 > \sqrt{2}$ , то коэффициент поверхностного эффекта

$$m = 0,277 + 0,997 X_0.$$

При  $1 < X_0 < \sqrt{2}$

$$m = 1 + \frac{X_0^4}{3} - \frac{4X_0^8}{45} + \frac{11}{420} X_0^{12}.$$

Или для круглого сечения

$$m = X_0 + 0,25 + \frac{0,047}{X_0}; \quad (73)$$

для прямоугольного и трубчатого сечения:

$$m = 1 + 0,089 X_0^4.$$

Если же  $X_0 < 1$ , то

$$m = 1 + \frac{X_0^4}{3}.$$

б) Материал магнитный. Для магнитного металла магнитная проницаемость  $\mu > 1$ , тогда:  
для круглого сечения

$$X_0 = \frac{r}{100} \sqrt{\frac{f\mu}{\rho}}; \quad (74)$$

для сечения любой формы

$$X_0 = \frac{2}{100} \cdot \frac{g}{p} \sqrt{\frac{f\mu}{\rho}}. \quad (75)$$

Магнитная проницаемость материала определяется по кривой намагничивания, снятой при постоянном токе.

Обозначим индукцию наружной поверхности материала через  $B$ , напряженность поля через  $H$  и действующее значение тока через  $I$ . Магнитная проницаемость будет равна

$$\mu = \frac{B}{H},$$

где

$$H = \frac{0,4\pi}{p} I. \quad (76)$$

Для круглого сечения

$$H = \frac{0,2 I}{r}. \quad (77)$$

Далее, чтобы найти индукцию  $B$  для каждого отдельного случая, определяют число ампервитков ( $a\omega$ ), соответствующее напряженности  $H$ :

$$a\omega = \frac{H}{0,4\pi},$$

и по кривым намагничивания для разных сортов стали определяют  $B = f(a\omega)$ .

На фиг. 84 дана кривая намагничивания для различных ампервитков. При  $X_0 > 1$

$$m = 0,758 + \sqrt{1,343X_0^2 - 0,183}.$$

Если же  $0 < X_0 < 1$ , что возможно при малых диаметрах стержня, то

$$m = 1 + 0,84X_0^4.$$

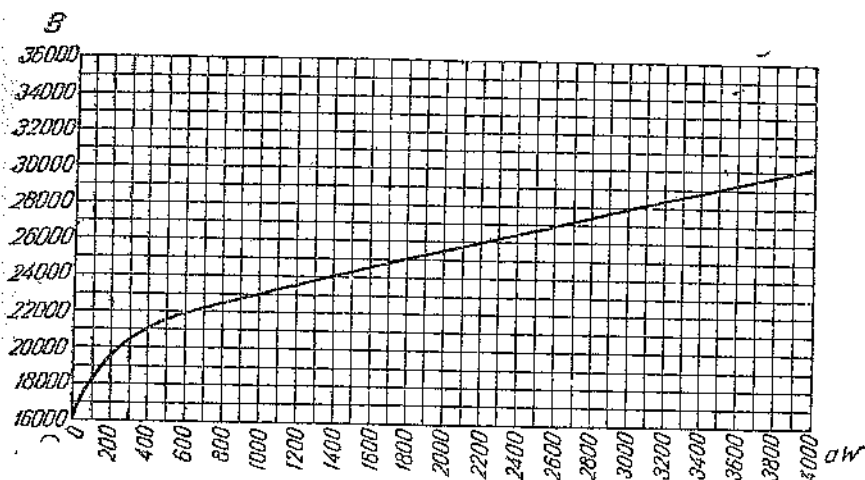
При  $X > 3$

$$m = 0,758 + 1,159X_0.$$

Приведенные практические формулы для расчета величины поверхностного эффекта в металлах, обтекаемых переменным током, показывают, что коэффициент поверхностного эффекта тем больше, чем больше частота тока, магнитная проницаемость и сечение металла.

Если увеличить величину омического сопротивления при прочих равных условиях, то поверхностный эффект будет уменьшаться. В связи с этим, если, например, заменить медный про-

водник алюминиевым (того же сечения и формы), у которого удельное сопротивление по сравнению с медью на 70% больше, то поверхностный эффект уменьшится весьма значительно. Изменение коэффициента поверхностного эффекта во вторичном контуре сварочного аппарата в зависимости от частоты будет показано далее (на фиг. 249).



Фиг. 84. Кривая намагничивания железа для различных ампервитков.

**Пример 15.** Верхний электрододержатель (рукав) точечного аппарата имеет наружный диаметр  $D = 6$  см и внутренний диаметр отверстия  $d = 1$  см. Материал — медь. Требуется определить величину коэффициента поверхностного эффекта  $m$ , если  $\rho = 1$ .

§ Сечение трубы:

$$q = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) = \frac{35\pi}{4} = 27,5 \text{ см}^2.$$

Периметр  $p = \pi D = 18,8$  см.

$$X_0 = \frac{2}{100} \cdot \frac{q}{p} \sqrt{\frac{f\mu}{\rho^2}} = \frac{2}{100} \cdot \frac{27,5}{18,8} \sqrt{\frac{50 \cdot 1}{0,02}} = 1,46,$$

найденное значение

$$X_0 > \sqrt{2},$$

тогда

$$m = 0,277 + 0,997X_0 = 0,277 + 1,45 = 1,727.$$

Следовательно, если электрододержатель сделан из красной меди, то его сопротивление переменному току на 73% больше сопротивления при постоянном токе. Если уменьшить поперечное сечение хобота путем увеличения внутреннего диаметра расточки, что не рекомендуется, коэффициент  $m$  уменьшится.

**Пример 16.** Изменим в предыдущем примере внутренний диаметр. Пусть  $d = 3$  см, тогда

$$q = \frac{\pi}{4} (36 - 9) = 21,2 \text{ см}^2; \quad X_0 = \frac{2}{100} \cdot \frac{21,2}{18,8} \sqrt{\frac{50 \cdot 1}{0,02}} = 1,12;$$

$$1 < X_0 < \sqrt{2}; \quad m = X_0 + 0,25 + \frac{0,047}{X_0} = 1,41.$$

*Пример 17.* Вычислить коэффициент поверхностного эффекта в железных стержнях при сварке их встык. Диаметр стержней  $D = 1$  см; время сварки  $t = 1$  сек.; сварочный ток  $I_2 = 6500$  А.

$$r = \pi D = 3,14 \text{ см}; H = \frac{0,4\pi I}{r} = \frac{0,4\pi \cdot 6500}{3,14} = 2500.$$

$$aw = \frac{H}{0,4\pi} = \frac{2590}{1,25} = 2070.$$

По кривой фиг. 84 находим для железа индукцию, соответствующую полученным  $aw$ :

$$B = 23\,000 \text{ гаусс},$$

тогда

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{23\,000}{2070} = 11,1.$$

Примем, далее, температуру всего стержня равной  $300^\circ$ , тогда  $\rho = 0,16 \text{ } \Omega \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ ,

$$X_0 = \frac{r}{100} \sqrt{\frac{f\mu}{\rho}} = \frac{0,5}{100} \sqrt{\frac{50 \cdot 11}{0,16}} \approx 0,3; X_0 < 1;$$

$$m = 1 + 0,84X_0^4 = 1 + 0,84 \cdot 0,0081 \approx 1,$$

т. е. активное сопротивление сварочных стержней равно омическому. Это значит, что при больших плотностях тока (порядка  $100 \text{ А}/\text{мм}^2$ ) в свариваемых железных образцах явление вытеснения тока на поверхности почти не сказывается. При столь высоких индукциях в железе происходит вытеснение потока, и переменное магнитное поле возникает, главным образом, в воздухе вокруг стержня, а сварочный ток распространяется равномерно по всему стержню. Это обстоятельство является весьма важным фактором для технологии самого сварочного процесса, иначе нагрев стыков стержней происходил бы по краям быстрее, чем внутри стержня, что мешало бы нормальному процессу сварки.

*Пример 18.* Найти коэффициент поверхностного эффекта в железных стержнях при сварке их встык.  $D = 3$  см;  $I_2 = 26\,000$  А;

$$r = \pi D = 9,43 \text{ см}; H = \frac{1,25 \cdot 26\,000}{9,43} = 3450; aw = \frac{3450}{1,25} = 2760.$$

По кривой фиг. 84 находим  $B = 23\,700$  гаусс;  $\mu = \frac{23\,700}{3450} \approx 7.$

Принимая согласно предыдущему  $\rho = 0,16$ , получим:

$$X_0 = \frac{1,5}{100} \sqrt{\frac{50 \cdot 7}{0,16}} = 0,015 \sqrt{2660} = 0,7,$$

тогда

$$m = 1 + 0,84 \cdot 0,74 = 1,2.$$

Активное сопротивление свариваемых стержней оказалось на  $20\%$  больше омического при плотности тока  $\Delta = 37 \text{ А}/\text{мм}^2$ .

<sup>1</sup> В обычных условиях, когда железо применяется в качестве электропроводов или в электромашиностроении, магнитная проницаемость получается порядка 1 000 и более, а плотность тока весьма низка и меньше  $1 \text{ А}/\text{мм}^2$ .

*Пример 19.* Пусть диаметр стержней, свариваемых встык, равен, как в предыдущем примере,  $D = 3$  см, а величина тока и продолжительность сварки менены  $I_2 = 40\,000$  А;  $t = 1$  сек. Требуется определить величину поверхностного эффекта.

$$H = \frac{1,25 \cdot 40\,000}{9,43} = 5300; \quad \alpha w = \frac{5300}{1,25} = 4250,$$

где  $B = 25\,200$  гаусс, а  $\mu = \frac{25\,200}{5300} = 4,75$ .

$$X_0 = \frac{1,5}{100} \sqrt{\frac{50 \cdot 4,75}{0,16}} = 0,58,$$

и  $A = 57$  А/мм<sup>2</sup>

$$m = 1 + 0,84 \cdot 0,58^4 \approx 1,1.$$

При точечной, роликовой и рельефной сварках поперечное сечение сварной точки несравненно меньше, чем при обычной стыковой сварке; однако, если при стыковой сварке магнитный поток возникает, главным образом, в воздухе вокруг проводника, то в перечисленных видах сварки поток распространяется по свариваемым металлическим местам вокруг сварной точки.

В связи с этим рассмотрим явление поверхностного эффекта сварочной точке, когда поток распространяется по металлу.

*Пример 20.* Найти коэффициент поверхностного эффекта при точечной сварке двух железных листов суммарной толщиной  $2 + 2$  мм. Время сварки равно сек. Сварочный ток  $I_2 = 3700$  А. Диаметр контактной поверхности электродов  $d = 0,8$  см. Периметр столбика свариваемого металла под электродом

$$= \pi D = 2,5 \text{ см}; \quad H = \frac{1,25 \cdot 3700}{2,5} = 1850; \quad \alpha w = \frac{1850}{1,25} = 1470; \quad B = 22\,300 \text{ гаусс};$$

$$\frac{22\,300}{1850} = 12; \text{ находим } X_0, \text{ приняв } \rho = 0,2;$$

$$X_0 = \frac{0,4}{100} \sqrt{\frac{50 \cdot 12}{0,2}} = 0,22,$$

куда

$$m = 1 + 0,84 \cdot 0,22^4 = 1 + 0,002 \approx 1.$$

На практике для уменьшения потерь энергии, связанных с поверхностным эффектом в проводниках, раслаивают сечение и во вторичном контуре контактных машин применяют листовой материал (фольгу) вместо массивных жёстких частей. Насколько уменьшается значение поверхностного эффекта при применении фольги во вторичном витке, будет показано в следующем примере.

*Пример 21.* В качестве материалов всего вторичного контура выбрана фольга из красной меди в виде пакета из  $n$  листов с поперечным сечением каждого листа  $q = 0,1 \times 5 = 0,5$  см<sup>2</sup>. Определение коэффициента  $m$  производится для одного листа пакета, предполагая, что каждый лист изолирован один от другого по всей длине и они соединены между собой только на концах. Найденная величина коэффициента  $m$  для одного листа будет искомым коэффициентом поверхностного эффекта для внешнего контура.

Периметр  $p = 2(5 + 0,1) = 10,2$  см;  $\mu = 1$ ;  $\rho = 0,02$ .

$$X_0 = \frac{2}{100} \cdot \frac{0,5}{10,2} \sqrt{\frac{50 \cdot 1}{0,02}} = 0,049.$$

$$m = \frac{R_{пер}}{R_{пост}} = 1 + \frac{X_0^4}{3} = 1 + 0,2 \times 10^{-5} \approx 1.$$

Следовательно, поверхностный эффект при расщепленном витке как будто не имеет места. В действительности это не так, расщепленные листы не изолированы друг от друга и соприкасаются во многих местах, поэтому коэффициент поверхностного эффекта будет, строго говоря, больше 1.

В пакете контура листы расположены весьма близко друг от друга, поэтому в такой цепи возникает еще явление так называемого эффекта близости. При близком расположении токоведущих проводников магнитный поток, образуемый током одного проводника, будет пронизывать также рядом лежащий проводник. Токи, индуцируемые в проводниках, стремятся уничтожить вызывавшие их магнитные потоки.

Если токи в рядом расположенных пластинах имеют противоположное направление, то магнитные потоки производят в некоторых случаях улучшение в распределении тока по сечению, вследствие чего эффект близости даже компенсирует вытеснение тока поверхностным эффектом. Если же токи близлежащих пластин или проводников имеют одинаковое направление, то магнитные потоки производят в ближайших проводниках некоторое вытеснение тока.

Определение влияния эффекта близости в пакете с одинаковым направлением тока не поддается пока точному расчету. Однако в первом приближении можно полагать значение суммы коэффициентов близости и поверхностного эффекта в рассматриваемом пакете равным  $3 \div 5\%$ , т. е.  $m = 1,03 \div 1,05$ .

### 36. Порядок расчета сварочных контактных машин

Прежде чем приступить к проектированию машины, необходимо получить ясное представление, какой вид изделия подлжет сварке, род материалов, желаемую производительность машины и время сварки. Далее необходимо выяснить требуемую механическую прочность соединения, т. е. является ли деталь несущей нагрузку или нет.

Энергетический расчет следует начинать со сварочного контакта. Для этого необходимо вначале определить по табличным данным физические величины свариваемого металла, как то: температуру плавления, теплопроводность, теплоемкость, удельное сопротивление, удельный вес, а также единичное сопротивление контакта для данного металла  $r_1$  и  $r_{1к}$ .

В первую очередь вычисляют внутреннее сопротивление  $R_{1к}$  и полное  $R_k$  по заданному давлению на электроды.

Далее определяют:

- 1) необходимую величину сварочного тока  $I_2$ ;
- 2) падение напряжения во всем сварочном контакте  $U_{2к}$ ;
- 3) расход мощности во всем сварочном контакте  $W_k$ ;
- 4) активное сопротивление внешнего сварочного контура без вторичного витка трансформатора (выбрав предварительно по плотности продолжительного значения тока необходимое сече-

е меди); при этом отдельно вычисляют сопротивление по-  
янных контактов  $R_{л.к}$ );

5) индуктивное сопротивление внешнего контура  $X_{S_{вн}}$ ;

6) по суммарному активному сопротивлению внешнего кон-  
тра  $\Sigma R_{вн}$  и индуктивному сопротивлению внешнего контура  $X_{S'_{вн}}$   
определяем кажущееся сопротивление  $Z_{2_{вн}}$ ;

7) напряжение холостого хода во вторичной цепи трансфор-  
матора:

$$U_{02} = I_2 Z_{2_{вн}}.$$

Напряжение  $U_{02}$  следует увеличить на 5—10% вследствие  
избежного повышения сопротивления в постоянных контактах  
и их окислении;

8) коэффициент мощности в сварочной цепи  $\cos \varphi_2$  по найден-  
ным значениям  $R_2$ ,  $X_2$ ,  $Z_2$  внешнего контура.

Расчет трансформатора производят на вычисленную мощ-  
ность  $W_{об}$ . При этом расчет сечения обмоток трансформатора  
внешнего контура производят по продолжительному току,  
йденному по заданному п. к. р. (см. § 89).

Весь расчет трансформатора отличается от расчета нормаль-  
го силового трансформатора только расчетом обмоток транс-  
форматора.

Расчет сечения железа магнитопровода сварочного транс-  
форматора можно производить, исходя из заданной мощ-  
сти.

Кажущаяся мощность сварочного трансформатора выражается  
следующим образом

$$W_{об} = \frac{1}{\eta} U_{02} I_2 \text{ kVA.}$$

Напряжение холостого хода  $U_{02}$  должно удовлетворять урав-  
нению

$$U_{02} = 4,44 f \omega_2 B Q \cdot 10^{-8} \text{ V.} \quad (78)$$

Решая эти два уравнения, получаем

$$W_{об} = \frac{1}{\eta} \cdot 4,44 f \omega_2 B \cdot Q I_2 \cdot 10^{-8} \text{ VA.}$$

Тогда искомое сечение железа выразится:

$$Q = \frac{10^8 \cdot \eta \cdot W_{об}}{4,44 \cdot f \cdot \omega_2 \cdot B I_2} \text{ см}^2. \quad (79)$$

*Раздел второй*  
**ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ**

---

*Глава VI*

**ТЕХНОЛОГИЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ**

**I. СВАРКА СТАЛЕЙ**

**Введение**

Выше были выведены основные уравнения, охватывающие энергетические и технологические вопросы сварки. В эти уравнения входят следующие величины: сила сварочного тока, время сварки, давление, приложенное к электродам, электрическое сопротивление сварочного контакта, сечение электродов, температура плавления свариваемого металла и его основные физические данные (теплопроводность, теплоемкость и удельный вес). Перечисленные девять величин связаны одним уравнением и в одинаковой мере охватывают энергетические и технологические вопросы сварки. Однако для каждого вида контактной сварки имеется еще ряд дополнительных вопросов, влияющих на сварочный процесс, как, например: подготовка свариваемого материала, выбор материала и размеров электродов и подготовка их к сварке, необходимая длина выпуска концов стержней при стыковой сварке, скорость роликовой сварки, размер выступов при рельефной сварке, механическая прочность сваренных изделий и т. д. Этим вопросам посвящается настоящий раздел.

**37. Подготовка изделий из черных металлов к сварке**

Состояние поверхности свариваемых деталей оказывает исключительное влияние на прочность и плотность шва. Грязь и масло, не очищенные с поверхности свариваемых деталей, образуют при высокой температуре газы, и сварка получается пористой; при точечной сварке образуются выплески.

На передовых заводах Союза очистка поверхности стальных деталей для сварки производится следующими способами:

- 1) мелкие детали из сортовой стали очищаются в пескоструйном аппарате;
- 2) крупные детали направляются в пескоструйную камеру, если очистку проводят по всей поверхности;



3) у крупных деталей, которые подвергаются сварке только у кромок, производится очистка кромок наждачным кругом;

4) детали, подвергающиеся сварке после горячей штамповки, очищаются от окалины травлением.

1) Очистка деталей в пескоструйном аппарате. Во вращающийся барабан с заваленными в него деталями струей сжатого воздуха подается через сопло стальная дробь или песок, которые обдирают деталь и затем через отводную трубу поступают вновь в песочную камеру для повторного действия. Весь процесс очистки длится 15—20 мин. Детали получаются металлически чистыми.

2) Травление. Травление ведется в растворе соляной кислоты при крепости 10—15% (нормально 12%). Выбор крепости раствора зависит от желаемой скорости процесса. Травление можно производить 5—10% серной кислотой. Поступающую деталь отмывают от грязи в ванне, наполненной горячей водой. Здесь она чистится щеткой во избежание излишнего загрязнения кислотной ванны; затем деталь поступает в кислотную ванну и остается в ней до полной очистки. Травление длится от одного до двух часов в зависимости от крепости раствора и толщины окалины. Далее следует промывка в холодной воде, затем в 10% растворе содовой воды, нагретой до 75—80° и, наконец, в ванне чистой воды, нагретой также до 80°. В первой и последней ванне применяют проточную воду.

3) Очистка наждачным кругом. Этот способ применяется, главным образом, при точечной и роликовой сварке листового материала. Вместо наждачных камней применяют большей частью деревянные диски, оклеенные наждачной бумагой различных номеров в зависимости от чистоты заготовки. Деревянный диск насаживается на вал быстроходного мотора малой мощности без промежуточной гибкой связи. В некоторых случаях можно применять также стальные щетки. При точечной или роликовой сварке листового материала необходимо озаботиться, чтобы листы были заранее выправлены и плотно прилегли друг к другу.

При стыковой сварке деталей необходимо зачищать свариваемые детали в месте их контакта с зажимными электродными губками машины. Торцевые поверхности свариваемых деталей должны быть ровно обрезаны и очищены от грязи и окислов. Поверхности стыка не следует дополнительно зачищать, так как шероховатости ухудшают нагрев контакта.

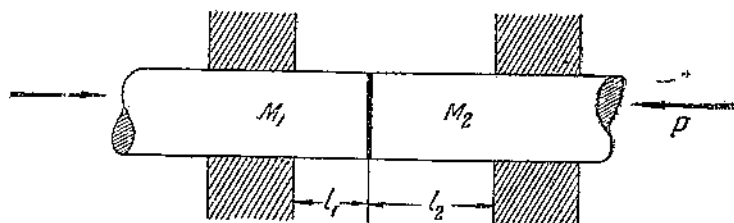
## А. Стыковая сварка

### 38. Установочная длина деталей при стыковой сварке

При сварке деталей встык существенное значение имеет величина выступающих из зажимов концов изделия, так называемая установочная длина.

При необходимости сварки встык деталей из разных металлов встречается трудность при одновременном нагревании концов заготовок до температуры сварки, вследствие различия физических данных этих металлов. На практике разогрев неоднородных металлических деталей регулируется установочной длиной.

В соответствии с фиг. 85 в табл. 19 даны величины выступающих концов стержней  $l_1$  и  $l_2$  для одинаковых и различных металлов, найденные опытным путем. Указанные данные являются ориентировочными и требуют еще дополнительного уточнения в зависимости от других переменных величин.



Фиг. 85. Обозначения выступающих концов стержней при стыковой сварке.

Критерием для выбора длины выпуска заготовок при стыковой сварке разных металлов может служить в первом приближении отношение некоторых физических величин этих металлов.

Обозначив через  $\beta$  отношение теплопроводности  $\lambda$  к произведению величин теплоемкости  $c$  и удельного сопротивления  $\rho$ ,

Таблица 19

Установочная длина для стержней различных металлов при стыковой сварке

Свариваемые металлы		Величины выступающих концов изделия	
$M_1$	$M_2$	$l_1$	$l_2$
Железо	Железо	0,7 $d$	0,7 $d$
Сталь	Сталь	0,6 $d$	0,6 $d$
Сильхромовая сталь	Сильхромовая сталь	1,2—1,5 $d$	1,2—1,5 $d$
Сталь	Железо	0,6 $d$	1,5 $d$
Быстрорежущая сталь	Углеродистая сталь	0,5 $d$	1,5 $d$
Латунь	Латунь	1,5 $d$	1,5 $d$
Железо	Латунь	0,7 $d$	2,8 $d$
Медь	Медь	2,0 $d$	2,0 $d$
Железо	"	0,7 $d$	4,0 $d$
Латунь	"	1,0 $d$	4,0 $d$

мы получим некоторый коэффициент, зависящий от физических величин данного металла<sup>1</sup>, т. е.

$$\beta = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}. \quad (80)$$

Чем больше  $\beta_1$  данного металла по сравнению с коэффициентом  $\beta_2$  другого свариваемого металла, тем больше должна быть длина выпуска данной металлической заготовки. Иначе говоря, длина выпуска конца заготовки определяется отношением коэффициентов обеих свариваемых заготовок  $\frac{\beta_1}{\beta_2}$ . Вычисленные значения коэффициентов  $\beta$  для некоторых металлов даны в табл. 20.

По этим коэффициентам можно определить отношение длин выпускаемых концов разных металлов, т. е.

$$\frac{\beta_1}{\beta_2} = \frac{l_1}{l_2}. \quad (81)$$

Значения коэффициента  $\beta$

По известным величинам  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  и  $l_1$  определяют  $l_2$ .

*Пример 20.* При сварке встык двух стержней — одного железного, а другого медного, — установочная длина медного стержня  $l_{Cu}$  принимается больше установочной длины железного стержня  $l_{Fe}$  во столько раз, во сколько раз  $\beta_{Cu}$  больше  $\beta_{Fe}$ , т. е.

$$\frac{\beta_{Cu}}{\beta_{Fe}} = \frac{54}{9} \approx 6.$$

Приняв установочную длину железного стержня согласно опытным данным равной  $0,7d$ , получим установочную длину медного стержня

$$l_{Cu} = l_{Fe} \frac{\beta_{Cu}}{\beta_{Fe}} = 0,7 \cdot 6 \cdot d \approx 4,2d.$$

Большую установочную длину при стыковой сварке требуют те металлы, у которых теплопроводность больше.

Вопрос о том, какая из трех физических величин —  $\lambda$ ,  $c$  или  $\rho$  — играет здесь доминирующую роль, еще не исследован. Здесь, по всей вероятности, имеет значение также в некоторой степени охлаждающее действие токоподводящих электродов (губок), соприкасающихся непосредственно со сварочным изделием.

При стыковой сварке одинаковых металлов изменение длин выступающих концов влияет на необходимую мощность для сварки одних и тех же толщин. Чем больше длина выступающих концов заготовок, тем меньшая мощность машины требуется для сварки данной толщины. Время сварки, а также расход электроэнергии при этом возрастают.

<sup>1</sup> Этот метод приближенного подсчета установочной длины при стыковой сварке и шунтирования сварочного тока предложен автором этой книги и впервые печатается здесь.

Изменения расхода электроэнергии и необходимой мощности при стыковой сварке малоуглеродистой стали в зависимости от установочной длины занесены в табл. 21. Эти величины были получены опытным путем на машине АСН-25.

Таблица 21

Расходы электроэнергии при стыковой сварке малоуглеродистой стали в зависимости от установочной длины

Сечение свариваемых стыков, мм <sup>2</sup>	Установочная длина каждого выступа, мм	Средняя мощность кВт	Среднее время сварки, сек.	Средний расход энергии на 1 000 сварок, кВт	Степень мощности АСН-25
95	0,5 <i>d</i>	18,5	0,8	4,3	II
95	<i>d</i>	16	1,0	5,2	
95	1,5 <i>d</i>	16,8	1,5	7,0	
200	0,5 <i>d</i>	28	2	18	II
200	<i>d</i>	24	3,1	19,5	
200	1,5 <i>d</i>	22	4	24,7	
450	0,5 <i>d</i>	63,3	4,5	77	V
450	<i>d</i>	58	4,3	79	
450	1,5 <i>d</i>	43,4	9,5	114	
615	0,5 <i>d</i>	52	7,0	98	V
706	<i>d</i>	70	7,2	135	VII
615	1,5 <i>d</i>	40	12,0	145	V

Таблица 23

Припуск к установочной длине при сварке оплавлением

Припуск к установочной длине при сварке оплавлением (Горьковский автозавод им. Молотова)

Площадь поперечного сечения свариваемых металлов, мм <sup>2</sup>	Величина припуска на одно соединение, мм	Величина, идущая на оплавление, мм	Величина осадки мм	Диаметр заготовок, мм	Общая величина припуска мм	Диаметр заготовок, мм	Общая величина припуска, мм	Диаметр заготовок, мм	Общая величина припуска, мм
80—150	8	6	2	14	10	30	15	48	17
170—280	10	7	3	16	11	32	15	50	18
315—450	12	8,5	3,5	18	11	35	16	52	19
490—660	14	10	4	20	12—12,5	38	16	55	20
700—900	15	10,5	4,5	22	13	40	16	60	22
960—1 200	18	12,5	5,5	25	13	42	17	65	23
1 200—1 500	20	14	6	28	14	45	17	70	24
1 600—1 880	22	15,5	6,5					72	25
1 960—2 280	23	16	7						
2 370—3 300	24	17	7						

Для некоторой ориентации в отношении припуска к установочной длине свариваемых изделий методом оплавления для малоуглеродистой стали приведены данные, рекомендуемые сварочным комбинатом „Оргаметалл“ (табл. 22).

Общая величина припуска, применяемая на Автомобильном заводе им. Молотова при сварке быстрорежущей стали с малоуглеродистой, приведена в табл. 23.

### 39. Сварка методом оплавления инструмента из быстрорежущей и углеродистой стали

В целях экономии специальных сортов сталей, применяющихся для режущего инструмента, как то: резцы, сверла и т. д., такой инструмент изготавливают при помощи сварки из двух сталей: рабочую часть — из быстрорежущей (например, хромовольфрамовой стали), а нерабочую часть — из углеродистой стали.

Подготовка деталей к сварке заключается в нарезке заготовок сталей и тщательной очистке торцевых и боковых сторон. Далее необходимо подготовить сварочную машину. Упорные приспособления должны быть отрегулированы таким образом, чтобы установочная длина не была нарушена.

Для указанных сталей установочная длина берется равной:  $0,7d$  — для быстрорежущей стали и  $1,3 \div 1,5d$  — для углеродистой. Однако, если диаметр заготовки быстрорежущей стали менее 15 мм, то установочную длину не рекомендуется брать менее 10 мм независимо от диаметра. Объясняется это тем, что токоподводящие электроды (губки) являются холодными и задержка изделий после сварки в зажатом состоянии может вызвать появление в изделии термических напряжений и трещин.

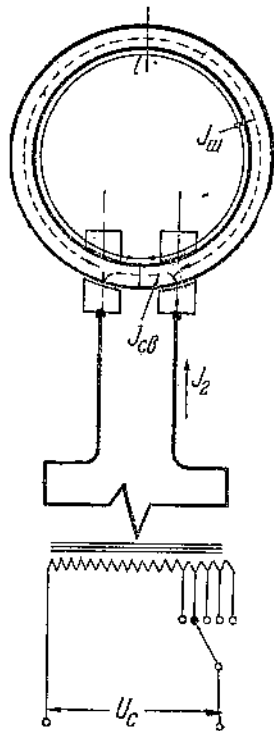
В случае необходимости сварки заготовок с неодинаковым сечением стыков следует деталь большего сечения предварительно подогревать. После сварки требуется еще термическая обработка деталей.

При воздушном охлаждении деталей образуются трещины на быстрорежущей стали вблизи шва. Это явление объясняется наличием термических перенапряжений в металле.

Златоустовский инструментальный завод производит следующую термообработку инструмента после сварки. Сварные изделия загружаются в термос, где температура доведена до  $650-700^\circ$ . Как только термос нагружен до  $\frac{1}{4}$  своего объема, поднимают его температуру постепенно в продолжение рабочей смены до  $800^\circ$ . Термос заполняют затем до  $\frac{3}{4}$  его объема, чтобы все изделия равномерно прогревались. Далее, замазывают термос глиной и в продолжение  $1\frac{1}{2}$  часов поднимают его температуру от  $800$  до  $880^\circ$ . Отжиг производится  $3\frac{1}{2}$  часа. После этого производят охлаждение до  $700^\circ$  со скоростью  $30-40^\circ$  за час и затем — до  $400^\circ$  со скоростью  $75^\circ$  в час. При температуре в  $400^\circ$  разгружают термос. Кроме указанного процесса термообработки инструмента имеются еще другие методы ведения процесса последующей термической обработки, применяемые различными заводами.

#### 40. Шунтирование тока в замкнутом контуре при стыковой сварке

При сварке встык замкнутых контуров (обода колес и др.) происходит некоторое отклонение сварочного тока по материалу изделия, как это показано на фиг. 86. Необходимо выявить причину шунтирования тока по замкнутому контуру с тем, чтобы установить необходимый при этом режим сварки. Рас-



фиг. 86. Схема шунтирования тока в замкнутом контуре при стыковой сварке.

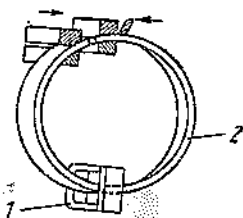
пределение тока в сварочном стыке и в целом металле происходит обратно пропорционально их сопротивлениям. Сопротивление в сварочном контакте  $R_{1к}$  определяется по указанным выше формулам; что же касается сопротивления замкнутого контура изделия, то оно является кажущимся сопротивлением и определяется по известной формуле:

$$Z = \sqrt{R_{эф}^2 + X^2} \Omega.$$

$R_{эф}$  — активное сопротивление металла изделия, куда входит также сопротивление от явления поверхностного эффекта.  $X$  — индуктивное сопротивление контура.

Из отношения величин  $\frac{R_{1к}}{Z}$  можно определить порядок значения шунтирующего тока в процентах, и ток, ответвляющийся по замкнутому контуру изделия, будет обратно пропорционален сопротивлению  $Z$ .

Величины  $R$  и  $Z$  определяются по уравнениям (49) и (75). Отношение  $R_{1к}$  к  $Z$  может



Фиг. 87. Ограничение шунтирующего тока замкнутого контура при помощи дросселя 1, надетого на свариваемое изделие 2.

быть уменьшено при дальнейшем повышении приложенного к электродам давления или путем искусственного увеличения значения индуктивного сопротивления замкнутого контура (при помощи включения в цепь контура специального магнитопровода  $I$ ), как это изображено на фиг. 87. Расчет указанного магнитопровода должен быть произведен по принципу расчета трансформатора тока.

Если замкнутый контур свариваемого изделия мал, то шунтирующий ток велик, что затрудняет сварку этих изделий без искусственного ограничения шунтирующего тока. Подобное увеличение индуктивного сопротивления является совершенно не-

обходимым, так как с точки зрения технической целесообразности нельзя тратить электрическую энергию на совершенно ненужный нагрев металла всего контура.

Зависимость повышения расхода мощности от диаметра замкнутого контура и поперечного сечения изделия дана на фиг. 88. Фирма Тейлор-Винфельд (США) ограничивает диаметр контура в 220 мм для поперечного сечения свариваемого изделия в 2950 мм<sup>2</sup>, а для сечения 4580 мм<sup>2</sup> — диаметром в 530 мм.

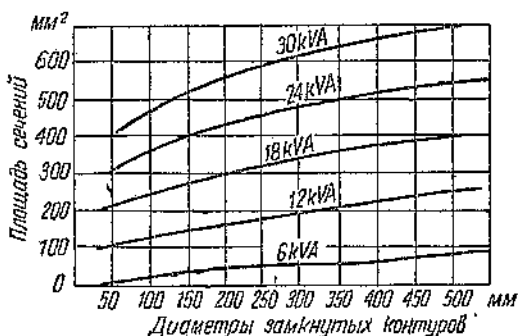
## Б. Точечная сварка

### 41. Техничко-экономические преимущества точечной сварки перед клепкой

Как известно, при изготовлении заклепочных швов детали вначале просверливаются, затем склепываются. Отверстия уменьшают полезное сечение металла, что препятствует рациональному использованию последнего. При клепке производительность работы ограничена. Стоимость рабочей силы при клепке гораздо выше, чем при сварке. При клепке возрастает число операций; кроме того, самый процесс клепки требует гораздо больше времени, чем процесс точечной сварки. При клепаном соединении увеличивается вес конструкции из-за наличия головок заклепок.

В авиационной промышленности клепаные конструкции ухудшают аэродинамические качества, так как головки заклепок, кроме увеличения веса, увеличивают одновременно аэродинамическое сопротивление самолета. Если учесть, что в одном самолете в зависимости от его размеров количество заклепок достигает до полмиллиона штук, становится понятным, насколько может возрасти его аэродинамическое сопротивление, в особенности при больших скоростях полета, при замене заклепок точечной сваркой. Производительность точечной и роликовой сварки в технико-экономическом отношении в несколько раз более выгодна, чем даже автоматическая клепка, особенно если учесть существующие возможности автоматизации сварочного процесса и доведение продолжительности сварки одной точки до десятых и сотых долей секунды.

В авиационной промышленности внедрение новой технологии в изготовление самолета производится, естественно, с большой осторожностью. Все же сварка сопротивлением, являющаяся наиболее совершенным видом соединения металлов, проникает



Фиг. 88. Кривые зависимости между потребляемой мощностью, поперечным сечением и диаметром замкнутых контуров при стыковой сварке.

и в эту отрасль промышленности. Например, некоторые французские фирмы демонстрировали на Французской авиационной выставке самолеты, у которых крыло и фюзеляж из алюминиевых сплавов были изготовлены точечной сваркой вместо клепки.

#### 42. Размеры поверхности электродов для точечной сварки

В уравнение (23) для вычисления величины сварочного тока входит одним из параметров поверхность рабочей части электродов. Согласно этому уравнению, чем больше поверхность электрода, тем большая сила тока необходима для сварки одного и того же изделия. Для одной и той же мощности сварочной машины изменение величины поверхности электродов влияет на сварочный процесс, хотя сопротивление сварочного контакта от этого не меняется. Чем больше будет эта поверхность, тем интенсивнее происходит теплопередача от сварочного контакта в холодную часть электрода. Следовательно, размеры точки при этом будут уменьшаться и в пределе сварки могут совсем не получаться.

Хорошее качество сварной точки немислимо без правильно подобранного давления. При малом давлении на электроды и заданной величине тока разогретый элемент металла перегревается до высокой температуры и вырывается из-под контакта в расплавленном состоянии (выплеск). В случае слишком большого давления электроды глубоко въедаются в металл и ослабляют прочность точки. Поэтому величину давления следует выбирать, исходя из рода материала, его толщины и степени чистоты. Согласно американским данным (инструкция Форда), для сварки стали рекомендуются следующие величины давления и диаметра электродов в зависимости от толщины листа.

Таблица 24

Зависимость диаметра торца электродов от толщины свариваемых листов

Толщина каждого листа, мм	Диаметр электрода мм	Давление кг	Толщина каждого листа, мм	Диаметр электрода мм	Давление кг
0,25	5,0	90	1,50	6,5	225
0,50	5,0	135	2,0	6,5	260
0,75	5,0	160	2,5	8,0	340
1,10	5,0	180	3,0	8,0	460
1,25	6,5	205	4,5	8,0	650

Для этих данных, естественно, возрастает и необходимая электрическая мощность сварочной машины.



### 43. Шунтирование тока в соседних точках при точечной сварке

При сварке изделий несколькими, рядом расположенными точками открываются параллельные пути протекающему току через отдаленные точки (фиг. 89). Эти параллельные токи никакой полезной работы не производят и являются паразитными токами. Очевидно, величина ответвляющегося тока будет обратно пропорциональна сопротивлению в каждой параллельной цепи. Весьма интересно выяснить величину шунтирующего тока в соседних точках. Для этого обратимся вновь к фиг. 89 и вычислим сопротивление двух параллельных путей от верхнего электрода через точки 1 и 2 к нижнему электроду и сравним с сопротивлением основного сварочного контакта.

Сопротивление параллельной цепи через точку 1 будет

$$R_1 = \rho_T \frac{l_1}{q},$$

где  $q$  — сечение, определяемое диаметром сварочной точки и толщиной листа.

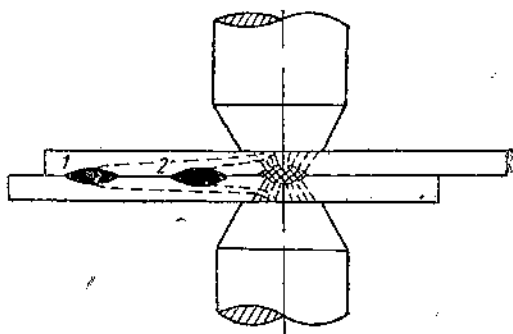
Здесь предполагаем прохождение шунтирующего тока не по всему сечению листа, а по стержню шириной, равной примерно диаметру точки.  $l$  — кратчайшее расстояние между верхним электродом, точкой и нижним электродом,  $\rho_T$  — удельное сопротивление металла при нагреве его теплопереходом от сварочной точки.

Ответвление шунтов мыслится в самом материале, поэтому сопротивление контакта сюда не входит.

При одинаковом расстоянии между сварочными точками сопротивление шунта от электродов через точку 2 выразится  $R_2 = 2R_1$ .

Чтобы вычислить шунтирующий ток в процентах, достаточно знать порядок сопротивлений внутреннего контакта  $R_{1к}$  и шунта. Сопротивление  $R_{1к}$  определяется по заданному давлению. Затем из отношения внутреннего сопротивления сварочного контакта к шунтирующему сопротивлению определяем процентное ответвление тока по шунту.

*Пример 21.* Вычислить значение шунтирующего тока при точечной сварке дуралюминевых листов толщиной  $1 + 1$  мм, если расстояние между точками равно 20 мм, а средний диаметр сварочной точки равен 4 мм. Согласно при-



Фиг. 89. Схема шунтирования тока при точечной сварке листов.

меру 1 внутреннее сопротивление сварочного контакта  $R_{1к} = 0,0000315 \Omega$ . Сопротивление шунта (через близлежащую точку) будет

$$R_{ш} = \rho_T \frac{l}{q}; \quad l = 2 \cdot 0,02 = 0,04 \text{ м}; \quad q = 4 \cdot 1 = 4 \text{ мм}^2.$$

При температуре металла между точками, равной  $100^\circ$ ,

$$\rho_{100} = 0,034 (1 + 0,0037 \cdot 100) = 0,034 \cdot 1,37 = 0,0466.$$

$$R_{ш} = 0,0466 \frac{0,04}{4} = 0,000466 \Omega.$$

Отношение сопротивления шунта к внутреннему сопротивлению сварочного контакта выразится

$$\frac{R_{ш}}{R_{1к}} = \frac{0,000466}{0,0000315} = 14,8.$$

Следовательно, через соседнюю точку ответвится ток величиной в  $6 \div 7\%$  основного тока. К отдаленным точкам от места сварки сопротивление будет еще большим; таким образом в практических условиях, когда нагрев свариваемого металла достигает температуры гораздо выше  $100^\circ$ , это отношение будет еще больше. Поэтому шунтирующим током при точечной сварке можно пренебречь.

Экспериментальное исследование влияния шунтирующего тока при сварке дуралюмина показало, что нет какого-либо влияния на механическую крепость сварных точек на образцах, сваренных отдельно одной точкой или вырезанных из листа со многими сварочными точками на расстоянии 20 мм одна от другой.

При точечной сварке легких сплавов наименьшее допустимое расстояние между точками равно  $13 \div 15$  мм.

#### 44. Элементарный расчет прочности соединения при точечной сварке

Подобно тому как ведется расчет заклепочных соединений, можно найти зависимость диаметра сварочной точки  $d$  от толщины свариваемого материала  $\Delta$ .

Обозначим допустимое напряжение на растяжение через  $R_z$  и на срез — через  $R_s$ .

Исходя из условий равнопрочности сварочной точки на срез и основного металла на растяжение, получим следующую зависимость:

$$\frac{\pi d^2}{4} \cdot R_s = \frac{\pi d}{2} \cdot \Delta R_z;$$

приняв для сталей  $R_s = 0,7 \cdot R_z$ , получим

$$\frac{\pi d^2}{4} \cdot 0,7 R_z = \frac{\pi d}{2} \cdot \Delta \cdot R_z,$$

или окончательно

$$d \approx 3\Delta.$$

Для алюминиевых сплавов принимаем  $R_s \approx 0,5R_2$ ; тогда  
$$d \approx 3,5 \div 4\Delta.$$

Допустимое усилие на срез на одну точку выразится:

$$S = \frac{\pi d^2}{4} \cdot R_s.$$

Изгибающий момент, воспринимаемый каждым листом,

$$M = R_s \cdot \frac{\Delta h^2}{6}.$$

Число рядов сварочных точек соединения

$$N = \frac{4MY_{\max}}{\pi d^2 \sum y^2 R_s};$$

здесь  $h$  — расстояние между центрами точек соединения;  $y$  — расстояние от центра соединения до центра любой сварочной точки;  $Y_{\max}$  — расстояние от нейтральной оси соединения до центра последней точки.

Расстояние точки от края листа должно быть не менее диаметра точки.

## В. Роликовая сварка

### 45. Способы роликовой сварки

В практике применяют три способа роликовой сварки:

1) непрерывное вращение роликов по изделию с непрерывной подачей электрического тока;

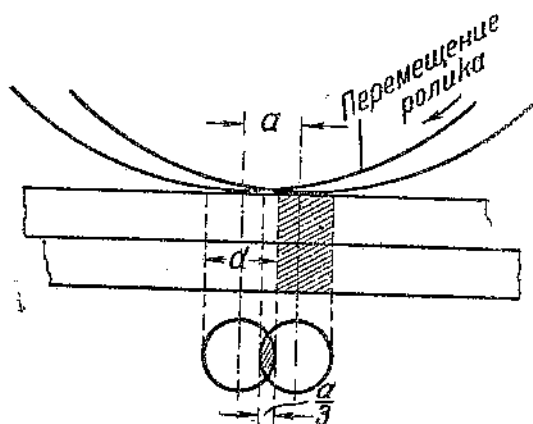
2) непрерывное вращение роликов по изделию и прерывистое включение электрического тока;

3) прерывистое вращение роликов и прерывистая подача тока.

Первый способ применяется при сварке тонких листов малоуглеродистой стали суммарной толщиной, не превышающей 1,5—2 мм; при этом способе сварки легкие сплавы не дают пока удовлетворительного шва. Последнее объясняется тем, что свариваемый металл еще до сварки предварительно нагревается теплопередачей, что приводит к интенсивному окислению контактной поверхности, вызывая повышение сопротивления сварочного контакта до такой величины, при которой значительная часть сварочного тока ответвляется по сварному шву, вследствие чего соединение получается неплотным. Этот вид сварки применяется с успехом при шовно-стыковой сварке труб.

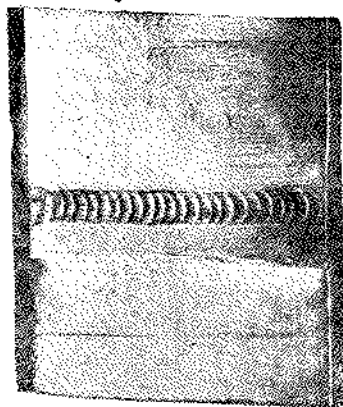
Второй способ сварки является самым распространенным. При непрерывном вращении роликов каждый элемент шва, представляющий собой отдельную сварочную точку, сваривается отдельным импульсом тока. Для плотно-непроницаемых швов необходимо, чтобы последующая точка перекрывала предыдущую, как это показано на (фиг. 90). Перекрытие точки при перемещении ролика с положения I в положение II показано

в плане на этой фигуре. Степень перекрытия точек зависит от необходимой плотности шва. На фигуре перекрытие точек равно  $\frac{1}{3}$  диаметра. Согласно практическим данным количество сварочных точек, приходящееся на 1 пог. см шва, равно 3-5. Отсюда вытекает необходимость в таком дополнительном аппарате, который производил бы включение и выключение сварочного тока соответственно количеству элементарных точек. В качестве такой аппаратуры служат различного вида токопрерыватели. При прерывистой подаче сварочного тока получается возможность производить роликковую сварку деталей из быстроокисляющихся металлов

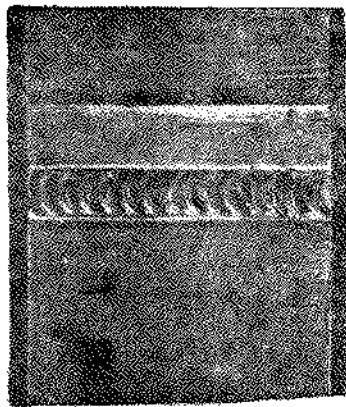


Фиг. 90. Схема образования плотного шва при роликковой сварке путем перекрытия сварных точек.

(легкие сплавы, цветные металлы). В этом случае сварка достигается кратковременными импульсами тока большой силы. Продолжительность каждого импульса длится доли секунды, и зоны



Фиг. 91. Виды роликковой сварки дуралюминовых листов 1 + 1 мм, наложенных внахлестку.



Фиг. 92. Вид роликковой сварки дуралюминовых листов толщиной 2,5 + 2,5 мм.

металла вокруг шва не успевают сильно нагреваться теплопередачей от предыдущей точки; поэтому сварка каждой последующей точки шва происходит на холодном металле.

На фиг. 91 и 92 представлены два образца удовлетвори-

ельных швов на дуралюминовых листах, где совершенно ребефино получены перекрывающие друг друга сварочные точки. Образец фиг. 91 соответствует толщине 0,6 + 0,6 мм, а образец а фиг. 92 3 + 3 мм. Последний образец был сварен на машине большой мощности (300 кВА) при помощи ионного токо-рерывателя.

Третий вид сварки может быть назван еще шаговой варкой. Вращение роликов происходит без подачи сварочного ока. Сварка производится в момент их остановки точно так же, как при точечной сварке. После выключения тока ролик вновь родолжает вращаться. Такое чередование вращаия и остановки роликов по изделию производится на заранее установленном расстоянии между точками. Качество сварного соединения получается высоким. Однако машины, применяемые для того вида сварки, громоздки, снабжены сложным приводом и меют малую производительность. Кроме того, при сварке зделий значительного веса прерывистая подача их вследствие нерций масс получается неравномерной.

Существует несколько способов выполнения сварных соединений роликовой сваркой (см. фиг. 17—21). При сварке стык уменьшается сечение металла в месте стыка. Большая рочность и плотность достигаются при роликовой сварке истов внахлестку. Этот способ наиболее распространен а практике.

#### 46. Связь между количеством сварочных точек и скоростью роликовой сварки

Выше было указано необходимое количество сварных очек на 1 пог. см для непроницаемых плотных швов. При дной и той же скорости вращения роликов  $v$  количество рядом асположенных точек будет, следовательно, зависеть от вы-ранных интервалов времени между сварочными импульсами ока. Обозначив расстояние между центрами двух рядом рас-оложенных сварных точек шва через  $\Delta$  (мм), легко вычислить о известной скорости вращения роликов количество точек 1 мин.  $N$

$$N = \frac{1000v}{\Delta}$$

Расстояние между центрами точек, или шаг, зависит от тол-ины свариваемого металла. Для плотных швов оно колеблется т 2 до 4 мм. В табл. 25 вычислены количества точек, сварен-ых в течение одной минуты при различной скорости вращения оликов для сварочного шага в 2 и 3 мм.

Из этой таблицы видно, что при роликовой сварке чрезвы-айно усложняется коммутация сварочного тока. При скорости 2 м/мин и  $\Delta = 2$  мм количество сварочных точек при работе ез перерывов достигает 60 000 в час. Это значит, что токо-рерыватель должен обеспечить 60 000 включений и 60 000 вы-

Количество сварных точек в зависимости от скорости вращения роликов

$\nu$ л/мин	0,5	0,5	1	1	1,5	1,5	2	2	2,5	2,5	3	3	3,5	4	4
$\Delta$ мм	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	3	2
$N$ точек в мин.	167	250	333	500	500	750	667	1 000	833	1 250	1 000	1 500	1 160	1 330	2 000

ключений в течение одного часа непрерывной работы машины; при этом, интервал между импульсами должен быть строго одинаков. Этим объясняется, почему механические токопрерыватели быстро изнашиваются и не обеспечивают точной дозировки сварочного импульса тока.

#### 47. Шунтирование тока при роликовой сварке

Выше мы показали, что при точечной сварке шунтирование тока в соседних точках практически не оказывает существенного влияния на сварочный процесс. Остается теперь выяснить влияние шунтирования тока при роликовой сварке, имея в виду особую близость рядом расположенных точек шва.

Выяснение этого вопроса возможно путем решения примера, пользуясь рассуждениями, приведенными в предыдущем примере для точечной сварки.

*Пример 29.* Вычислить величину сопротивления пути тока, параллельного сварочному контакту и проходящего через ближайшую сварную точку.

Примем расстояние между центрами сварных точек равным 4 мм. Температура сварной точки к моменту схода ролика на участок рядом расположенной точки не успеет еще существенно понизиться. Приняв температуру сварной точки в указанный момент времени равной все же 75% от температуры плавления свариваемого металла, вычислим изменение удельного сопротивления при этой температуре, а затем сопротивление интересующего нас участка. Температура плавления дуралюмина равна 660°; 75% этой температуры составляет 500°.

$$\rho_{500} = 0,034 (1 + 0,0037 \times 500) = 0,034 \times 2,85 = 0,097;$$

$$R_{ш} = \frac{2 \times 0,004}{4} \times 0,097 = 0,000194 \Omega;$$

$$\frac{R_{ш}}{R_{1к}} = \frac{0,000194}{0,000315} = 6,25.$$

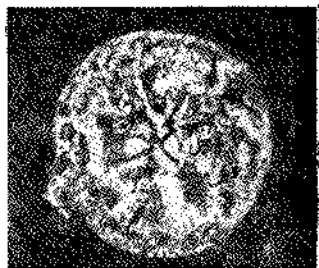
т. е. сопротивление шунта ближайшей точки более внутреннего сопротивления холодного контакта в шесть с лишним раз.

Однако часть сварочного тока (15—20%) все же ответвляется по шунту. Отсюда следует, что при роликовой сварке метал-

необходимо повысить мощность на 15–25% по сравнению с мощностью, применяемой для точечной сварки того же металла и при том же режиме. Таким же образом легко подсчитать величину шунтирующего тока и для других металлов.

### Г. Точечная сварка специальных сталей

Сущность вопроса. Опытом установлено, что такие стали, как хромансиль, хромомолибден и др. при сварке методом сопротивления дают хорошие результаты лишь в том случае, когда процесс сварки производится на сварочных аппаратах средней мощности и более длительно, чем, например, при сварке малоуглеродистой стали. В случае кратковременной арки и применения более мощного оборудования в сварочной точке образуются трещины, и соединение легко разрушается. Характерные трещины в сварке таких сталей показаны на фиг. 93. Объясняется это тем, что названные стали принимают так называемую сварочную закалку. Химический состав указанных сталей определяет их жидкотекучесть, пониженную теплопроводность и большую способность окисляться.



Фиг. 93. Трещины в сварочной точке, полученные при кратковременном режиме сварки стали.

### 48. Сварка хромансильевой стали

Рекомендуемые режимы точечной сварки хромансильевой стали, найденные экспериментальным путем, и прочность, приходящаяся на сварную точку, занесены в табл. 26.

Таблица 26

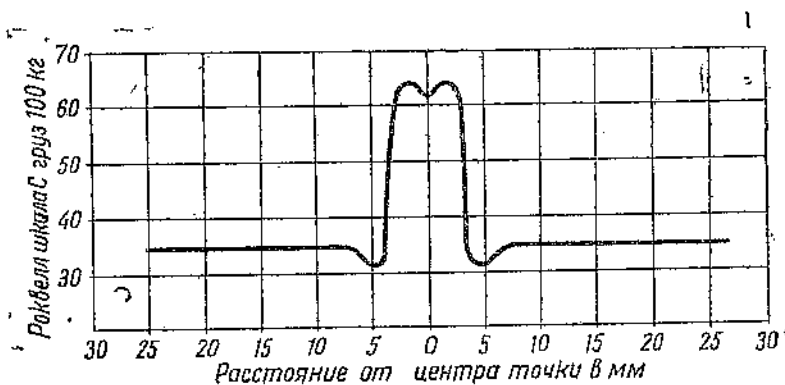
Режимы сварки хромансильевой стали и прочность соединения в зависимости от толщины листов (Сварочный комбинат „Оргаметалл“)

Толщина материала, мм	Давление кг	Продолжительность сварки сек.	Степень мощности AT-15	Диаметр плоского электрода, мм	Разрывное усилие, кг		
					без термобработки	после отжига	после закалки с отпуском
1,8 + 0,8	40	3,2	III	3	450	387	1 133
1,5 + 1,5	60	1,4	III'	6	—	650	1 550
2 + 2	80	1,4	IV	7	—	1 333	2 766
3 + 3	120	2,5	IV	8	1 950	1 575	4 200

Оптимальная продолжительность времени сварки лежит в диапазоне 1,4—3,2 сек. Величина нахлестки и расстояние сварной точки от кромки образца были взяты следующие:  $L = (2 \div 3) d$ ;  $e = d \div 1,5d$ .

В табл. 26 видно несоответствие между временами сварки у листов толщиной 0,8 мм и остальными толщинами. Большая продолжительность сварки листов малой толщины объясняется, по мнению Оргаметалла, тем обстоятельством, что листы гораздо быстрее охлаждаются теплопроводностью через электроды.

Здесь уместно будет указать, что сварка этих сталей на некоторых заводах практикуется даже с перерывами, в одной и той же сварочной точке, длящимися доли секунды.



Фиг. 94. График твердости сварной точки стали хромансиль.

Как показывают опыты при сварке сталей, содержащих хром, твердость в месте сварки значительно возрастает. На фиг. 94 представлен график твердости сварной точки и основного металла для стали хромансиль. Как видно из графика, твердость стали на поверхности точки увеличилась примерно в 3 раза. После отжига или высокого отпуска твердость сварной точки понижается или даже выравнивается с твердостью основного материала.

Рассмотрим вопрос о целесообразности применения для точечной сварки указанных сталей электродов со сферической поверхностью. В качестве критерия приводим результаты прочности стальных образцов, сваренных точечной сваркой при одинаковых режимах плоскими и сферическими электродами, в виде двух диаграмм фиг. 95—96. Сравнивая результаты обоих графиков, легко убедиться, что сферический электрод не дает никакого преимущества для сварки сталей по сравнению с плоским электродом, между тем как поддерживать постоянной сферическую форму торца электрода является далеко нелегким делом. Следует еще указать на величины расхода электро-



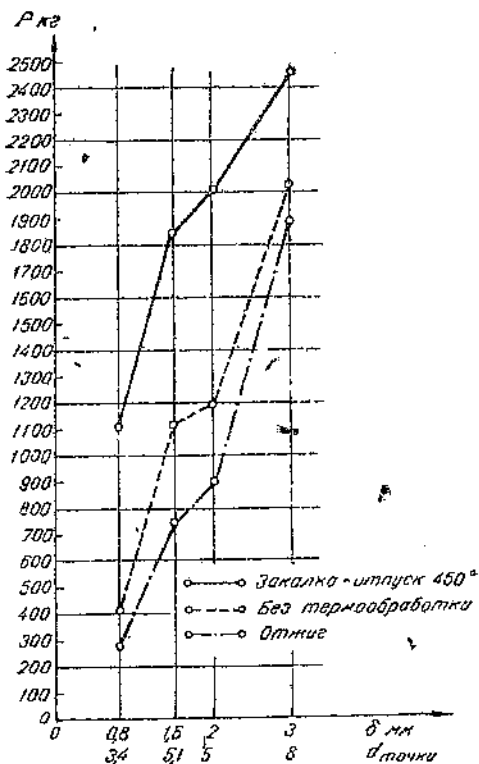
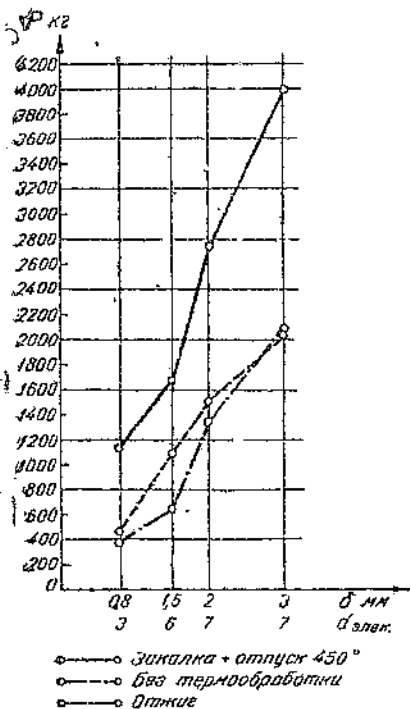
энергии при сварке хромансильевой стали. Расход электро-  
энергии на сварку 100 точек составляет:

Толщина листов

0,8 + 0,8 мм  
1,5 + 1,5 " "  
3 + 3 " "

Расход энергии

0,14 — 0,46 kWh  
0,17 — 0,31 " "  
0,47 — 0,73 " "



Фиг. 95. Прочность соединения точечной сварки стали хромансиль в зависимости от толщины листов и термообработки (электрод плоский).

Фиг. 96. Прочность точечной сварки стали хромансиль в зависимости от толщины листов и термообработки (электрод сферический).

При этом меньшее значение расхода электроэнергии для каждой толщины листов относится к минимальному времени, а большее — к максимальному.

#### 49. Сварка хромомолибденовой стали

Сварка хромомолибденовой стали производится так же, как и сварка хромансильевой стали. В табл. 27 приведены режимы сварки на маломощных точечных машинах АТН-8 и АТН-16 для хромомолибденовой и малоуглеродистой сталей. Как видно из

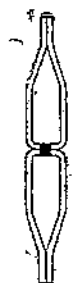
таблицы, при сварке хромомолибденовой стали требуется меньшая мощность, чем для малоуглеродистой стали.

Таблица 27

Опытные данные точечной сварки для хромомолибденовой и малоуглеродистой сталей

АТН-8				АТН-16			
Толщина материала, мм	Диаметр электрода, мм	Ступень мощности		Толщина материала, мм	Диаметр электрода, мм	Ступень мощности	
		для малоуглеродистой стали	для хромомолибденовой стали			для малоуглеродистой стали	для хромомолибденовой стали
0,5 + 0,5	3—4	3—4	2 <sup>1</sup> —3	1 + 1	4—5	1	1
1 + 1	4—5	4—5	3—4	1,5 + 1,5	4—5	1—2	1—2
1,5 + 1,5	4—5	4—5	3—4	2 + 2	4—6	2—3	2
2 + 2	4—6	5—6	4—5	2,5 + 2,5	5—6	3—4	2—3
2,5 + 2,5	4—6	6—7	4—5	3 + 3	5—6	3—4	2—3
3 + 3	5—6	7	5—6	4 + 4	6	4—5	3—4
				5 + 5	6	5—6	4—5
				6 + 6	6	7	6—7

Расстояние между электродами при разомкнутой цепи должно быть для этих аппаратов равно 15—20 мм. Пружина, производящая сжатие, должна обеспечить надлежащее давление (40—100 кг) в контакте. Продолжительность сварки хромомолибденовой стали больше, чем малоуглеродистой, и равна 1,5÷3 сек.



Фиг. 98.



Фиг. 97.



Фиг. 99.

Фиг. 97—99. Образцы для испытания на срез при точечной сварке.

В тех условиях, когда сварочные швы применяют вместо заклепочных, возникает вопрос о равнопрочности этих соединений. Был произведен ряд опытов с образцами из различных материалов и формы (фиг. 97—99). Опытные данные испытания на срез образцов хромомолибденовой стали, изготовленных согласно фиг. 97 для сварочного и заклепочного соединения, занесены в табл. 28.

Наиболее полное испытание швов на срез, произведенное для хромомолибденовых сталей, соединенных точечной сваркой

Сравнение прочности соединений точечной сваркой и заклепками хромомолибденовой стали

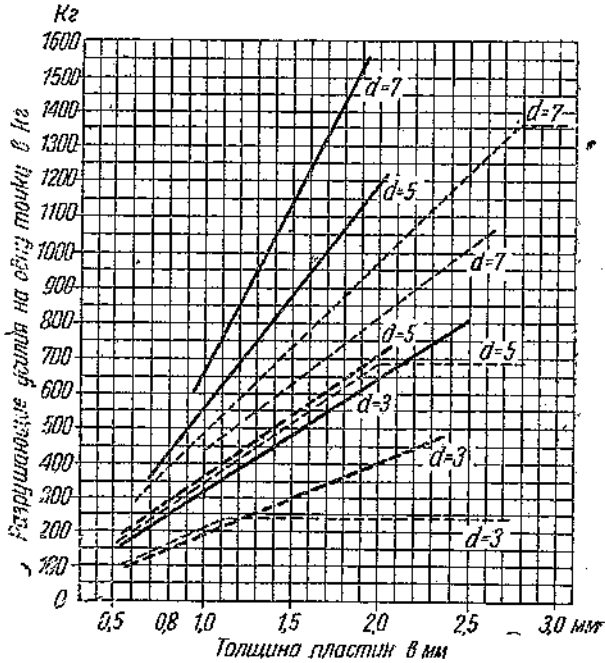
Точечная сварка				Заклепка			
толщина материала мм	диаметр сварной точки мм	разрывное усилие на 1 точку		толщина материала мм	диаметр заклепки мм	разрывное усилие на 1 заклепку, кг	удельное сопротивление разрыву кг/мм <sup>2</sup>
		кг	кг/мм <sup>2</sup>				
1+1	3	350	50	1+1	3	250	35,5
1+1	5	550	28	1+1	5	350	18
1+1	7	650	17	1+1	7	500	13

и заклепкой, характеризуется диаграммой на фиг. 100. Кривые построены для различных толщин пластин и диаметров сварочной точки и заклепки. Сплошные линии соответствуют сварке закаленной стали, жирный пунктир — нормализованной стали, а тонкий пунктир — той же стали с заклепочным соединением.

Следует отметить очень важное обстоятельство, вытекающее из графика, что закаленная хромомолибденовая сталь, сваренная точечной сваркой, при испытании на срез сопротивляется лучше, чем нормализованная, т.е. самая точка приобретает в процессе сварки свойства основного металла.

В табл. 29 помещены для сравнения опытные данные работы сварной точки на срез и разрыв для хромомолибденовой стали.

Сопротивление точки на разрыв было проверено на образцах, указанных на фиг. 98. Здесь уместно будет отметить важность



Фиг. 100. Механическая прочность образцов хромомолибденовой стали, сваренных точками, и клепаных образцов.

Сплошная линия — закаленная сталь; жирный пунктир — нормализованная сталь; тонкий пунктир — клепаные образцы (заклепки стальные).

правильного выбора типа образцов для испытания прочности точечной сварки. Так, например, при испытании на срез, одно-срезные образцы (применяемые при заклепке) сильно деформируются при точечной сварке, как это изображено на фиг. 99. В этом случае имеет место сложное сопротивление (изгиб и растяжение), поэтому результаты прочности сварной точки

Таблица 29

Разрушающее усилие точки для некоторых толщин хромомолибденовой стали

Толщина материала мм	Диаметр электрода мм	Разрушающее усилие на 1 точку, кг	
		срез	разрыв
2 + 2	3	480	430
1 + 1	5	450	250
3 + 3	5	1100	900
2 + 2	7	1700	550
3 + 3	7	2100	1300

стальных образцов получаются преувеличенными по сравнению с заклепкой.

## 50. Сварка нержавеющей стали

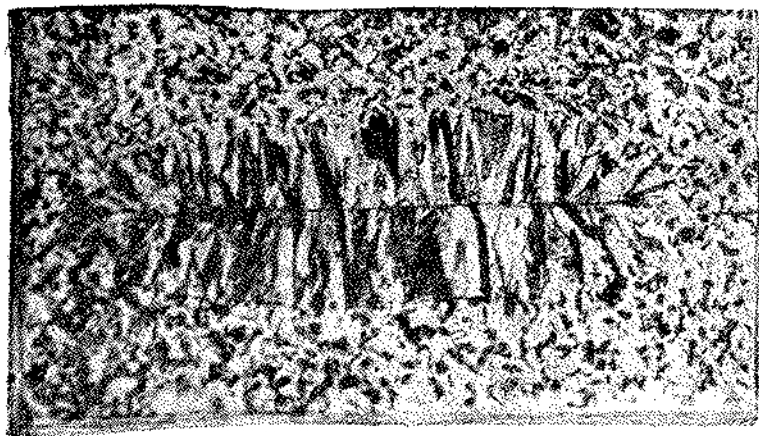
Листовая нержавеющая сталь применяется во многих отраслях промышленности (самолетостроение, вагоностроение и др.). Наиболее распространенным сор-

том этой стали является хромоникелевая сталь с содержанием 18% Cr и 8% Ni. Все ценные свойства стали как механические, так и антикоррозионные, получаются благодаря ее аустенитовой структуре. При нагреве нержавеющей стали выше 510° начинается выпадение карбидов из твердого раствора. При температуре 648° происходит наиболее энергичное выпадение карбидов. По мере дальнейшего нагревания стали выпадение карбидов уменьшается, углерод вновь растворяется в железе, и, наконец, при температуре выше 843° сталь снова принимает нормальную аустенитовую структуру.

Нержавеющая сталь (18-8) является наилучшим материалом для сварки сопротивлением благодаря высокому удельному сопротивлению и малому содержанию углерода. Точечная и роликковая сварка является единственно возможным методом соединения деталей из нержавеющей стали, так как сверление отверстий в этой стали является весьма трудным и при клепке часто получают трещины в основном материале.

Электрическая энергия, необходимая для точечной сварки стали 18-8, должна протекать в короткий промежуток времени. При этом количество энергии должно быть строго дозировано для того, чтобы зона тепла была резко локализована, а остывание расплавленного металла и переход через область критических температур происходили возможно быстрее, в то время как окружающие зоны металла вокруг сварной точки не успели еще получить отжиг и потерять аустенитовую структуру. Такая точная дозировка сварочного импульса оказывается возможной при работе с ионными токопрерывателями, допускающими производить сварку в течение нескольких сотых долей

секунды. Как видно из табл. 9 физических величин, удельное сопротивление нержавеющей стали в 6—7 раз более, чем малоуглеродистой стали; теплопроводность ее меньше. В связи с этим сила тока, необходимая для точечной или роликовой сварки нержавеющей стали, сравнительно невелика.



Фиг. 101. Микроструктура сварной точки нержавеющей стали (18-8) толщиной  $0,5 + 0,5$  мм.

На фиг. 101 представлена микроструктура сварной точки стали 18-8 толщиной  $0,5 + 0,5$  мм, сваренной при следующем режиме: диаметр электрода 6,35 мм, давление 115 кг, время сварки 0,02 сек. Этот снимок характеризует процесс образования сварной точки этой стали.

Как видно из снимка, во внутреннем контакте имеется зона расплавленного металла, а вокруг нее — зона кристаллизации.

Таблица 30

Минимальное и расчетное сопротивления на одну точку при сварке нержавеющей стали

Толщина листа мм	Давление на электроды кг	Минимальное сопротивление срезу на I точку кг	Расчетное сопротивление срезу на I точку кг	Время сварки, сек.
0,13	45	64	41	
0,254	60	128,5	85	
0,38	70	198	130	
0,51	80	260	172	
0,64	90	327	216	
0,76	100	390	260	
0,90	115	454	300	
1,0	125	520	340	
1,3	150	645	426	
1,52	170	780	515	

Рост кристаллитов ориентирован, главным образом, перпендикулярно к плоскости свариваемых листов, т. е. по градиенту температуры. Обращает на себя внимание радиальное направление кристаллитов, по краям точки, свидетельствующее о росте их в направлении от центра к периферии.

В табл. 30 приведены некоторые данные сварки стали 18-8 и сопротивления срезу, приходящегося на одну точку, принятые департаментом военно-воздушного флота США. В таблице также приведены минимальные величины сопротивления для каждой точки на срез. Кроме того, в таблице дана еще расчетная величина сопротивления.

Расчетная величина сопротивления каждой точки на срез для конструкции принимается равной  $\frac{2}{3}$  от минимального значения сопротивления срезу таких же толщин, получаемых на образцах.

### 51. Сварка конструкционной стали

Применение контактной сварки в строительном деле вызывает необходимость выяснения величины получаемого сопротивления сварных соединений.

Ниже приводятся данные сопротивления срезу сварных соединений для двух сортов наиболее ходовых толщин конструкционной стали (табл. 31).

Таблица 31

Сопротивление точек на срез в сварных соединениях конструкционной стали

Сорт стали, химический состав	Испытываемый образец	Вид напряжения	Число испытаний	Напряжение на срез, кг/мм <sup>2</sup>		
				высшее	низшее	среднее
0,16% С	Основной металл . . .	Растяжение	5	43,5	43,1	43,3
	" " . . .	Срез	5	35,3	34,1	34,8
0,51% Мп	Стыковая сварка оплавлением . . . . .	Растяжение	10	43,0	40,2	41,6
		Срез	10	35,0	33,5	34,2
0,016% Р	То же . . . . .	Растяжение	10	34,4	34,3	33,7
		Срез	10	34,4	34,3	33,7
0,035% S	Точечная сварка . . .	Растяжение	5	49	48,0	48,5
		Срез	5	39,4	38,5	38,9
0,33% С	Основной металл . . .	Растяжение	5	49	48,0	48,5
		Срез	5	39,4	38,5	38,9
0,35% Мп	Стыковая сварка оплавлением . . . . .	Растяжение	10	58,75	57,4	38,4
		Срез	10	39,1	37,6	38,6
0,07% Р	То же . . . . .	Растяжение	10	58,75	57,4	38,4
		Срез	10	39,1	37,6	38,6
0,04% S	Точечная сварка . . .	Растяжение	10	38,1	35,4	36,8
		Срез	10	38,1	35,4	36,8

## 52. Легкие сплавы. Необходимые условия сварки

Из ряда известных легких сплавов здесь будут рассмотрены лишь дуралюмин и электрон.

Дуралюмин. Алюминиевый сплав — дуралюмин — был найден в 1909 г. проф. Вильмом. Этот сплав получил весьма быстрое распространение благодаря высоким механическим свойствам и малому удельному весу ( $\gamma = 2,8$ ). Дуралюмин состоит из алюминия (94—95%), меди (3—4,5%), марганца (0,5—1%) и магния (до 0,5%).

Дуралюмин подвергается закалке при температуре около 500°. Непосредственно после закалки он ведет себя иначе, чем черные металлы, и улучшение механических свойств у дуралюмина происходит постепенно после закалки. Такой процесс закалки называют еще процессом старения. Например, временное сопротивление образцов дуралюмина, испытанных непосредственно после закалки, равно 22—23 кг/мм<sup>2</sup>, а образцы того же материала, но взятые через семь суток после закалки, дают сопротивление разрыву 42—43 кг/мм<sup>2</sup>. Процесс старения у дуралюмина проходит обычно при комнатной температуре (14—15°) после закалки в течение шести-семи дней.

Главным и опасным пороком дуралюмина является коррозия.

Борьба с появлением коррозии на дуралюминовых листах проводится целым рядом профилактических мероприятий, к ним относятся: 1) покрытие листов дуралюмина специальным лаком; 2) покрытие их особым составом вазелина, 3) покрытие листов дуралюмина во время прокатки слоем алюминия и 4) покрытие листов стойкой оксидной пленкой, образованной анодной поляризацией или химической реакцией в щелочи.

Третий способ называется еще плакированием; при этом способе слой алюминия достигает 2—7% от толщины основного листа. Благодаря своим замечательным свойствам дуралюмин применяется, главным образом, в авиационной промышленности, где чрезвычайно важно такое сочетание, как высокие механические свойства с малым удельным весом материала. Сырой воздух и особенно морская вода способствуют развитию коррозии. Запушенная коррозия дает вздутые, и металл настолько ослабевает, что от малейшего удара рассыпается.

Электрон. Электрон относится также к виду легких сплавов. Это сплав на магниевой основе (более 70% магния) с прибавлением алюминия, меди, марганца, цинка, кремния и т. п. Химический состав электрона примерно следующий: 5,1% Al, 0,08% Cu, 0,66% Mn, 1,15% Zn, 0,03% Si, 0,02% Fe, остальное Mg. Электрон обладает очень малым удельным весом: 1,8 (у магния 1,74).

Механические свойства электрона, как и у алюминиевых сплавов, зависят во многом от термической и механической обработки. Сопротивление разрыву лежит в пределах 26—42 кг/мм<sup>2</sup> при соответствующем удлинении от 18 до 3%. Обработку электрона

можно производить на станках, предназначенных для обработки дерева, при этом не требуется совершенно охлаждения реза водой. К недостатку электрона относится возможность воспламенения, что требует соблюдения некоторых предосторожностей. Электрон может быть изготовлен в виде отливки, проволоки, листов, труб и т. д. В ближайшем будущем этот металл получит несомненно широкое применение в различных отраслях народного хозяйства.

Необходимые условия сварки легких сплавов. Легкие металлы и их сплавы обладают относительно высокой тепло- и электропроводностью.

Сварка этих металлов происходит в очень ограниченном интервале температур. Кроме того, алюминиевые сплавы обычно покрыты оксидной пленкой  $Al_2O_3$ , представляющей собой большое электрическое сопротивление. Эти обстоятельства чрезвычайно осложняют процесс сварки.

Таблица 32  
Зависимость диаметра электродов от толщины свариваемого материала

Толщина пакета мм	Диаметр контактной поверхности электродов мм
0,5 + 0,5	3,5—4
0,6 + 0,6	4—4,5
0,8 + 0,8	4,5—5
1 + 1	5—5,5
1,5 + 1,5	5,5—6
2 + 2	6—7

Давление на электроды является важным фактором при сварке легких сплавов. Оно должно быть точно определено с учетом характера металла, его толщины и формы детали. Давление должно быть достаточным, чтобы разрушить поверхностный слой окиси на изделии и препятствовать образованию выплеска. С другой стороны, давление ограничивается сравнительно малым электрическим сопротивлением алюминиевых сплавов. Высокая электро- и теплопроводность легких сплавов вызывает необходимость производить сварку большими силами тока, чем при

сварке сталей. Особое внимание должно быть уделено электродам, так как металл электродов определяет отвод тепла, генерируемого при сварке. Материалом для электродов служит красная электролитическая медь.

Выбор диаметра контактной поверхности электрода в зависимости от толщины материала представлен в табл. 32.

Форма электродов, особенно в рабочем торце, имеет большое значение при сварке легких сплавов. Американские фирмы рекомендуют применять для этой цели электроды диаметром рабочего торца 16 мм со слегка закругленной под небольшим углом (7—10°) заточкой. Кроме того, следует следить за тем, чтобы контактная поверхность электродов и свариваемого материала оставалась всегда чистой. Если эти условия не соблюдаются, возникает опасность перегрева электродов. При этом происходит незначительный для глаза переход меди на поверхность сварной точки; впоследствии эти следы меди являются



источником коррозии шва. Последнего можно совершенно избежать частой зачисткой электродов (через 6—10 точек для медных электродов) и правильно выбранным давлением. В производственных условиях приходится менять электроды для их заточки через каждые 200—400 точек. При роликовой сварке, когда электродом служит ролик, электроды обнаруживают меньшую способность к перегреву и загрязнению вследствие большой массы ролика и постоянного вращения. Последнее обуславливает распространение зоны прохождения тока по всей периферии ролика. Ролики также изготавливаются из электролитической меди с водяным охлаждением.

Помимо силы тока и сопротивления сварочного контакта имеется третий фактор — время сварки, — играющий значительную роль при сварке легких сплавов. При сварке сталей небольшая сила тока компенсируется до некоторой степени увеличением продолжительности времени сварки. При сварке легких сплавов этой возможности нет, так как длительность сварки определяет величину сварной зоны, строение металла и диаметр сварной точки. Поэтому продолжительность сварки должна быть короткой и строго определенной.

### 53. Подготовка алюминиевых сплавов к сварке

Все алюминиевые сплавы подразделяются на две группы. К первой группе относится чистый алюминий и сплавы его, механические и другие свойства которых мало изменяются от термической обработки. Ко второй группе относятся сплавы с высоким механическим сопротивлением; свойства эти металлы приобретают не только в результате механической обработки, но и путем специальной термической обработки; к этой группе относится также плакированный дуралюмин, широко применяемый благодаря его антикоррозионной стойкости.

Чистота поверхности сплавов первой группы позволяет обычно производить сварку без особой предварительной подготовки изделий. Сплавы второй группы подвергаются термообработке с последующим отпуском. Они покрыты обычно прочной пленкой окиси, которая должна быть удалена непосредственно перед сваркой. Очистка может быть произведена мелкой наждачной бумагой 00 и 000 или травлением. Для механической очистки можно также использовать мягкую металлическую щетку, насаженную, например, на электрическую дрель. Щетка рекомендуется следующих размеров: внешний диаметр 60 мм, диаметр стальной проволоки 0,2 мм, ширина щетки 20 мм, число оборотов 1500 об/мин.

До механической очистки наждаком или щеткой необходимо удалить жир с поверхностей изделий, так как в противном случае получается поверхность с отполированной оксидной пленкой. Очистка металлической щеткой должна производиться очень осторожно, дабы не нарушить плакирующий слой.

Химическая очистка поверхностей перед сваркой требует предварительного обезжиривания изделий.

Из существующих способов химической очистки разберем здесь лишь наиболее распространенный. Он имеет то преимущество перед другими способами, что весь процесс ведется в одной ванне, которая мало влияет на сплавы алюминия. Это преимущество особенно ценно при работе с плакированным дуралюмином. Состав ванны следующий: воды 85 л; серной кислоты 15 л; хромовой кислоты в порошке 5 кг. Травление производят в свинцовой ванне с нагреванием до температуры 50—60°, при которой продолжительность очистки равна 20—30 мин.; в холодной ванне нужно держать изделия в течение нескольких часов. После очистки изделия промываются в проточной воде и быстро просушиваются в нагретом воздухе. Зачастую можно довольствоваться очисткой листового материала с одной наружной стороны, но предварительно места сварки следует обезжирить. Если наружные поверхности листов хорошо защищены, то в процессе сварки имеет место правильное удаление тепла, избегается лишний перегрев электродов. Предварительная легкая очистка деталей также необходима и для плакированных сплавов алюминия, которые после термической обработки покрываются слоем окиси.

Помимо влияния пленки окиси алюминиевые сплавы по-разному поддаются сварке. Алюминиевые сплавы первой группы позволяют без особых трудов получить сварные швы с высоким механическим сопротивлением. Изменение структуры у этих сплавов не вызывает сильного изменения их механических свойств. У алюминиевых сплавов второй группы, т. е. сплавов, подвергающихся термической обработке, механические и химические свойства сварного шва зависят от структуры металла шва. Для устранения очагов коррозии необходимо, чтобы изменения структуры металла, которые наблюдаются в сварной точке, не достигали наружной поверхности точки. Трещины или пустоты, обнаруженные внутри точки, свидетельствуют о неправильно выбранных величинах времени и тока сварки.

Трещины на поверхности сварочной точки характеризуют недостаточное давление на электродах. Нормальную сварку легких сплавов представляется возможным получить только при точной дозировке силы тока, продолжительности сварки и давления на электроды.

#### 54. Энергетические режимы сварки легких сплавов

Рекомендуются следующие условия для точечной сварки алюминиевых сплавов (табл. 33).

Для роликовой сварки сплава типа 52-S (имеющего следующий химический состав: 2,5% Mg, 0,25% Si и остальное Al) фирма «Алюминий Компани» рекомендует режимы, приведенные в табл. 34.

В практических условиях сварки следует, по нашему мнению, исходить из минимальных величин давления на электроды, приведенных в этих таблицах.

Режимы точечной сварки алюминиевых сплавов

Толщина материала <i>мм</i>	Время сварки в сек.	Сила тока А	Давление, кг	
			минимальное	максимальное
0,4 + 0,4	0,08	14 000	90	180
0,8 + 0,8	0,16	18 000	180	270
1,6 + 1,6	0,20	24 000	225	315
3,2 + 3,2	0,30	35 000	360	540

Таблица 34

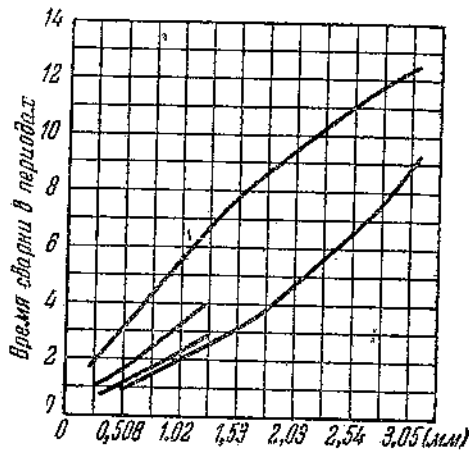
Режимы роликовой сварки дуралюмина

Толщина материала <i>мм</i>	Давление на электроды <i>кг</i>	Количество точек на дюйм	Величина сварочного тока А
0,63 + 0,63	250	18	26 000
0,81 + 0,81	310	16	29 000
1,0 + 1,0	345	14,3	32 000
1,26 + 1,26	390	12,6	36 000
1,6 + 1,6	435	11,3	37 500
1,82 + 1,82	465	10,6	39 000
2,0 + 2,0	490	10,0	40 000
2,6 + 2,6	550	9,0	42 000
3,175 + 3,175	590	8,0	48 000

Помимо указанных режимов, имеются еще другие, рекомендуемые другими фирмами.

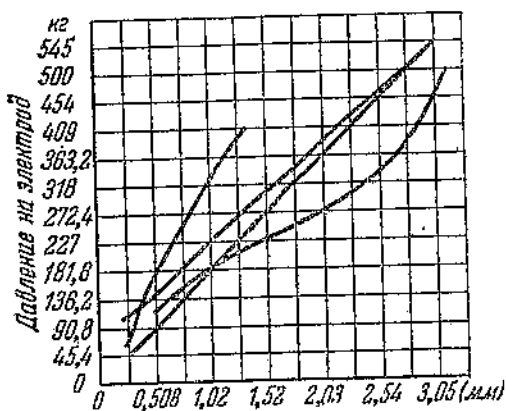
На фиг. 102 приведены графики времени сварки, а на фиг. 103 и 104 — графики давления и тока. Эти данные показывают, что для сварки легких сплавов нет еще твердо установленных оптимальных режимов.

Время сварки в приведенных таблицах дано минимальное, однако, имеется ряд экспериментальных данных, указывающих на возможность получения удовлетворительной сварки алюминиевых сплавов при большем времени сварки. Эта возможность допускает использование сварочного оборудования средней мощности. Согласно исследованиям С. Weston Steward рекомендуется оптимальное

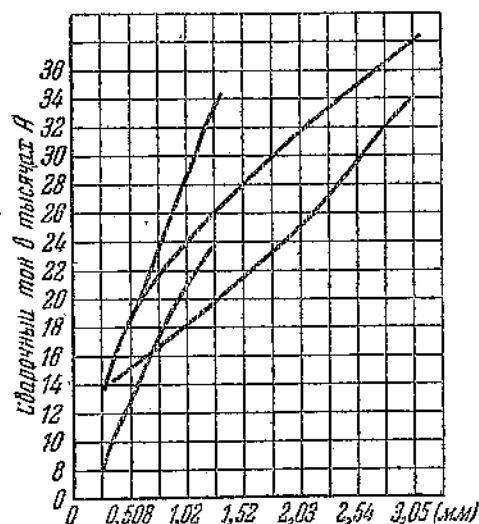


Фиг. 102. Режим сварки алюминиевых сплавов в зависимости от толщины листов и времени сварки.

время сварки алюминиевых сплавов 0,20 сек. (10 пер). При уменьшении времени сварки ниже 0,1 сек. в сварочной точке образуются (по его мнению) пузырьки. Влияние трех переменных величин — давление на электрод, сила тока и время сварки — на изменение размеров сварной точки показано непосредственно на листах (по макроструктуре) фиг. 105.



Фиг. 103. Режим сварки в зависимости от толщины листов и давления на электроды.



Фиг. 104. Режим сварки в зависимости от толщины алюминиевых листов и сварочного тока.

Для всех этих точек время и давление оставалось постоянным, а именно:  $t_c = 10$  пер., а  $P = 282$  кг.

На фиг. 106 даны кривые сопротивления одной точки на срез в зависимости от силы тока при различных временах сварки. Пунктирная часть кривых указывает, при какой силе тока получалась неудовлетворительная сварка вследствие образования пор и трещин. Из графика видно, что при большем

макроснимки, характеризующие изменение размеров сварной точки в зависимости от изменения времени сварки. Величина сварочного тока при этом  $I_2 = 26900$  А, а давление на электроды 280 кг. Продолжительность каждой сварочной точки указана в периодах частоты напряжения сети (цифры у каждой точки).

На фиг. 105, В представлены макроснимки точечной сварки, произведенной при различном давлении на электроды. Время сварки для всех точек оставалось постоянным и равным 10 пер.; сила тока  $I_2 = 26900$  А, а давление изменялось от 136 до 520 кг. Материал — плакированный дуралюмин 1,6+1,6 мм. Макроснимок, характеризующий изменение величины сварной точки от изменения силы тока, показан на фиг. 105, С, сила тока менялась от 16000 до 32000 А.

Для всех этих точек

времени сварки (10 пер.) пунктирная линия начинается при более высокой силе тока, чем при времени 0,5 пер. Опыты пока-



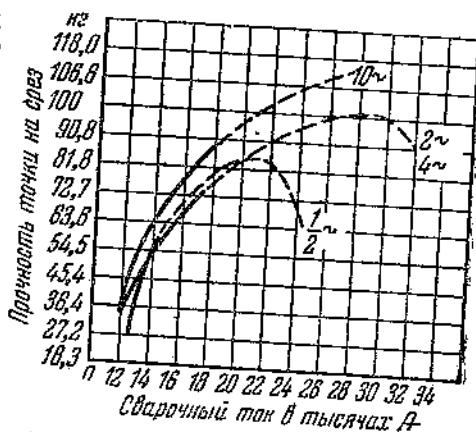
Фиг. 105. Изменение размеров сварной точки (по ее макроструктуре) в зависимости от параметров сварочного режима для плакированного дуралюмина 24 ST толщиной 1,56 + 1,56 мм.

А — влияние времени сварки (в периодах) на величину точки при постоянных значениях  $I_s \approx 27000$  А и давления на электроды  $P=280$  кг; В — влияние фактора давления, выраженного в англ. фун. на величину сварной точки при постоянных значениях  $I_s=27000$  А и  $t=10$  пер.; С — влияние величины тока на размеры сварочной точки при  $t=10$  пер. и  $P=282$  кг.

зали, что небольшие трещины в середине сварной точки устраняются путем увеличения продолжительности сварки и сохранения при этом того же самого давления и силы тока. Steward рекомендует для всех практических работ по сварке легких сплавов оптимальное время в 10 пер.

Эти данные наглядно иллюстрируют влияние каждого из трех переменных (ток, давление и время) на развитие тепла в сварочном контакте, следовательно, и на размеры образовавшейся сварной точки.

У нас в СССР разработаны режимы удовлетворительной сварки легких сплавов на машинах средней мощности мощностью 25—40 kVA, результаты которых приведены в табл. 37.

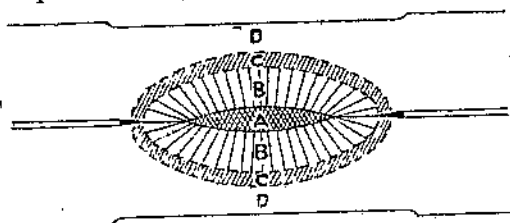


Фиг. 106. Зависимость прочности точки образцов из алюминиевых сплавов на срез как функция силы сварочного тока и времени сварки.

## 55. Структура швов легких сплавов, полученных точечной и роликовой сваркой

При точечной и роликовой сварке объем сварных точек должен быть таким, чтобы обеспечить достаточную прочность соединения. Зона расплавленного металла не должна выходить наружу, то есть ко внешней поверхности листов.

Под „выходом точки“ подразумевается изменение структуры основного металла в литую структуру под действием избыточного сварочного тепла. Особенно важно не допускать выход точки при сварке плакированного дуралюмина, так как в этом случае обуславливается возможность возникновения очага коррозии в сварочной точке, вследствие диффундирования меди из дуралюмина в плакирующий слой алюминия. При нарушении этого слоя под действием щелочи во время анодной поляризации изделия из дуралюмина сварная точка темнеет и быстрее корродирует. Существует ряд химических методов для определения состояния плакирующего слоя и выхода точки наружу после сварки. В случае выхода точки на поверхность наблюдается, кроме того, частичное или полное разрушение плакирующего слоя.



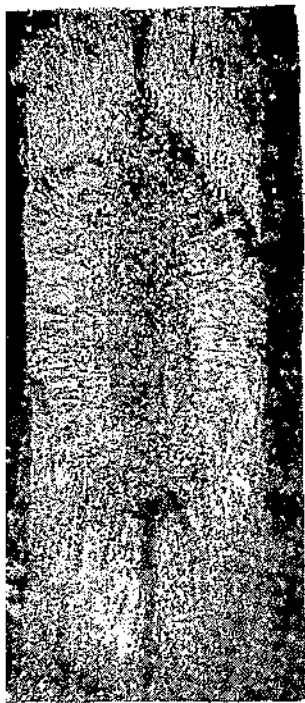
Фиг. 107. Схематическое изображение макроструктуры идеальной сварочной точки на двух листах из алюминиевых сплавов.

Схематическое изображение структуры сварной точки двух листов из сплавов алюминия представлено на фиг. 107. Структура точки неоднородна и состоит из нескольких зон. В зоне А имеет место литая мелкозернистая структура. Зона В соответствует сварке рекристаллизацией и состоит из продолговатых кристаллов с радиальной ориентацией. В зоне С материал подвергнут температурным влияниям. Наконец, в зоне D основной металл остается без изменения.

На фиг. 108 представлен микроснимок ( $\times 17$ ) сварной точки плакированного и закаленного дуралюмина с выходом точки на поверхность свариваемых листов. Плакирующий слой алюминия разрушен.

На фиг. 109 показана структура точечной сварки плакированного дуралюмина  $0,8 \pm 0,8$  мм. Слой алюминия, покрываю-

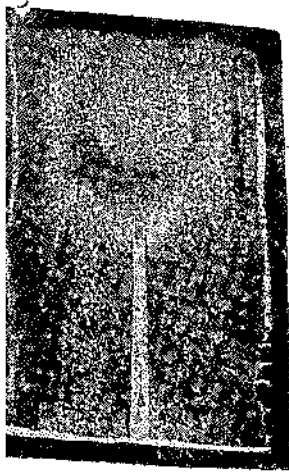
<sup>1</sup> Химический метод определения выхода сварной точки на поверхность свариваемых листов плакированного дуралюмина следует производить при подборе режимов сварки и на образцах технологической пробы. Вначале сварной образец промывается спиртом или бензином и просушивается. Затем наносят на поверхность сварной точки каплю 10% раствора едкого натра (NaOH), держат 2—3 минуты и снимают ее кусочком ваты. Если точка вышла на поверхность, то под действием этого раствора она темнеет.



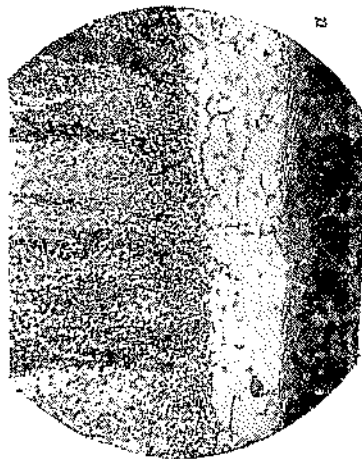
Фиг. 108. Макроструктура сварочной точки дуралюмина толщиной  $0,4 \pm 0,4$  мм при правильном режиме сварки, при котором точка вышла наружу и плакированный слой разрушен.



Фиг. 109. Нормальная макроструктура сварочной точки дуралюмина ( $0,8 \pm 0,8$  мм) при правильном режиме, сварки



Фиг. 110. Нормальная макроструктура сварочной точки дуралюмина толщиной  $3 \pm 3$  мм.

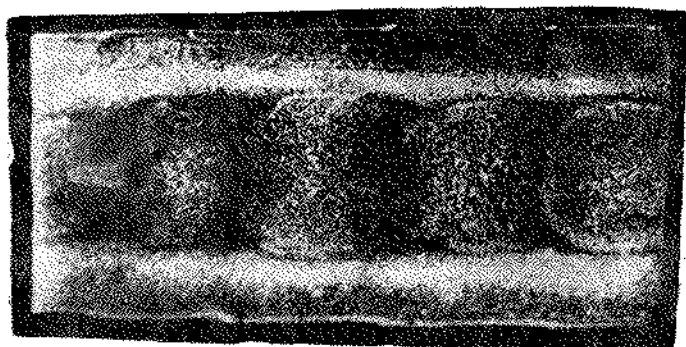


Фиг. 111. Микроструктура металла между горячей и холодной зоны между сварной точкой и основным металлом дуралюминовых листов  $0,8 \pm 0,8$  мм ( $\times 200$ ). а — плакированный (слой на поверхности точки).

ший поверхность листов, остался после сварки совершенно нетронутым с наружной и внутренней стороны. На фиг. 110 показана структура (макроснимок) сварной точки плакированного дуралюмина толщиной пакета  $3+3$  мм. Эти снимки дают представление о структуре металла шва после сварки. В обоих случаях зона литого металла находится внутри и окружена зоной отожженного металла однородной толщины.

На фиг. 111 представлена структура ( $\times 200$ ) переходной зоны между сварной точкой и основным материалом (листовой закаленный дуралюмин). Как видно из снимка, плакированный слой сохранен после сварки.

На фиг. 112 представлен макроснимок ( $\times 7$ ) дуралюминовых листов толщиной  $3+3$  мм, сваренных роликовой сваркой. Здесь совершенно отчетливо видно перекрытие сварных точек, плакирующий слой при сварке совершенно не нарушен.



Фиг. 112. Макроснимок, показывающий характерное перекрытие сварочных точек при роликовой сварке дуралюмина.

## 56. Прочность швов алюминиевых сплавов при точечной и роликовой сварке (сравнение с клепкой)

Точечная сварка легких сплавов также нашла применение в изготовлении изделий, подвергающихся механическим усилиям. Роликовую сварку обычно применяют при изготовлении непроницаемых плотных сосудов.

Для конструктора и технолога чрезвычайно важно знать величины прочности сварных швов по сравнению с другими видами соединения деталей. При испытании на разрыв образцов, сваренных точками, результаты прочности не идентичны и кроме других факторов зависят еще от толщины свариваемых листов. У листов толщиной менее 1 мм каждый получается вырыв по всей площади сварной точки. У более толстых листов наблюдается вырывание лишь зоны расплавленного металла. Излом имеет здесь обычно коническую или закругленную форму. При испытании образцов роликовой сварки разрыв происходит обычно по целому металлу или рядом со швом в отожженной зоне.



## Данные сопротивления разрыву сварных точек алюминиевых сплавов

Сплав	Толщина пакета мм	Диаметр сварных точек мм	Разрывная нагрузка на точку кг	Удельное сопротивление на срез кг/мм <sup>2</sup>
Алюминий . . . . .	0,4 + 0,4	3,3—3,8	40—47	4,65—4,12
	1 + 1	4,0—4,5	110—120	8,75—7,5
	1,5 + 1,5	4,5—5,0	125—140	7,8—7,15
	2,0 + 2,0	5,0—5,5	130—150	6,63—6,35
Альмазидиум (2% Si, 1% Mg, остальное Al) . . . . .	0,4 + 0,4	3,3—3,6	70—80	8,15—7,9
	0,75 + 0,75	3,8—4,0	140—155	12,5—12,3
	1,0 + 1,0	4,0—4,3	150—170	12—11,6
	1,5 + 1,5	4,8—5,5	250—300	13,8—12,7
	2,0 + 2,0	5,8—6,0	300—350	13,6—12,35
Дуралюмин . . . . .	0,4 + 0,4	3,3—3,6	80—100	9,3—9,8
	0,75 + 0,75	4,1—4,6	180—220	13,6—13,25
	1,0 + 1,0	4,3—4,8	220—250	15—13,8
	1,5 + 1,5	5,5—6,0	280—350	11,8—12,35
	2,0 + 2,0	6,0—7,0	320—400	11,3—13,3

Примечание. Механические свойства альмазидиума: сопротивление разрыву  $27 \div 30$  кг/мм<sup>2</sup>; условный предел текучести 18 кг/мм<sup>2</sup>; относительное удлинение 18%; твердость  $H_B = 90 \div 100$  кг/мм<sup>2</sup>.

В табл. 35 представлены величины сопротивления разрыву швов, выполненных точечной сваркой, для различных толщин листов чистого алюминия, сплава, имеющего среднюю механическую прочность, и сплава высокой механической прочности. В этой таблице также занесены диаметры сварных точек, соответствующие каждому образцу, так как совершенно очевидно, что разрывная нагрузка на одну точку зависит от сечения сварной точки. Эти данные являются средними величинами, полученными из многочисленных опытов. Что же касается диаметра сварных точек, то они соответствуют требованиям практики.

Графическое изображение механической крепости точечных швов легких сплавов в зависимости от толщины листа показано на фиг. 113. Из этих кривых можно заключить, что для чистого алюминия сопротивление разрыву возрастает гораздо медленнее при увеличении толщины листов, чем для алюминиевых сплавов.

Приводим данные для сравнения между собой прочности швов алюминиевых сплавов, изготовленных точечной сваркой, с клепаными. В табл. 36 сведены результаты испытания листового материала толщиной 1 мм для различных сплавов. Образцы имели или одну сварную точку или одну заклепку. Материал заклепок выбран из одного сплава с листовым материалом. Диаметр заклепки подобран по формуле

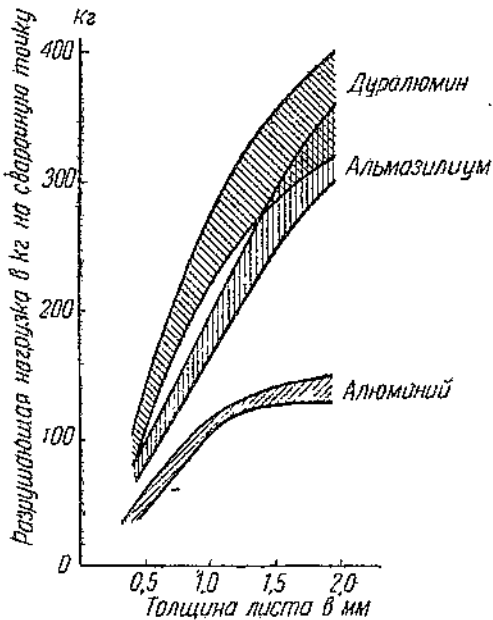
$$D = 1,5S + 2,$$

где  $D$  — диаметр заклепки;  $S$  — толщина листа.

Сопrotивление срезу сварных точек и заклепок для алюминиевых сплавов

Сплав	Сварные точки		Заклепки $\varnothing 3,5$ мм	
	разрывная нагрузка на 1 точку кг	удельное сопротивление на срез кг/мм <sup>2</sup>	разрывная нагрузка на 1 заклепку кг	удельное сопротивление на срез кг/мм <sup>2</sup>
Алюминий . . . . .	110—120	7—8	83—99	6—8
Алмазилиум . . . . .	150—170	12—14	120—130	18—22
Дураллюкс . . . . .	220—250	11—13	230—235	20—25
Дуралюмин . . . . .	220—250	12—14	195—298	25—28

Разрывная нагрузка сварных точек чистого алюминия и сплава алмазилиум, как видно из табл. 36 (со средним сопротивлением), выше, чем у заклепок. Для сплавов с высоким содержанием магния, не подвергавшихся термобработке (дураллюкс), величины сопротивления разрыву почти одинаковы. В случае сплавов, подвергшихся термообработке (дуралюмин), разрывное усилие сварных точек на 15—30% ниже, чем у заклепок.



Фиг. 113. Диаграмма механической прочности точечной сварки листов из алюминиевых сплавов в зависимости от толщины листов и рода материала.

При сравнении прочности точечных швов с заклепочными следует учесть, что нагрузка на разрыв вызывает в заклепке явление среза, а в сварной точке — явление растяжения. Однако, если рассмотреть величины сопротивления разрыву при срезе сварных точек и заклепок по отношению к 1 мм<sup>2</sup> сечения, то окажется, что эти величины приблизительно одинаковы для листов из чистого алюминия. Иначе

ведут себя те алюминиевые сплавы, у которых удельное сопротивление на срез на 40—50% ниже, чем у заклепок. Отсюда вытекает необходимость почти удвоить сечения сварных точек,

работающих на срез. Это не представляет особой трудности, так как предел диаметра точки обуславливается только соображениями коррозии или усталости. Увеличение механической прочности конструкции при точечной сварке может быть достигнуто более близким расположением сварных точек по сравнению с заклепками (в 1,2—1,5 раза). Обычное расстояние между двумя заклепками равно примерно 25—30 мм. Последнее оправдывается только тем, что клепка ослабляет прочность листа высверленными отверстиями, а также тем, что прерывности материала вызывают плохое распределение напряжений. Не так обстоит дело при сварке, где увеличение количества сварных точек повышает прочность соединения и одновременно не связано с большими расходами, как это имеет место при клепке.

Следует учесть, что прочность сварной точки закаленного дуралюмина возрастает по истечении двух-трех дней после сварки на 20—25% по сравнению с прочностью соединения, полученной непосредственно после сварки.

Таблица 37

Опытные данные для сравнения сопротивления срезу клепаных и сварных образцов из алюминиевых сплавов, изготовленных на заводе рабочими средней квалификации

№ п.п.	Вид материала и толщина свариваемых листов	Клепка с нормальной круглой головкой		Клепка вштайп (с вытяжкой)			Сварка на точечной машине 350 кВА „Федераль“		Сварка на точечной машине средней мощности 25—40 кВА (АН-25)	
		Нижний предел сопротивления срезу кг	Верхний предел сопротивления срезу кг	Нижний предел сопротивления срезу кг	Верхний предел сопротивления срезу кг	Нижний предел сопротивления срезу кг	Верхний предел сопротивления срезу кг	Нижний предел сопротивления срезу кг	Верхний предел сопротивления срезу кг	
1	Дуралюмин (Д-3) 0,7 + 0,7 мм	145	184	165	201	130	180	134	153	
2	Д-3 0,7 + 0,7 + 0,7 мм	190	257	250	277	250	390	265	366	
3	Д-3 1,0 + 1,0 мм	203	235	180	230	172	214	155	291	
4	Д-3 1,0 + 1,0 + 1,0 мм	313	379	273	356	300	370	319	373	
5	Д-3 1,5 + 1,5 мм	274	370	268	321	260	370	255	353	
6	Д-3 1,5 + 1,5 + 1,5 мм	474	576	423	503	470	600	341	497	
7	АМЦ 0,8 + 0,8 мм	55	80	—	—	90	100	—	—	
8	АМЦ 0,8 + 0,8 +	—	—	—	—	—	—	—	—	
9	+ 0,8 мм	80	100	—	—	150	170	—	—	
10	АМЦ 1,0 + 1,0 мм	105	125	—	—	120	145	70	85	
11	АМЦ 1,0 + 1,0 мм	100	115	—	—	—	—	—	—	
12	АМЦ 1,5 + 1,5 мм	115	135	—	—	145	170	85	105	
	АМЦ 1,5 + 1,5 + 1,5 мм	185	200	—	—	345	375	—	—	

Примечание. В большинстве испытаний было обнаружено, что образцы, клепанные нормальной заклепкой, разрушались по целому материалу (вырыв); образцы, клепанные вштайп, давали срез заклепки. Образцы, сваренные на машине средней мощности (АН-25), показали вырыв точки, а на машине большой мощности „Федераль“ — срез точки.

Последнее объясняется тем, что на машинах большой мощности давление на электродах довольно велико, поэтому происходит более интенсивное охлаждение и металлы вокруг литой зоны сварной точки не перегрет и имеет структуру основного металла.

В табл. 37 помещены результаты проведенных автором сравнительных испытаний на срез точечной сварки алюминиевых сплавов с клепкой. Испытания производились для двух видов заклепки (с нормальной головкой и впотай) и сварки на двух различных машинах: на отечественной машине средней мощности 25—40 kVA и на американской машине большой мощности 350 kVA.

Сварка и клепка производились рабочими средней квалификации в нормальных заводских условиях.

Каждый опыт повторялся 10 раз и из них был выбран нижний и верхний пределы сопротивления срезу для каждого соединения.

Из этой таблицы мы видим, что сопротивление срезу при сварке алюминиевых сплавов весьма близко к сопротивлению срезу при клепке. Кроме того, сопротивление сварных точек на срез при правильно выбранном режиме на машине средней мощности не уступает сопротивлению на срез точек, сваренных на машине большой мощности.

Таблица 38

Величины сопротивления срезу в зависимости от толщины листов

Сплав	Толщина листа мм	Давление на электроды, кг	Минимальное сопротивление срезу на точку, кг	Расчетное сопротивление срезу на точку, кг	Время сварки
Ал-лед 24-St (плакированный дуралюмин)	0,51	91	73	48	От 0,06 до 0,2 сек.
	0,76	136	110	73	
	1,0	182	148	98	
	1,3	226	182	120	
	1,52	272	218	145	
Сплав 52-SO	0,51	91	43	30	От 0,06 до 0,2 сек.
	0,76	136	66	43	
	1,0	182	86	57	
	1,3	226	109	73	
	1,52	272	132	86	

В табл. 38 даны режимы точечной сварки алюминиевых сплавов, принятые в авиационной промышленности США. При этом рекомендуется принимать величину сопротивления срезу сварной точки в конструкциях из алюминиевых сплавов равной  $\frac{2}{3}$  минимального сопротивления срезу.

При сварке листов неодинаковых толщин из алюминиевых сплавов соотношение между толщинами согласно этой инструкции не должно превышать 1:3. Сопротивление срезу для неодинаковых толщин определяется по толщине меньшего листа.

Как указывалось выше, роликовая сварка для легких сплавов применяется, главным образом, для изготовления плотных неюнифицированных сосудов. Однако представляет интерес выяснить, какова прочность такого шва на разрыв.

В табл. 39 представлены результаты испытания на разрыв сплошных непроницаемых швов из листового материала ( $1 + 1$  мм) сплавов дуралинокса и дуралюмина. Сопротивление разрыву сварного шва для дуралинокса составляет 75—80% сопротивления основного материала. Для дуралюмина сопротивление на разрыв ниже — примерно 50% от основного материала. Полученная разница механической прочности сварного шва для названных сплавов объясняется тем, что свойства дуралинокса почти не меняются от термической обработки, в то время как высокая механическая прочность дуралюмина тесно связана с термической обработкой.

Таблица 39

Сопротивление на разрыв при роликовой сварке легких сплавов

Сплав	Сопротивление на разрыв		Примечание
	основного металла, кг/мм <sup>2</sup>	сварного шва кг/мм <sup>2</sup>	
Дуралинокс {	35—50	27,3	Увеличенная скорость сварки
	35—40	25,2	
	44—44	30,5	
Дуралюмин {	44—44	31,5	
	44—44	20,2	
	44—44	16,5	

В качестве примера возможности применения контактной сварки в авиастроении представляет интерес конструкция, указанная на фиг. 114, — нервюра крыла и его элементы из дуралюмина (толщины  $0,8 + 1$  мм,  $1 + 1$  мм и  $0,8 + 1 + 1$  мм).

57. Сопротивление усталости узлов самолета из дуралюмина

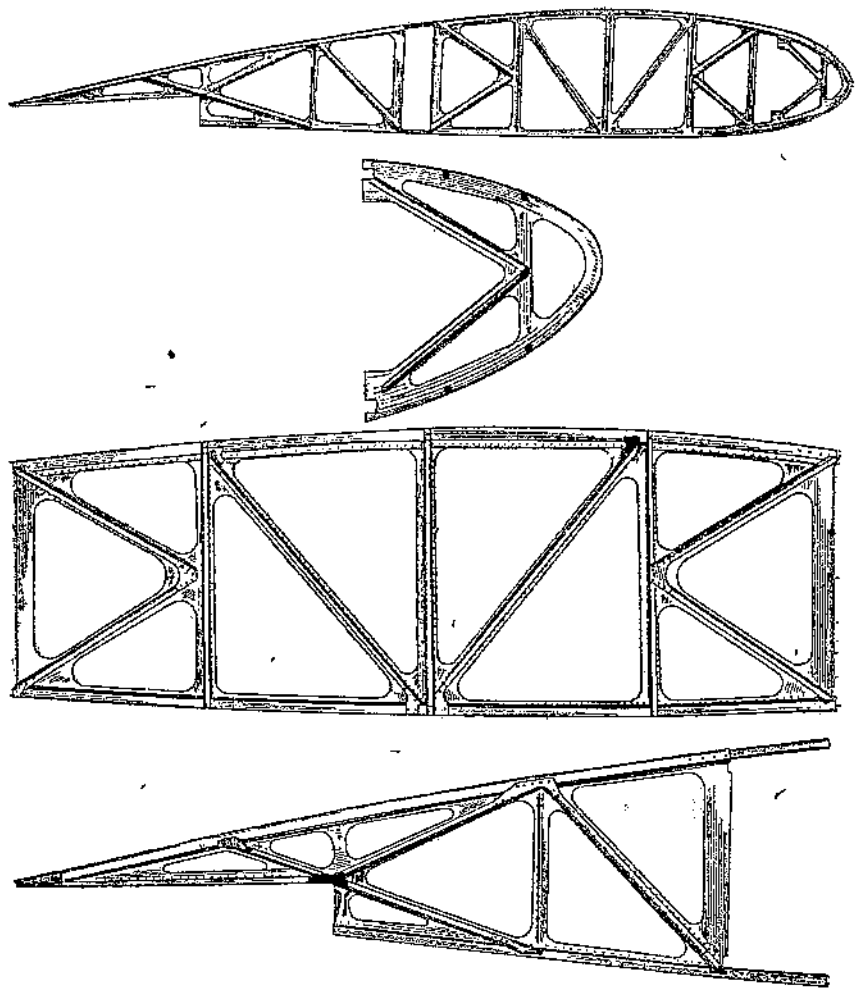
Специфическим условием работы конструктивных деталей самолета является то, что они претерпевают статическую и вибрационную нагрузки. При переводе конструкции из дуралюмина с клепки на точечную сварку возникает вопрос о равнопрочности деталей, выполненных точечной сваркой, с клепаными при вибрационной нагрузке. (Заметим, что испытание на вибрацию называют еще испытанием на усталость. Размерность ее выражается в кг/мм<sup>2</sup>.)

В табл. 40 приведены результаты испытания на усталость дуралюминиевых элементов конструкции самолета. Элементы конструкции толщиной  $0,8 + 0,8$  мм изготовлялись как точечной сваркой, так и заклепкой. Склепывание производилось впотай с вытяжкой (наружная головка заклепки утоплена и не выходит за поверхность листа).

Из таблицы видно, что сварные соединения обладают значительно меньшим сопротивлением усталости, чем клепаные соединения. Эти испытания на усталость проводились в условиях изгиба. Из графы 1, 2 и 3 этой таблицы также видно, что при диаметре заклепки, равном 2,6 мм, сопротивление усталости

в условиях изгиба достигает  $7,5-8 \text{ кг/мм}^2$ . При диаметре заклепки, равном  $4 \text{ мм}$ , сопротивление усталости уменьшается и достигает  $5,5 \text{ кг/мм}^2$ .

Сопротивление усталости в условиях изгиба при точечной сварке тех же конструкций равно  $3, 5, 5,3$  и  $5,5 \text{ кг/мм}^2$ .



Фиг. 114. Сварная конструкция крыла самолета.

Из графы 4 видно, что клепаные узлы этой конструкции показали величины сопротивления усталости  $4,5, 4,6 \text{ кг/мм}^2$ , а сварные —  $3,4 \text{ кг/мм}^2$ . Следует иметь в виду, что испытания на усталость в условиях изгиба (приведенные в табл. 40) производились при наиболее неблагоприятных условиях нагрузки на варную точку; действительно, после испытания на усталость листы оказались оторванными друг от друга. Термин „отрыв“





лучше всего передает понятие разъединения сварной точки без пластической деформации.

При конструировании элементов конструкции следует озаботиться, чтобы точечные швы не работали на отрыв.

Испытание на усталость целых узлов самолета из дуралюмина показало, что сварные точки обеспечивают необходимую прочность узлов. Например, при испытании горизонтального стабилизатора (оперение) самолета в течение 125 час., количестве циклов, равном около 13 000 000, и при двойной амплитуде, равной 3,5 мм на конце стабилизатора, не было обнаружено

Таблица 40

Сравнение пределов усталости элементов конструкции из дуралюмина при точечной сварке и клепке

№ п. п.	Конструкция испытываемых элементов	Клепка		Точечная сварка	
		Диаметр заклепки и количество их в одном элементе	Предел усталости кг/мм <sup>2</sup>	Количество сварных точек	Предел усталости кг/мм <sup>2</sup>
1		Ø 2,6 мм n = 2	8	n = 2	3,0
		Ø 4,0 мм n = 2	5,3	n = 2	5,0 после термообработки
2		—	—	n = 3	5,5
3		Ø 2,6 мм n = 2	7,5	n = 2	5,5
		Ø 4,0 мм	5,5		
4		Ø 2,6 мм n = 2	4,6	n = 2	3,4
		Ø 4,0 мм n = 2	4,5		

никаких повреждений. Дополнительно к этому были проведены испытания на усталость с двойной амплитудой, равной 8 мм на конце стабилизатора, и количеством циклов, равном 2 000 000. В этом случае на верхней и нижней частях стабилизатора были обнаружены после испытания трещины, которые начинались от заклепок и от сварных точек. Термообработка сварных узлов из дуралюмина после сварки повышает сопротивление их на усталость. В этом можно убедиться при сравнении данных графы 1 табл. 40.

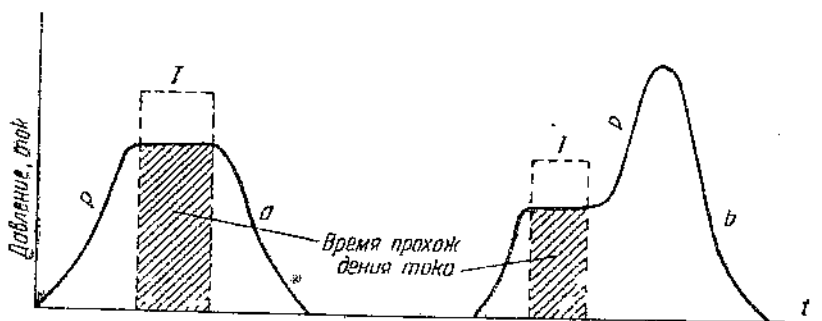
Применение контактной сварки в самолетостроении вполне реально при соблюдении одного важного условия: чтобы наружные поверхности сварных точек имели структуру, не отличающуюся от структуры основного металла. Это условие достигается правильным подбором энергетических и технологических данных (сила тока, давление, время сварки и т. д.).

Глава VII

СВАРОЧНЫЕ МАШИНЫ

58. Механизмы давления сварочных машин

Каждая сварочная машина состоит из трех основных элементов: а) сварочного трансформатора с внешним контуром, б) механизма, осуществляющего давление на электроды, и в) токо-рерывателя.



иг. 115. Диаграмма для точечной сварки: *a* — давление постоянно во время арочного процесса; *b* — давление во время сварки постоянно, после выключения тока повышается для проковки сварной точки.

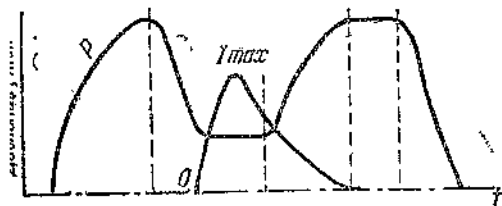
Давление на электроды может быть осуществлено пятью способами: стальной пружиной, сжатым воздухом (пневматическое давление), водой или маслом (гидравлический способ), естественной нагрузкой и комбинированным способом (пневно-механический).

Независимо от конструкции механизма давления, диаграмма давления, приложенного к электродам машины, имеет обычно вид фиг. 115—120. На этих диаграммах даны кривые давления сварочного тока в зависимости от времени. Диаграмма на иг. 115, *a* соответствует режиму точечной сварки, где давление имеет постоянное значение сварочного процесса.

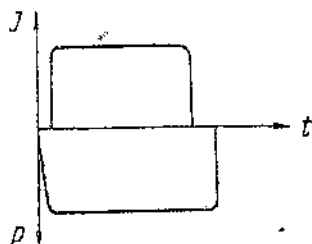


Диаграмма давления на фиг. 115, *b* допускает последующее сжатие деталей после сварки. Такая диаграмма применима для шпиль точечной, многоточечной и рельефной сварки.

Диаграмма фиг. 116 имеет три ступени давления и может быть названа седлообразной кривой давления. Согласно этому профилю сварочный контакт при точечной сварке получает вы-

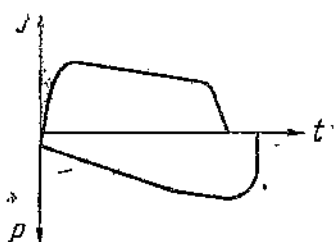


Фиг. 116. Диаграмма тока и давления для точечных машин Sciaky.

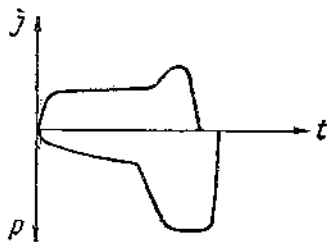


Фиг. 117. Диаграмма тока и давления при роликовой сварке.

соке предварительное давление, в момент сварки давление снижается, и, наконец, после выключения сварочного тока дается высокое давление для проковки полученного соединения. Целесообразность применения такого графика еще недостаточно изучена. Также не изучено, для сварки каких металлов имеется необходимость в подобной седлообразной кривой.



Фиг. 118. Диаграмма тока и давления для машин стыковой сварки.



Фиг. 119. Диаграмма тока и давления машин, предназначенных для автоматической сварки непрерывным оплавлением.

Однако сварочные точечные машины с седлообразной кривой давления изготавливаются и рекомендуются французской фирмой Sciaky.

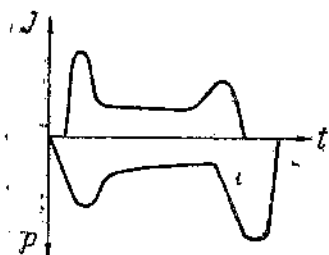
При роликовой сварке давление остается все время постоянным (фиг. 117).

На диаграмме фиг. 118 представлены кривые тока и давления для стыковой сварки без оплавления. При сварке непрерывным плавлением кривые тока и давления имеют вид, показанный на фиг. 119, и при ручной сварке оплавлением — на фиг. 120.

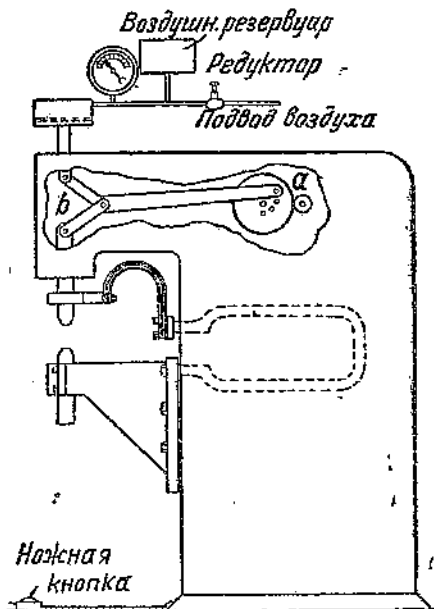
Давление осуществляется пружиной как при ножном управлении для машин малой мощности, так и для машин средней

мощности, но при помощи кулачка, вращающегося от мотора. Недостатком пружинного механизма является трудность определения величины давления, так как это зависит от степени предварительного сжатия ее и от расстояния между контактными поверхностями электродов. Поэтому при небольшом изменении величины свариваемых изделий, а также при постепенном смятии или при заточке поверхности электродов происходит изменение давления.

Давление водой себя не оправдало в связи с большими колебаниями напора воды водопроводной сети и вытеканием воды из цилиндра даже при сравнительно высокой точности его обработки. Давление маслом дало удовлетворительный результат.



Фиг. 120. Диаграмма тока и давления при ручной сварке оплавлением.



Фиг. 121. Схема точечной машины с комбинированным давлением на электродах.

Наиболее распространенным и проверенным на практике является пневматическое давление. Оно позволяет весьма удачно регулировать давление на электроды независимо от толщины свариваемого изделия между электродами. Давление, осуществляемое естественной нагрузкой, производится грузом, размещаемым на верхнем электрододержателе. Этот способ мало распространен. Схематическое изображение пневмо-механического способа давления дано на фиг. 121. При помощи вращающегося эксцентрика *a* приводится в движение ломаный рычаг *b*, который поднимает и опускает электрод. Этот механизм обеспечивает быстрое перемещение верхнего электрода только до тех пор, пока он не приходит в соприкосновение с изделием, затем при минимальном ударе дается давление на электрод от сжатого воздуха. При окончательном выпрямлении ломаного рычага давление на электрод соответствует давлению в цилиндре. Подача тока производится после сжатия деталей. Величина приложен-

го давления устанавливается в зависимости от толщины свариваемых изделий и их физических свойств и лежит в диапазоне от 2 до 10 кг/мм<sup>2</sup> сечения контакта электродов.

### 59. Градуировка давления электродов в сварочных машинах

В сварочных машинах, где давление на электроды осуществляется при помощи пружин, градуировка величины давления производится предварительным перемещением пружины при помощи зажимной гайки, а также изменением расстояния между электродами в разведенном состоянии.

Недостатком такого механизма является трудность определения величины давления. Нормальная эксплуатация сварочных машин немислива, если неизвестен такой важный технологический фактор, как величина давления во время сварки. Метод градуировки производится следующим образом.

На каком-либо мягком материале (медь, алюминий) наносят отпечатки стальным шариком определенного диаметра при помощи пресса. Очевидно, диаметр отпечатка прямо пропорционален величине нагрузки. Измерив диаметр отпечатка при помощи специального микроскопа, легко построить эталонную кривую зависимости диаметра отпечатка от величины нагрузки  $= f(P)$ .

Далее наносят отпечатки на том же материале и тем же стальным шариком при помощи механизма сварочной машины. По диаметру полученного отпечатка определяют величину давления  $P$  для различных положений главной пружины.

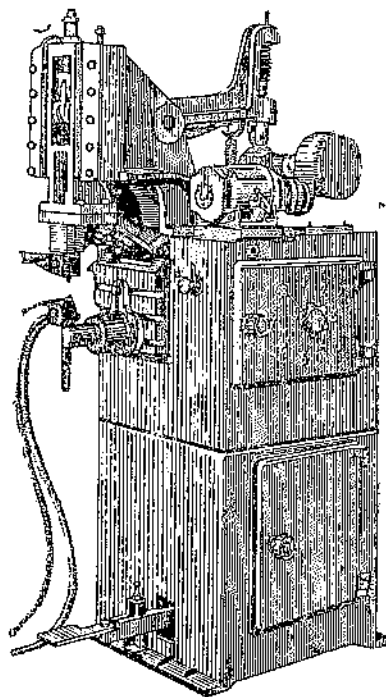
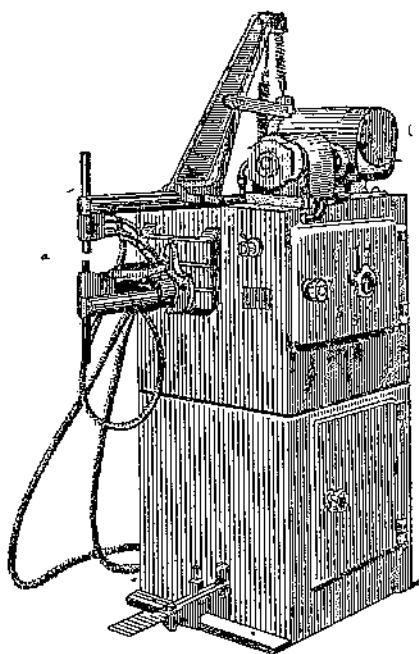
На таких машинах давление меняется еще в зависимости от расстояния между электродами в разведенном состоянии. Поэтому величина раствора электродов должна быть учтена читая от верхнего электрода до поверхности свариваемого сталла). Для каждой машины необходимо будет построить кривую для различных длин пружины и расстояний между электродами.

## А. Точечные машины

### 60. Точечная машина АТА-40

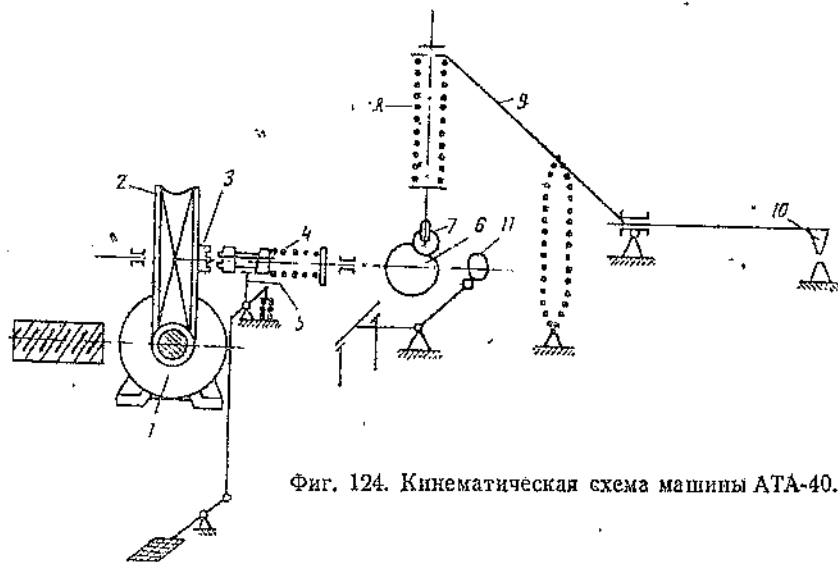
Точечная машина АТА-40 выпускается заводом „Электрик“ радиальным (АТА-40-8, фиг. 122) и вертикальным перемещением верхнего электрода (АТА-40-9, фиг. 123). Машина позволяет производить 60 точек в минуту. Такая скорость является вполне достаточной при автоматической работе.

Кинематическая схема машины с радиальным ходом верхнего электрода показана на фиг. 124. Как видно из этой схемы, перемещение верхнего электрода производится при помощи отора 1, связанного червячной передачей 2 со сцепляющей муфтой 3. Одна половина муфты закреплена неподвижно с червячным колесом, а другая — с главным валом при помощи станочки на скользящей шпонке. Под давлением пружины 4



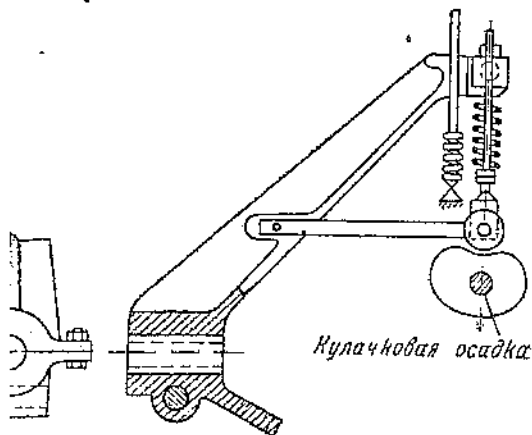
Фиг. 122. Сварочная машина АТА-40-8 с радиальным перемещением верхнего электрода.

Фиг. 123. Сварочная машина АТА-40-9 с параллельным перемещением верхнего электрода.

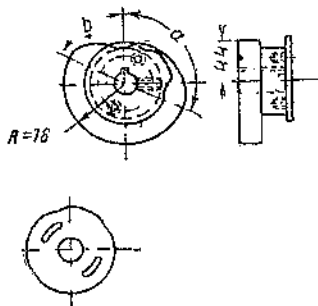


Фиг. 124. Кинематическая схема машины АТА-40.

правая часть муфты стремится войти в зацепление с левой головной. Этому препятствует палец 5, входящий в профильную канавку правой половины муфты. На главном валу укреплены



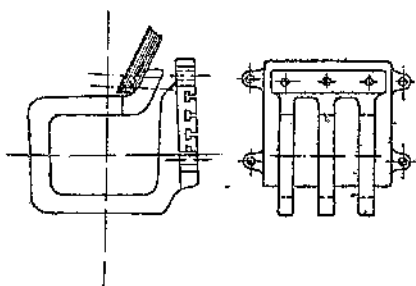
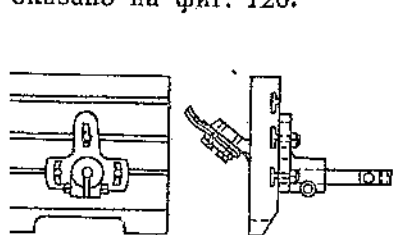
на шпонках два кулачка. Кулачок 6 для сжатия воздействует при своем вращении на ролик 7 и сообщает ему прямоли-



Фиг. 125. Верхний качающийся рычаг машины АТА-40.

Фиг. 126. Кулачок осадки и включения тока машины АТА-40.

нейное движение через пружину 8. Далее через качающийся рычаг 9 движение передается на верхний электрододержатель 10. Более подробно конструкция представлена на фиг. 125. Вторым кулачком 11 служит для включения и выключения обмотки сварочного аппарата. Конструктивное исполнение кулачка осадки показано на фиг. 126.



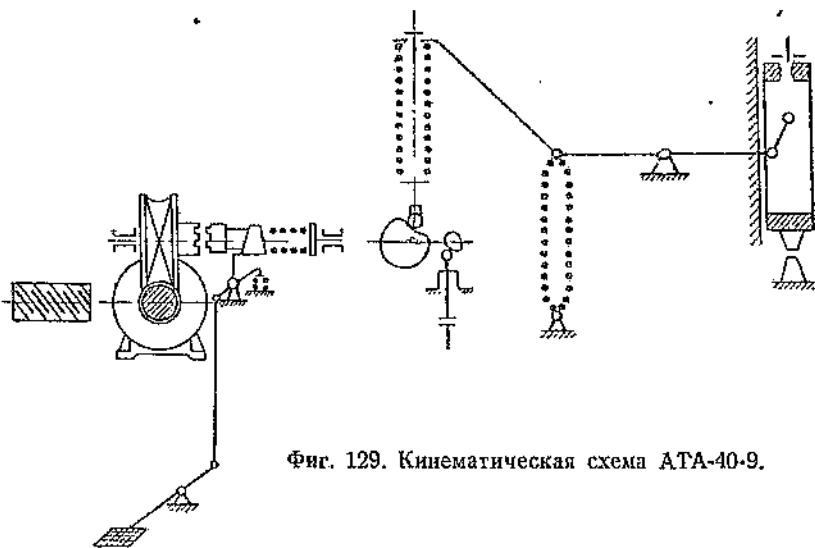
Фиг. 127. Нижняя контактная плита машины АТА-40.

Фиг. 128. Вторичная обмотка, отлитая вместе с контактной плитой.

Продолжительность включения сварочного тока регулируется при помощи сдвига относительно друг друга пластин различного профиля. Регулирование давления осуществляется натяжением пружины 8 при помощи гаек. Нижний электрододержатель крепится на контактной плите (фиг. 127), плитой из алюминиевой бронзы. Крепление производится специальным переставном зажиме, позволяющем переставлять электрододержатель во все стороны и поворачивать его на

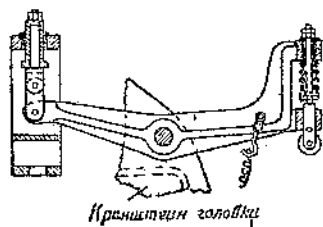
некоторый угол вокруг оси. Один конец вторичной обмотки крепится к плите с задней стороны.

Нижняя педаль машины АТА-40 служит для сцепления и расцепления муфты. Если педаль оставить нажатой, то верхний электрод производит последовательные движения вверх и вниз со скоростью одного сварочного цикла в секунду. Время сварки регулируется в пределах от 0,12 до 0,25 сек. В машинах подобной мощности фирма Тейлор-Винфельд изготавливает вторичный



Фиг. 129. Кинематическая схема АТА-40-9.

виток, у которого токоподводящая плита представляет одно целое с витком. Эскиз такого вторичного витка для машин в 35 kVA дан на фиг. 128. Как видно из второй проекции, вторичная обмотка состоит из трех параллельных витков (для лучшего охлаждения), соединенных между собой. При такой конструкции обмотки уменьшается количество постоянных контактов, что влечет в свою очередь к повышению полезной мощности. Фирма изготавливает вторичную обмотку вместе с плитой из литой красной меди. Машина АТА-40 имеет восемь ступеней регулировки мощности. Распределение вторичного напряжения видно из табл. 41.



Фиг. 130. Верхний рычаг машины АТА-40-9.

Таблица 41

Распределение вторичного напряжения машины АТА-40

Ступень	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Напряжение V	2,62	3,06	3,65	4,04	4,52	5,13	5,93	6,9

Остальные технические данные машины типа АТА-40 приведены в табл. 42.

Машина с параллельно-вертикальным перемещением верхнего электрода АТА-40-9 была показана на фиг. 123, а на фиг. 129 — иная техническая схема. Этот тип машин рекомендуется для олее тяжелых работ, где требуется повышенное давление при варке. Конструкция верхнего рычага машины АТА-40-9 представлена на фиг. 130.

Таблица 42

Техническая характеристика сварочных точечных машин завода „Электрик“

Элементы характеристики	Тип машины				
	АТ-5	АТ-10	АТА-40	АТА-175	
габариты:					
высота, мм . . . . .	490	1075	1750	2120	
ширина, мм . . . . .	330	520	690	764	
глубина, мм . . . . .	631	820	1040	1930	
вес машины, кг . . . . .	120	300	720	—	
Мощность электродвигателя, кВт . . . . .	—	—	0,52	1,3	
раствор электродов, мм . . . . .	90	125	150	55	
рабочий ход электродов, мм . . . . .	15	25	40	45	
расход охлаждающей воды, л/час . . . . .	30	120	300	500	
формальная длина вылета, мм . . . . .	200	300	400 <sup>1</sup>	650	
число ступеней мощности . . . . .	4	4	8	8	
Максимальное давление, кг	70	100	150—180	1200	
режим:					
п. к. р., % . . . . .	25	30	12,5	12,5	
мощность, кВА . . . . .	5	10	40	175	
непрерывная работа {	толщина, мм . . . . .	1 + 1	2 + 2	2 + 2	5 + 5
первичное напряжение, U <sub>1</sub>	220—380	220—380	380	380	
продолжительная мощность кВА . . . . .	—	—	18 <sup>2</sup>	70 <sup>3</sup>	

### 61. Точечная машина АТА-175

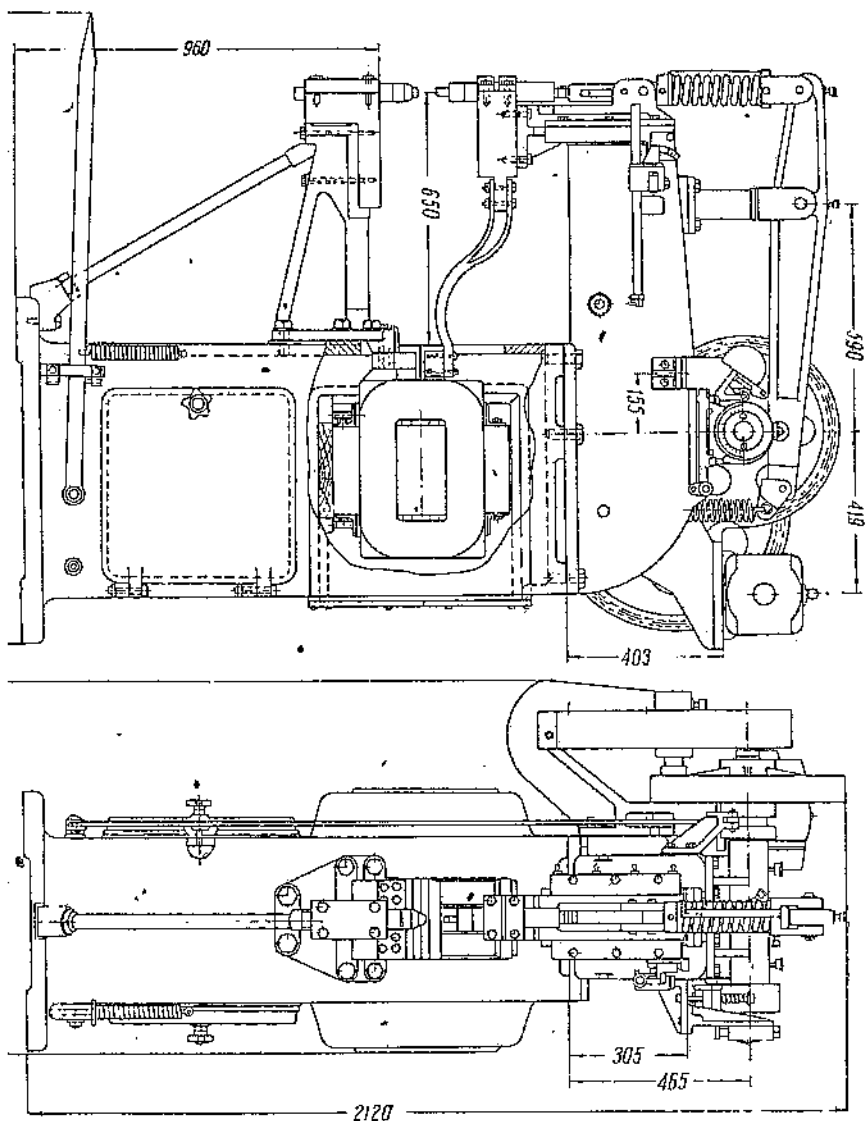
Эта машина обладает мощностью 175 кВА при п. к. р. 12,5% и 70 кВА продолжительной мощности. Давление между электродами достигает 1200 кг. Такая машина может сваривать изделия из мягкой стали суммарной толщиной 10 мм. Она также применима для сварки алюминиевых сплавов при условии включения специального прерывателя для точной дозировки сварочного тока. Общий вид машины представлен на фиг. 131.

<sup>1</sup> Для машин с радиальным ходом. Для машин с вертикальным ходом 200 мм.

<sup>2</sup> Сечение подводящих проводов 16 мм<sup>2</sup>.

<sup>3</sup> Сечение подводящих проводов 95 мм<sup>2</sup>.

Как видно из схемы (фиг. 132), переключение ступеней производится двумя переключателями. Коммутация тока производится здесь контактором через вспомогательный контактор и кулачок. Мотор пускается в ход через пускатель, имеющий термическое реле.



фиг. 131. Общий вид машины АТА-175.

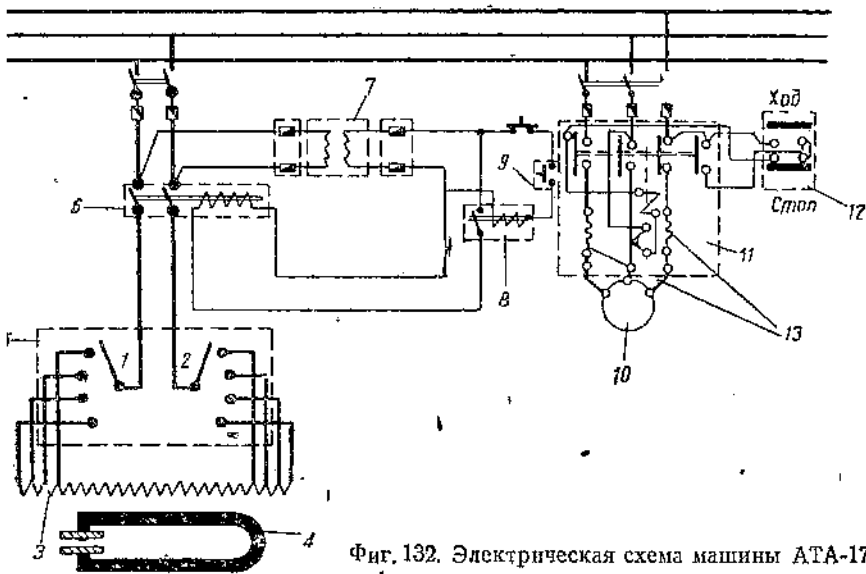
Переключением рубильников 1 и 2 подбирают необходимую ступень мощности. В табл. 56 дано распределение торичного напряжения холостого хода машины АТА-175 по ступеням.



Распределение вторичного напряжения машины АТА-175

Ступень	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
напряжение, В . . . .	3,95	4,26	4,58	5,18	5,58	6,22	7,15	8,25

Как видно из схемы (фиг. 133), давление на электроды осуществляется пружиной. Мотор 1, приводящий в движение авный вал, имеет мощность 1,3 кВт при 940 об/мин. От тора через зубчатую передачу 2 вращение передается через соединительную муфту 3 на главный вал 4. От основного кулачка 5, репленного на главном валу, через рычаг 6 и пружину 7



Фиг. 132. Электрическая схема машины АТА-175.

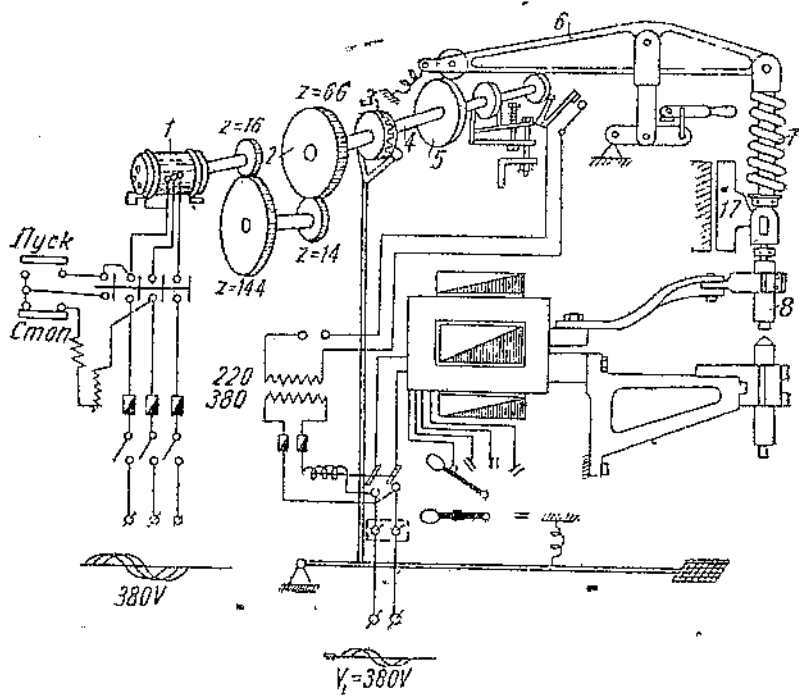
2 — переключатель регулировочного устройства; 3 — первичная обмотка трансформатора; 4 — вторичная цепь трансформатора; 5 — переключатель ступеней; 6 — главный контактор; 7 — вспомогательный трансформатор; 8 — вспомогательный контактор; 9 — выключатель; 10 — электрод; 11 — пускатель; 12 — кнопка пускателя; 13 — термическое реле.

передается движение и давление верхнему электроду 8. Число оборотов вала, а следовательно, и кулачков, достигает 30 об/мин. Продолжительность одного сварочного цикла равна 2 сек. при максимальном времени сварки 0,9 сек.

Мотор и шестеренки вращаются вхолостую до тех пор, пока не нажата ножная педаль. При нажатии педали происходит сцепление муфты, и если оставить педаль в таком положении, то верхний электрод будет перемещаться автоматически, и соответственно с этим будет протекать сварочный ток при

каждом замыкании цепи. В случае необходимости сварки отдельными точками ножную педаль следует после нажатия тотчас отпустить для расцепления основной муфты.

Сварочный трансформатор взят броневое типа. Первичная обмотка (дисковая) состоит из пяти катушек. Вторичный виток состоит из четырех дисков, соединенных параллельно и расположенных между первичными катушками. Диски вторичной обмотки отливаются из алюминия толщиной 25 мм. Внутри каждого диска заложена медная трубка  $d = 14$  мм для водяного охлаждения.



Фиг. 133. Кинематическая схема машины АТА-175.

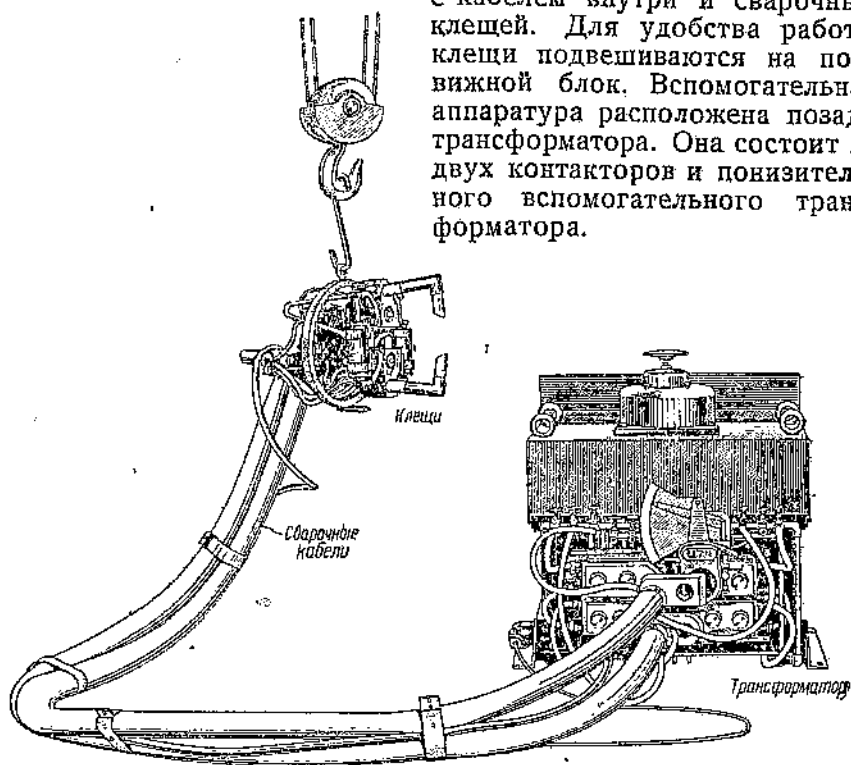
Такое переплетение первичных и вторичных витков способствует уменьшению внутреннего рассеяния, а также некоторому охлаждению первичной обмотки (через вторичную).

Включение и выключение сварочного тока производится на этой машине контактором. Включается ток через вспомогательный контактор и регулируется специальным кулачком, сидящим на главном валу. Технические данные машины АТА-175 даны в табл. 42.

Кроме рассмотренных выше машин завод „Электрик“ выпускает еще другие точечные машины различных мощностей (например, АТ-5 АТ-10, АТА-100 и др.), которые здесь не рассматриваются.

## 62. Сварочная установка с переносными клещами на 200 kVA

а) Сварочный трансформатор. Фирма AEG изготовляет сварочные установки на 200 kVA максимальной мощности. Установка (фиг. 134) состоит из трансформатора (продолжительной мощности в 100 kVA, максимальной — 200 kVA), гибкого шланга с кабелем внутри и сварочных клещей. Для удобства работы клещи подвешиваются на подвижной блок. Вспомогательная аппаратура расположена позади трансформатора. Она состоит из двух контакторов и повысительного вспомогательного трансформатора.

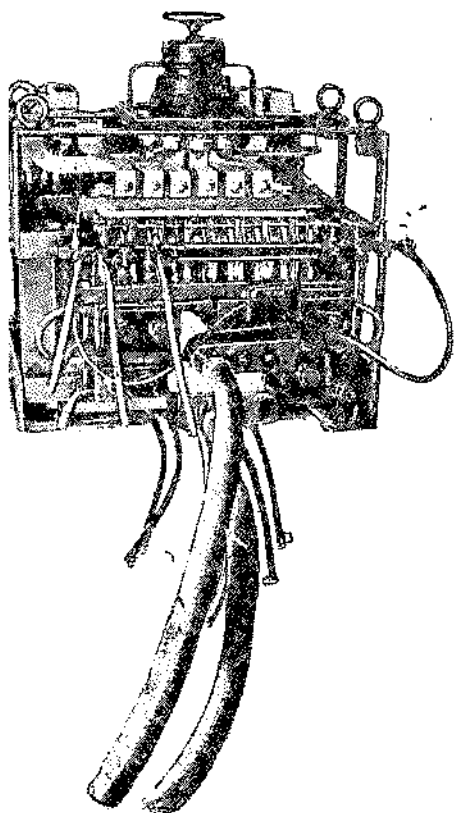


иг. 134. Установка на 200 kVA с переносными клещами для точечной сварки.

Сварочный трансформатор имеет следующие данные:  $U_1 = 220 \text{ V}$ ,  $U_2 = 12-20 \text{ V}$ ,  $I_1 = 910 \text{ A}$ ,  $I_2 = 11\,600 \text{ A}$  (по коэффициенту трансформации),  $P_{\text{max}} = 200 \text{ kVA}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$ .

Обмотки трансформатора дисковые и расположены на стержневом сердечнике (фиг. 135). Первичная обмотка разделена на секции для пяти ступеней регулировки. Отводы от первичной обмотки в виде полос соединены с переключателем. Переключатель здесь установлен скользящего типа и каждый раз после становки на какую-либо ступень контакт прижимают при помощи винта, смонтированного на переключателе.

Вторичная обмотка имеет два витка из литой красной меди, охлаждаемые внутри циркулирующей водой. Оба витка вторичной обмотки соединены последовательно снаружи пластиной из красной меди. В случае необходимости оба витка можно соединить параллельно. Вторичная обмотка имеет три пары пусковых отверстий, позволяющих одновременно работать на всех клещах параллельно.



Фиг. 135. Трансформатор агрегата на 200 kVA.

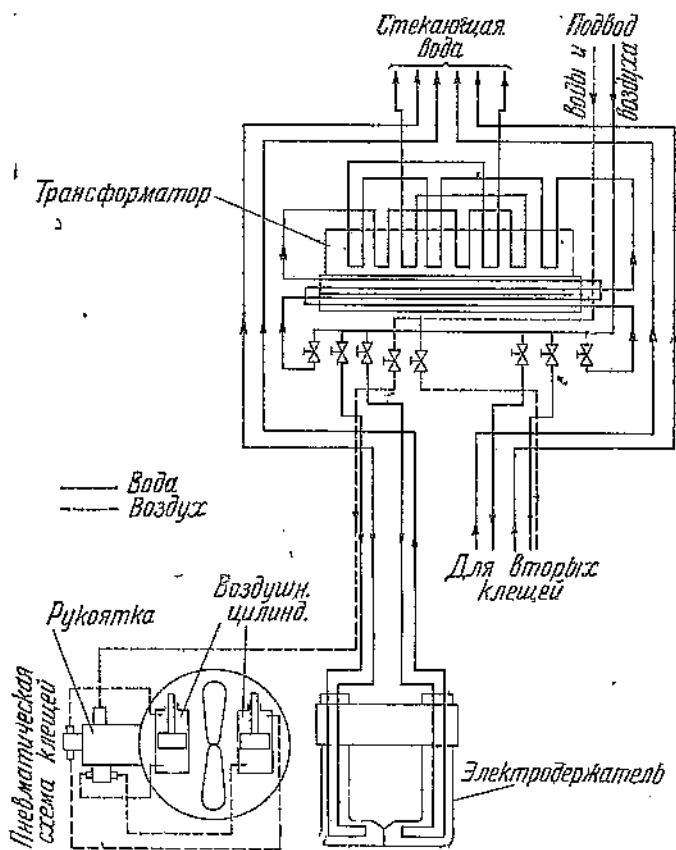
Токоведущие кабели внешнего контура расположены в резиновых шлангах. В каждом шланге имеется три гибких кабеля, скрученных в один общий кабель сечением 700 мм<sup>2</sup>. Внутри кабеля расположена трубка, куда поступает циркулирующая вода и выходит обратно по шлангу, омывая наружную сторону кабеля. Присоединение кабелей к вторичной обмотке производится круглыми коническими стержнями, которые затягиваются гайками позади прилива. Длина кабеля 4 м. Тонкие резиновые трубки присоединяются к металлическим трубкам, в которых циркулирует вода. Схема циркуляции воды и воздуха показана на фиг. 136.

б) Клещи. Переносные клещи (фиг. 137) имеют два воздушных цилиндра и электрододержатели со сварочными электродами. С задней стороны клещей имеется два медных массивных наконечника, к которым присоединяются кабели от вторичной обмотки,

рукоятка с рычажной кнопкой. Указанные элементы, составляющие сварочные клещи, вмонтированы в распорное кольцо, расположенное в нем на роликах. Кольцо обычно находится в подвешенном состоянии, а клещи в этом кольце могут быть вернуты на любой угол вокруг горизонтальной оси.

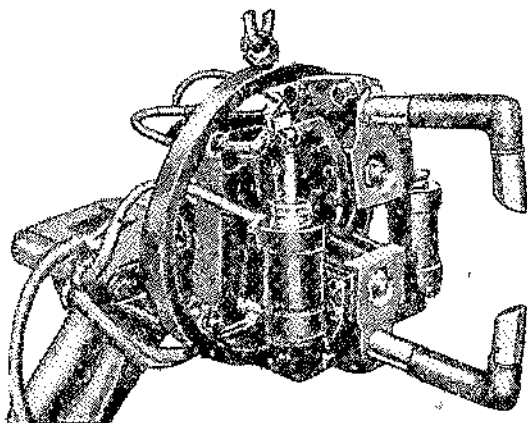
Данные электрододержателей: наружный диаметр 35 мм; максимальный вылет 180 мм, минимальный 130 мм, наибольшее состояние между электродами в открытом положении 60 мм. Диаметр поршня каждого цилиндра 55 мм. Длина хода поршня

на 57 мм. Цилиндры соединены между собой параллельно, поэтому давление на электроды складывается из суммы давлений обоих цилиндров. При нажатии рычажной кнопки включается первая воздушная сеть, а при дальнейшем нажатии — электрическая цепь.

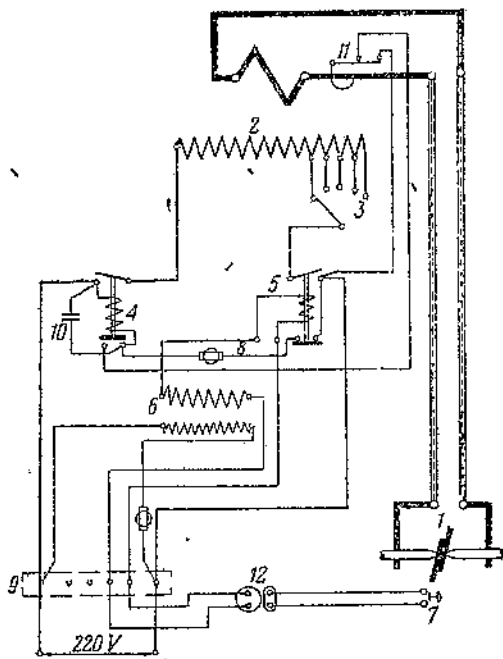


Фиг. 136. Схема подачи сжатого воздуха к цилиндрам клемм и охлаждающей воды к трансформатору и внешнему контуру.

в) Электрическая схема включения. Электрическая схема соединения сварочной установки с переносными клеммами дана на фиг. 138. После присоединения установки к сети включается контактор 4. Катушка электромагнита контактора 5 питается током от понизительного трансформатора 6 и включается кнопкой 7. Как только кнопка 7 (в рукоятке клемм) будет замкнута и электроды зажмут сварочную деталь, ожигается электромагнит и включает контактор 5. После включения контактора 5 начинается сварка. На вторичном витке сварочного



Фиг. 137. Сварочные клещи.



Фиг. 138. Электрическая схема установки на 200 kVA с переносными клещами.

1 — сварочные клещи; 2 — сварочный трансформатор; 3 — переключатель ступеней; 4, 5 — контакторы; 6 — вспомогательный трансформатор; 7 — выключающая кнопка; 8 — предохранитель; 9 — клеммовая доска; 10 — конденсатор; 11 — электромагнитный прерыватель; 12 — штепсель.

трансформатора установлено магнитное реле 11, которое выключает обмотку контактора 4 и тем самым размыкает сварочную цепь.

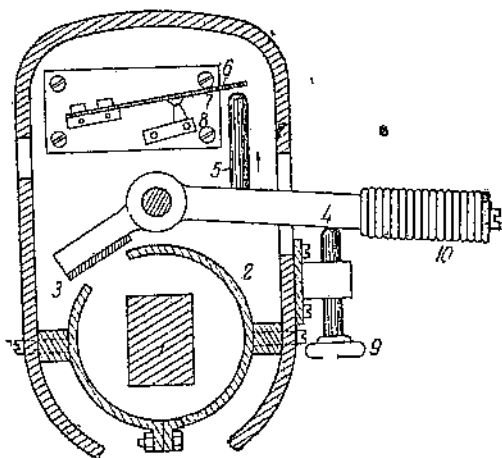
Как только сварка прекратится, кнопка 7 освобождается, благодаря чему снимается давление; электроды расходятся и одновременно отключается контактор 5, а вспомогательные (нижние) контакты контактора 5 включаются. Далее, с прекращением сварки, контакты реле 11 (фиг. 138) вновь замкнутся (как это видно из фиг. 139), благодаря чему контактор 4 вновь включится, и вся установка снова будет готова к следующей сварке.

Реле (фиг. 139) является довольно примитивным. Принцип действия его следующий: вокруг шины вторичной обмотки 1 (фиг. 139) надето стальное кольцо шириной около 1 см, которое намагничивается при прохождении тока и притягивает якорек 3. Латунный рычаг 4 поворачивается, и изолированный стержень 5 отводит плоскую пружину 6 вверх, размыкая тем самым контакты 7—8. Реле срабатывает не сразу, а через небольшой промежуток времени, регули-

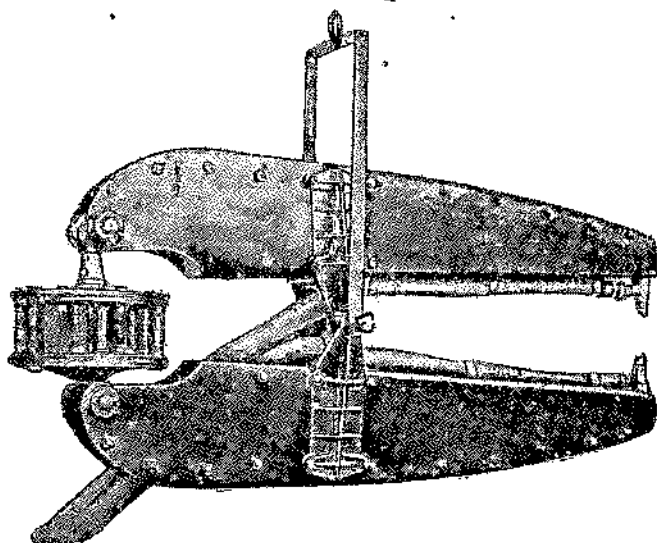
уемый, правда, в очень малых пределах, но достаточный при варке сталей. Регулировка производится стопорным винтом 9 (съемными шайбами 10). Все устройство заключено в алюминиевый кожух.

При сварке материалов больших толщин может оказаться более удобным работать без реле, а включение и выключение тока производить от руки кнопкой 7.

По своей мощности указанная установка допускает сварку сталей суммарной толщиной  $\pm 4$  мм. Однако величина давления на электроды не позволяет сваривать такие толщины. Имеющийся запас мощности трансформатора может быть использован для параллельной работы на двух или трех клещах или же работать с более длинными кабелями (7—10 м).



Фиг. 139. Электромагнитное реле, расположенное на шине вторичного витка.



Фиг. 140. Клещи для точечной сварки с вылетом около 1 м фирмы SBF.

Для сварки алюминиевых сплавов указанная установка годится только при условии применения дополнительного токопрерывателя с точной дозировкой времени сварки.

Клещи с более глубоким вылетом показаны на фиг. 140. Перемещение электродов — радиальное, давление осуществляется от воздушного цилиндра 1. Подобные клещи применяются при сварке больших листов, например, для обшивки вагонов и т. п.

## Б. Роликовые машины

### 63. Роликовая машина АШ-20

К роликовым машинам малой мощности относятся типы АШ-10, АШ-20 и др.

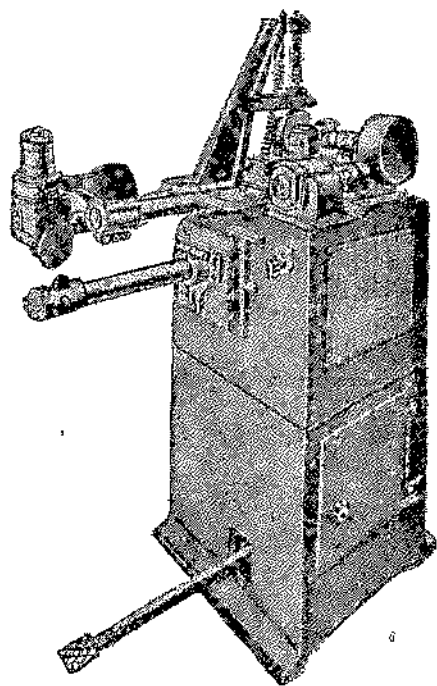
В конструктивном отношении машины АШ-10 и АШ-20 одинаковы. Вид машины АШ-20 представлен на фиг. 141. Этот тип машин характеризуется тем, что вращение верхнего ролика производится отдельным моторчиком 0,06 kVA через редуктор, укрепленный непосредственно у верхнего ролика. Нижний ролик имеет свободное вращение.

Каждая машина применима как для продольной, так и для поперечной сварки благодаря дополнительным приспособлениям. Электрическая схема включения этих машин представлена на фиг. 142. Напряжение вторичной цепи при холостом ходе распределяется по восьми ступеням согласно табл. 44.

Первичная цепь сварочного трансформатора включается при помощи контактора, укрепленного на нижней дверце. Электромагнитная катушка этого контактора включается при помощи кулачка, посаженного на главный вал привода. Изменение скорости

сварки достигается при помощи перестановки сменных шестерен в редукторе, позволяющей получить следующие скорости: 0,65, 1,12, 1,99 и 3,4 м/мин. Нижний рукав, а также колодки и ролики охлаждаются водой.

При нажатии ножной педали муфта соединяет нажимной кулачок с вращающейся частью вала. Давление на электроды осуществляется при помощи пружины, сила сжатия которой регулируется гайками. Полные технические данные приведены в табл. 40.



Фиг. 141. Роликовая машина малой мощности АШ-20.

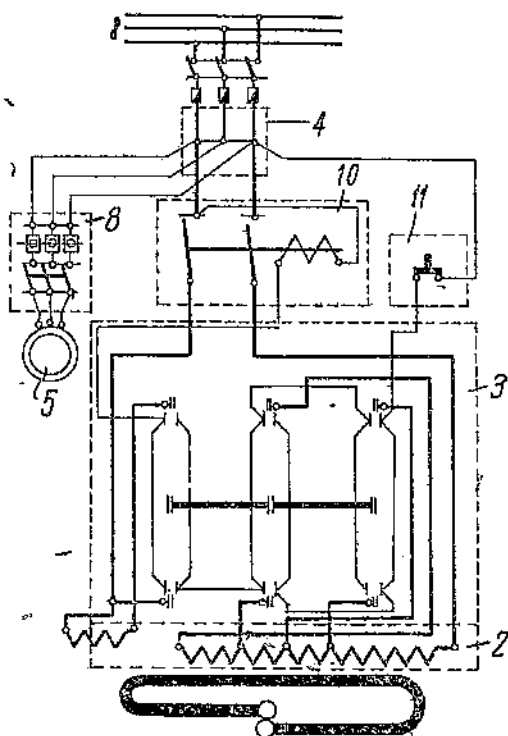


## Распределение вторичного напряжения по отдельным ступеням

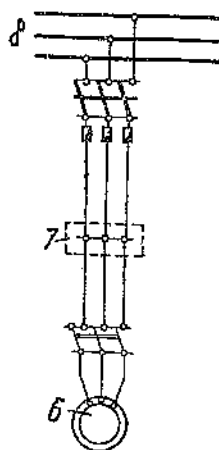
Тип	Ступень	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
	Положение ножей	1—I	1—II	1—III	1—IV	2—I	2—II	2—III	2—IV
П-10	Напряжение, V	2,11	2,24	2,35	2,50	2,65	2,85	3,05	3,28
П-20	Напряжение, V	2,44	2,65	2,89	3,14	3,55	4,00	4,58	5,23

## 64. Роликовая машина АШ-50

Роликовая машина АШ-50 применяется для сварки поперечных и продольных швов. На фиг. 143 представлен эскиз этой машины. Глубина вылета электрододержателей равна 400 мм. При продольной сварке цилиндров наибольшая длина шва может быть равной 800 мм, имея в виду возможность перевертывания цилиндра.



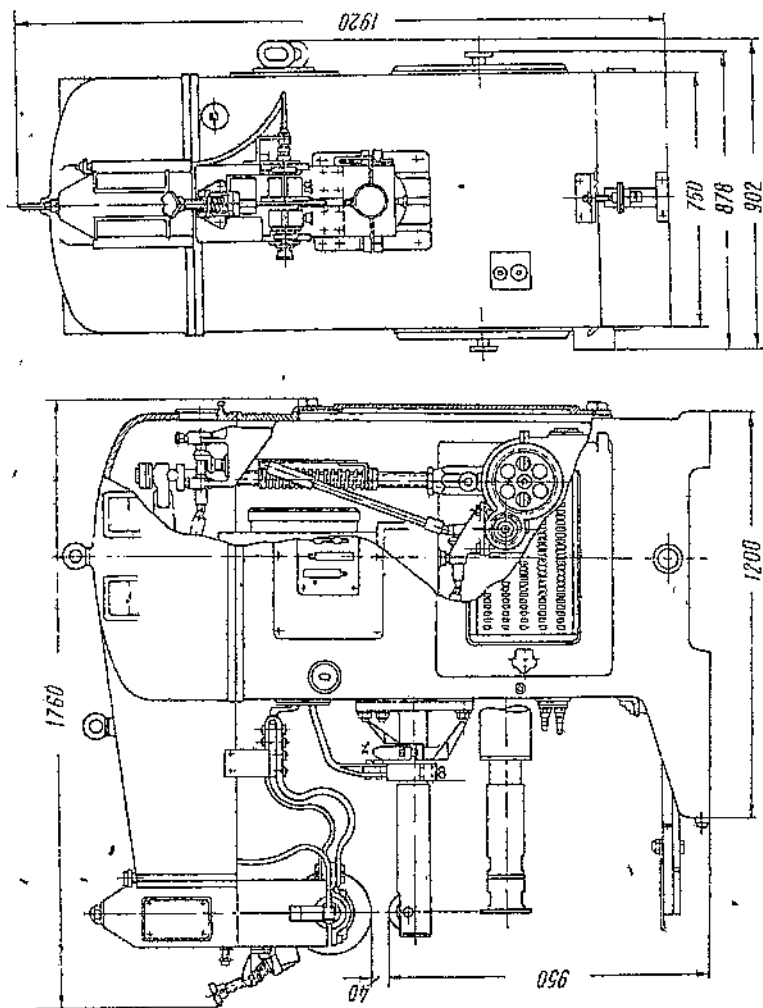
Фиг. 142. Схема роликовых машин АШ-10 и АШ-20  
3 — ступени переключения мощности.



Диаметры свариваемых цилиндров продольным или поперечным швом зависят здесь от диаметра нижнего ролика. Наибольший диаметр цилиндра, который может быть сварен на этой машине, равен 160 мм.

В табл. 45 занесены все технические данные машины АШ-50. Скорость сварки лежит в пределе 0,8—4,7 м/мин.

Электрическая схема. В машину встроены броневой трансформатор с дисковой обмоткой. Вторичный виток трансформатора литой с водяным охлаждением.



Фиг. 143. Общий вид машины АШ-50.

Переключение ступеней регулирования мощности трансформатора производится в первичной обмотке при помощи рубящего переключателя, трансформатор имеет восемь ступеней регулирования.

Вторичное напряжение лежит в пределе 2—4,5.

Электро-кинематическая схема машины представлена на фиг. 144.

## Техническая характеристика роликовых сварочных машин завода „Электрик“

Элементы характеристики	Тип машины			
	АЩ-10	АЩ-20	АЩ-50	АЩ-150
Первичное напряжение, V . . . . .	220, 380	220, 380	220, 380	380
Продолжительная мощность, kVA . . . . .	—	—	—	100
Вторно-кратковременный режим:				
п. к. р., % . . . . .	60	60	60	50
мощность, kVA . . . . .	10	20	50	150
суммарная толщина, мм . . . . .	2	3	4	4
скорость сварки, м/мин . . . . .	0,65—3,4	0,65—3,4	0,8—4,7	1,33
Число ступеней регулировки . . . . .	8	8	8	16
Расход охлаждающей воды, л/час . . . . .	200	350	375	1000
Полезный вылет, мм . . . . .	400	400	400	360
Рабочий ход электрода, мм . . . . .	35	35	40	25
Мощность мотора привода, kW . . . . .	0,06	0,06	1,3	1,3
Мощность мотора прерывателя, kW . . . . .	0,52	0,52	—	0,52
Вес машины, кг . . . . .	700	800	1200	—
Высота, мм . . . . .	1700	1750	1920	—
Ширина, мм . . . . .	640	730	902	—
Глубина, мм . . . . .	1200	1300	1760	—

Приключение машины к сети производится контактором, управляемым механическим выключателем. Последний в свою очередь управляется кулачком 11, укрепленным на эксцентрике 2 винтами.

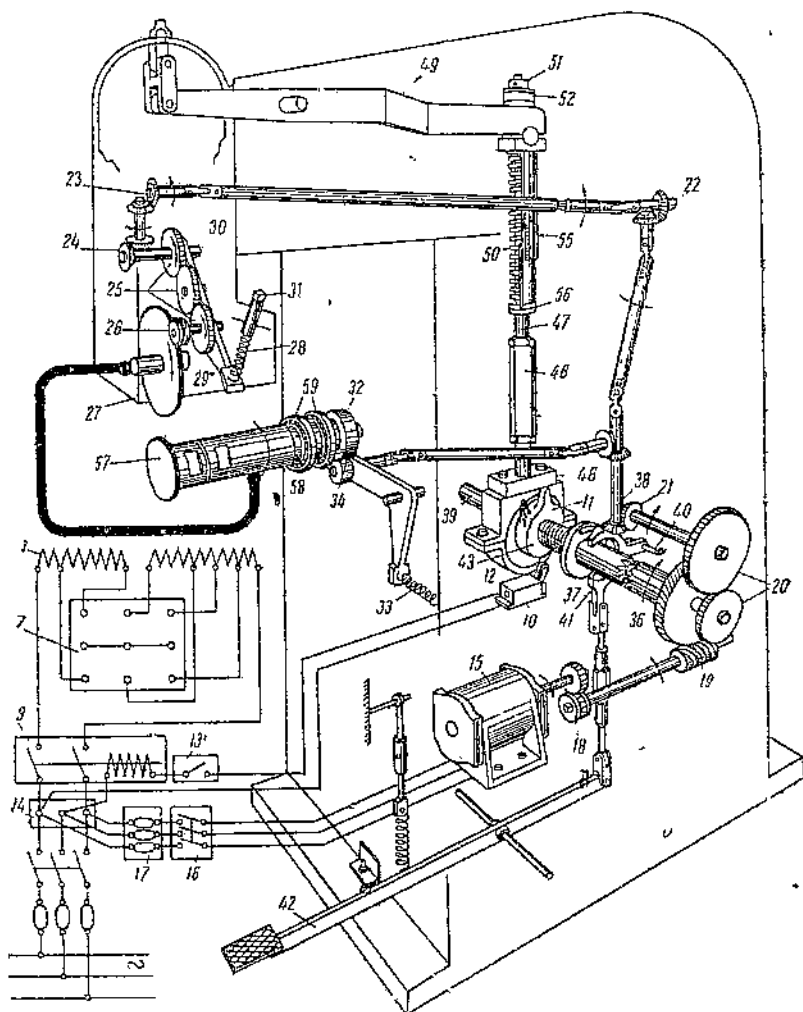
Продолжительность включения и выключения регулируется кулачком, имеющем раздвижные пластины с прорезами. В таком виде машина АЩ-50 может быть использована для непрерывной роликовой сварки. При сварке прерывистым швом необходимо еще включить в первичную обмотку трансформатора токопрерыватель. Электромотор 15 включается от трехфазного рубильника 16 через предохранители 17.

Кинематическая схема. При поперечной сварке имеет место принудительное вращение обоих сварочных роликов 27—57. При продольной сварке принудительно вращается лишь верхний ролик. Вращение роликов, а также давление верхнего ролика на нижний, осуществляется при помощи электродвигателя 15. Принудительное вращение верхнего ролика осуществляется от мотора 15 через пару цилиндрических колес 18, редуктор 19, шестерни 20, четыре пары конических колес 21, 22, 23, 24 и три цилиндрических 25 и через рифленый стальной ролик 26. Пружина 28 прижимает стальной ролик к медному ролику 27.

Принудительное вращение нижнего ролика 57 для поперечной сварки получается от того же двигателя 15 через систему конических колес, карданный вал и чугунный ролик 34. Нижний чугунный ролик 34 прижат ко второму чугунному ролику 32

ружиной 33. Через эту фрикционную передачу осуществляется принудительное вращение нижнего ролика 57.

Устройство механизма давления. Давление верхнего ролика осуществляется пружиной 50 при помощи кулачко-



Фиг. 144. Электрокинематическая схема машины АШ-50.

го механизма. Кулачок давления посажен на вал 37. Муфтой 40 соединяются валы 36 и 37. Сцепление и расцепление уфты производится вилкой 41. Положение вилки зависит от положения педали 42. При нажатии педали поднимается верхний выступ вилки и освобождает полумуфту 37, которая под действием пружины 43 сцепляется с полумуфтой 36 и заставляет вращаться вал 37—39. Нижний выступ вилки при

этом прижимается к полумуфте снизу. Поэтому клин 38 полумуфты, повернувшись на полоборота, набегает на него и заставляет полумуфту выйти из зацепления, и вал 37—39 останавливается.

Нажимной эксцентрик 12 посажен на вал 39. Когда вал 39 вращается, то шток 47 поднимается или опускается. При нажатии педали эксцентрик поднимает шток и через пружину правый конец хобота 49, а противоположный конец его опускается вниз. Левый конец хобота соединен серьгой с ползунком 53 и с коробкой 54, в которой помещен верхний ролик 27. Следовательно при нажатии педали начинает опускаться верхний ролик до соприкосновения с нижним роликом. Дальнейший подъем эксцентрика вызывает сжатие пружины, которая передает давление на верхний ролик. Величина давления зависит от степени сжатия пружины. Оно регулируется стяжной гайкой 56. Когда эксцентрик приходит в наивысшее положение, он останавливается. На эксцентрике укреплен кулачок 11, включающий и выключающий контакт обмотки контактора. Кулачок вращается вместе с эксцентриком и включает контактор только тогда, когда эксцентрик остановился и на роликах имеется полное давление.

При опускании педали весь цикл включения и выключения полумуфт 36—37 происходит в обратном порядке, эксцентрик снова начинает вращаться, сварочный ток выключается и верхний ролик 27 поднимается в первоначальное положение, а эксцентрик занимает нижнее положение.

Верхний ролик имеет устройство, позволяющее ему поворачиваться на  $360^\circ$ .

## 65. Роликовая машина фирмы Тейлор-Винфельд на 300 kVA

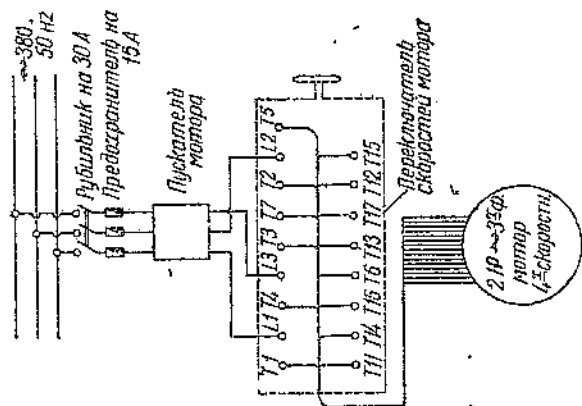
Рассматриваемая машина Тейлор-Винфельд для роликовой сварки имеет максимальную мощность 300 kVA (фиг. 145). Машина имеет два трансформатора: сварочный и автотрансформатор, помещенные в одном корпусе. Автотрансформатор позволяет регулировать мощность сварки по 25 ( $5 \times 5$ ) ступеням.

Первичное напряжение  $U_1 = 380$  V. Вторичное напряжение меняется по 25 ступеням, начиная от 2 до 9 V. Индукция и ток холостого хода трансформатора для предпоследней ступени мощности равны  $B = 13\,000$  гауссов,  $I_0 = 20$  A.

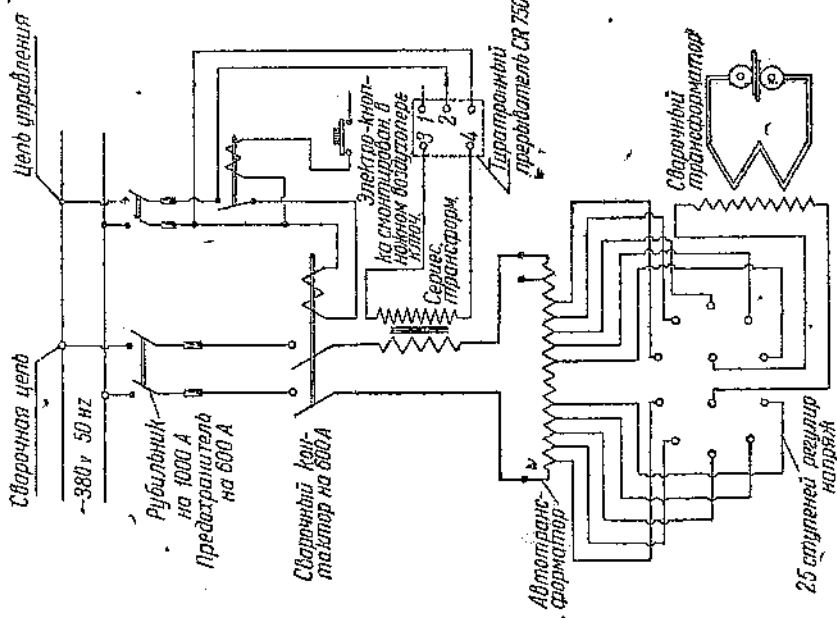
Благодаря наличию регулируемого автотрансформатора число витков первичной обмотки остается постоянным и равно  $w_1 = 32$ , число витков вторичной обмотки  $w_2 = 1$ . Напряжение, поглощаемое автотрансформатором, меняется с 318 V для первой ступени мощности до 100 V при последней (25-й) ступени мощности.

Управление сварочным процессом предусмотрено при помощи тиратронного прерывателя. Для этой цели включен последовательно в первичную цепь машины сериес-трансформатор, который присоединяется высоковольтной обмоткой к тиратрон-

му прерывателю системы ДЖИИ (клеммы 3—4). На этой схеме дны еще клеммы 1—2. Они являются блокировочными контактами, установленными на дверцах тиратронного прерывателя целях безопасности.



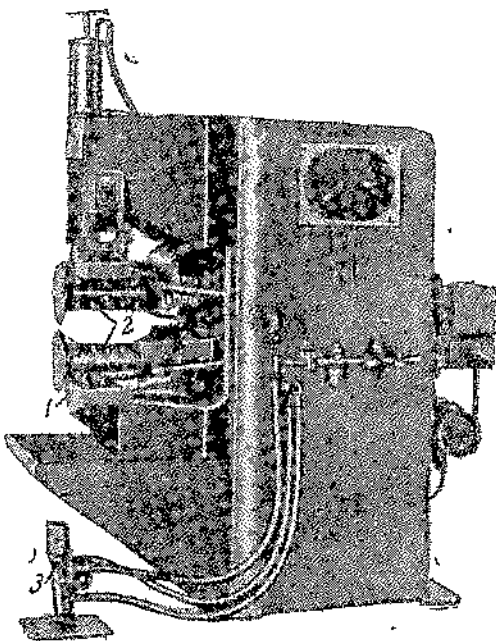
Фиг. 145. Электрическая схема роликовой машины Тейлор-Винфильд на 800 кВА.



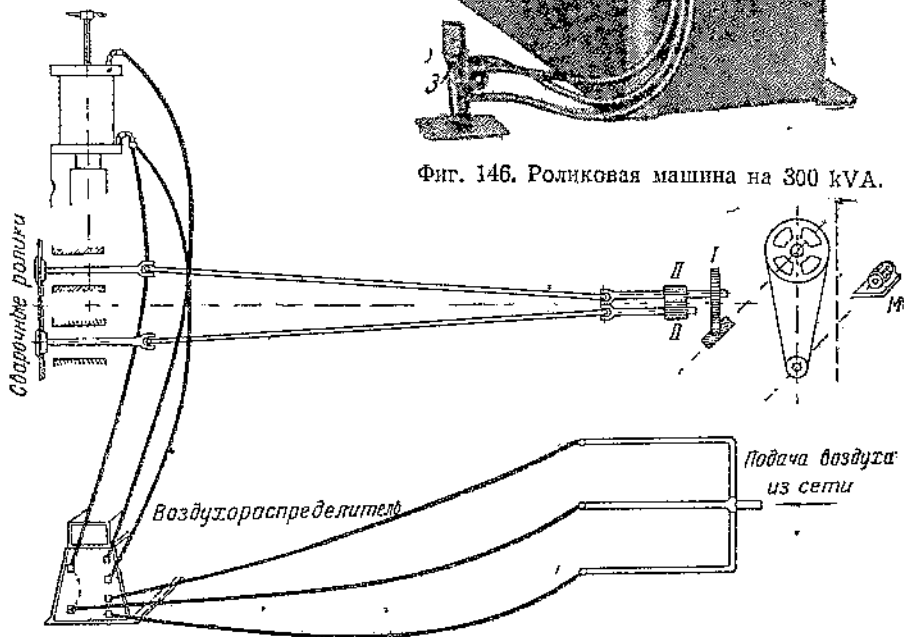
В данной установке сварочная машина не включается в сеть того момента, пока открыты места, опасные с точки зрения возможности поражения высоким напряжением тиратронной тановки в случае прикосновения к токоведущим контактам. Случение сварочного тока производится ножной кнопкой. При жатии этой кнопки включается сперва вспомогательный конктор, который в свою очередь включает электромагнит сва-

рочного контактора. Пуск мотора производится кнопкой, установленной на корпусе машины (фиг. 146).

Вращательное движение к роликам подается от мотора *M* к роликам через редуктор РИВС и карданные валы<sup>1</sup>. Кинематическая и пневматическая схемы показаны на фиг. 147. От мотора *M* в 2 л. с. (имеющего четыре ступени оборотов  $n = 1500, 1000, 750$  и  $500$  об/мин.); вращение передается через ременную передачу и червяк на шестерню *I*. Карданный вал верхнего ролика соединен жестко с валом шестерни *I*. При помощи шестеренок *II*



Фиг. 146. Роликовая машина на 300 кВА.



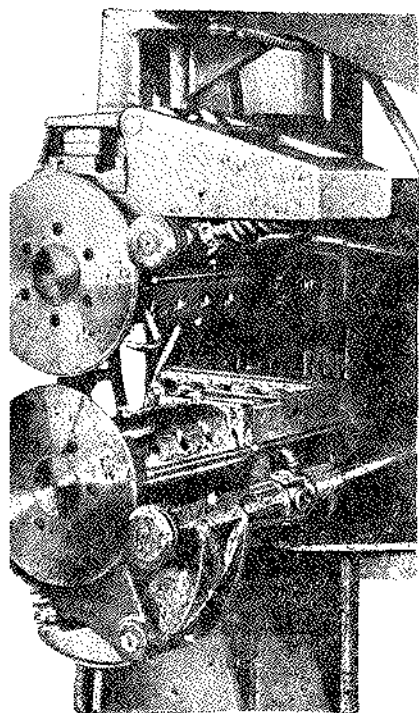
Фиг. 147. Схема роликовой сварочной машины на 300 кВА.

вращение передается также нижнему ролику. Скорость вращения мотора изменяется при помощи специального переключателя. Кроме четырех ступеней скорости вращения мотора ре-

<sup>1</sup> Карданные валы проходят вблизи токоведущих шин вторичной цепи и во избежание нагрева сделаны из бронзы, а не стальные.

тировка скорости производится еще редуктором РИВС. Скорость сварки может меняться от 0,26 до 2,36 м/мин.

Вращение сварочных роликов производится трением стальных роликов малого диаметра, сидящих на концах карданных валов, медным сварочным роликом (фиг. 148). Каждый стальной диск прижимается к медному ( $d=250$  мм) при помощи стальной пружины 1. Сила прижатия ролика регулируется степенью натяжения пружины. Вторичная обмотка, а также внешний контур токопроводящие подшипники охлаждаются циркулирующей водой.



г. 148. Общий вид конструкции механизма вращения сварочных роликов на 300 кВА.

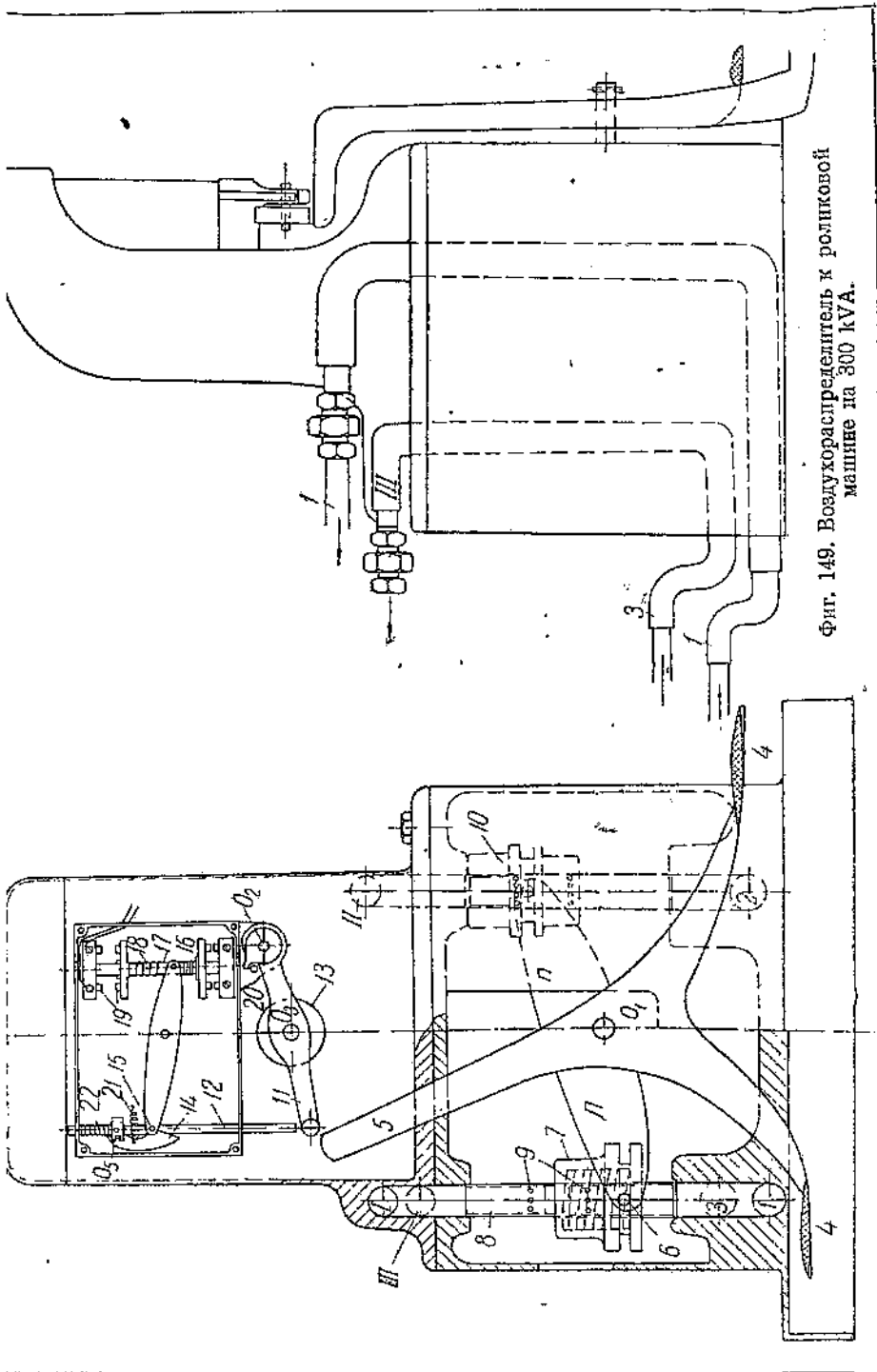
Сварочные ролики сделаны в виде сплошных дисков из элкалаю и охлаждаются водой путем наружной поливки их рабочих поверхностей при сварке. Вода с роликов стекает в бак. Подшипники смазываются время от времени токопроводящей графитовой смазкой через масленки. Полезная длина вылета внешнего контура составляет 600 мм.

Давление на сварочные ролики осуществляется при помощи сжатого воздуха, подведенного по схеме фиг. 149 к верхнему цилиндру через распределитель 3. Диаметр поршня цилиндра  $d=114$  мм. Зная давление подводящего воздуха  $p$ , легко определить каждый раз величину давления на ролик

$$P = \frac{\pi d^2}{4} \cdot p \text{ кг.}$$

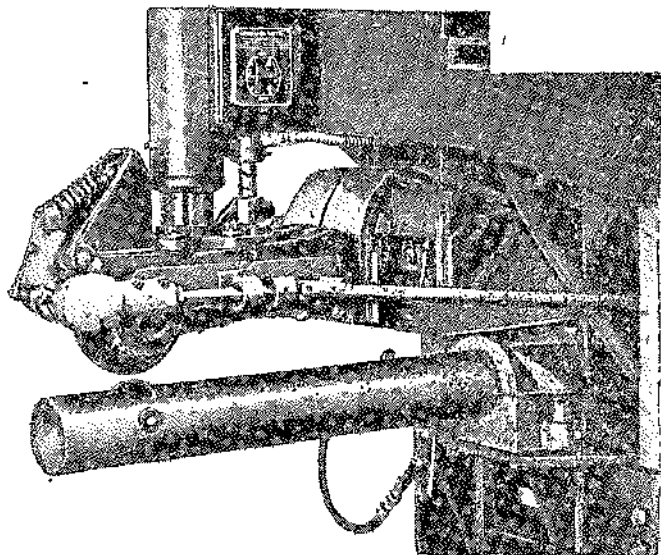
Распределительная коробка разделяется на две части: верхнюю и нижнюю. Управление пневматическим устройством, предусмотренным в нижней части коробки, производится ножной педалью 4. Включение производится при нажатии правой педали, выключение левой. При нажатии правой педали рычаг 5 поворачивается по часовой стрелке вокруг оси  $o_1$ . Перпендикулярно рычагу 5 имеются два прилива с левой и правой сторон,  $л$  и  $п$ . Рычаг  $л$  имеет еще разветвление в виде вилки; посредством болта 6 вилка при своем передвижении поднимает втулку 7 вверх. Последняя скользит по стержню, высверленному с торцов имеющему в средней части отверстия 9, необходимые для прохода воздуха из нижней части цилиндра в верхний цилиндр по тому же стержню. Из воздушной сети воздух подводится к ци-





Фиг. 149. Воздухораспределитель к релликовой машине на 300 кВА.

ндру через шланг *1*. Отсюда через нижние отверстия *9* и по налам втулки *7* воздух попадает в верхнюю часть цилиндра *8* через отверстие *1* по шлангу к верхнему цилиндру машины и производит необходимое давление на верхний ролик. Одновременно с этим по шлангу *3* точно таким же образом воздух ступает в нижнюю часть цилиндра и создает буферное давление, необходимое для смягчения удара верхнего ролика об нижний. Правый прилив, опускаясь вниз, перемещает втулку *10* вниз препятствует подаче воздуха от нижнего шланга *2* к верхнему *11*.



Фиг. 150. Общий вид внешнего контура роликовой сварочной машины средней мощности с принудительным вращением одного верхнего ролика.

При нажатии левой педали для выключения сварочного проса рычаг *5* перемещается против часовой стрелки и прекращает подачу воздуха по шлангам *1* и *III*. Одновременно с этим прекращается подача воздуха по шлангу *II*, к цилиндру под торью; последний поднимается вверх. В таком положении машина одитися до момента следующей сварки.

Механизм верхней части коробки производит включение пинки *19*. При нажатии правой педали рычаг *5* скользит по лагу *II*, сидящему на оси  $O_2$ , и увлекает за собой стержень *12*. В окончательного дожатия рычаг *5* доводится до рамки *13*, точка *14*, свободно вращающаяся на оси  $O_3$ , соскакивает с нижней части упора *15* и освобождает пластинку *23*, которая правым концом поднимает стержень *17* вверх и замыкает контакты пинки *19*. На стержне *17* имеются две пружины *16* и *18*, держащие контакты в разомкнутом состоянии.

При обратном перемещении рычага 5 освобождается рычаг 11. Стержень 12 под действием пружины 22 опускается вниз, а сошка 14 заскакивает на первоначальное свое место и удерживается в этом положении пружиной 21. Пластика 23 опускается вниз под действием собачки 14, увлекает за собой стержень 17 размыкает контакты 19. Роликовые машины SM-24 выпускаются мощностью 100, 150, 200, 250 и 300 kVA.

Рассмотренная машина нашла широкое применение в автомобильной промышленности для сварки бензобаков.

Представляют интерес и другие типы роликовых машин, изготовляемых этой фирмой, но здесь покажем лишь роликовую машину SL-24 (фиг. 150). Верхний ролик с принудительным вращением, нижний, влекаемый перемещающимися листами, вращается в обратном направлении. Вращение медного ролика осуществляется от мотора с данным валом через шестеренки и стальной ролик, прижимаемый пружиной к сварочному ролику. Эта машина позволяет производить продольную сварку деталей малого диаметра. Длина стола машины SL-24 равна 600 мм. Этот тип машин выпускается мощностью: 40, 60 и 80 kVA.

## В. Стыковые машины

### 66. Стыковая машина АСА-100

Сварочная машина АСА-100 (фиг. 151) предназначена для сварки встык изделий сечением до 800 мм<sup>2</sup>. Продолжительная мощность трансформатора, установленного внутри машины, номинальная 35 kVA, а максимальная 100 kVA. Трансформатор бронированный с водяным охлаждением. Электрическая схема машины АСА-100 представлена на фиг. 152. Первичная обмотка имеет семь ступеней регулировки мощности. Переключение ступеней производится двумя рубильниками А и Б. Включение и выключение машины производится через кнопку К при помощи главного и промежуточного контакторов 1 и 2, катушки которых питаются от вспомогательного трансформатора 3.

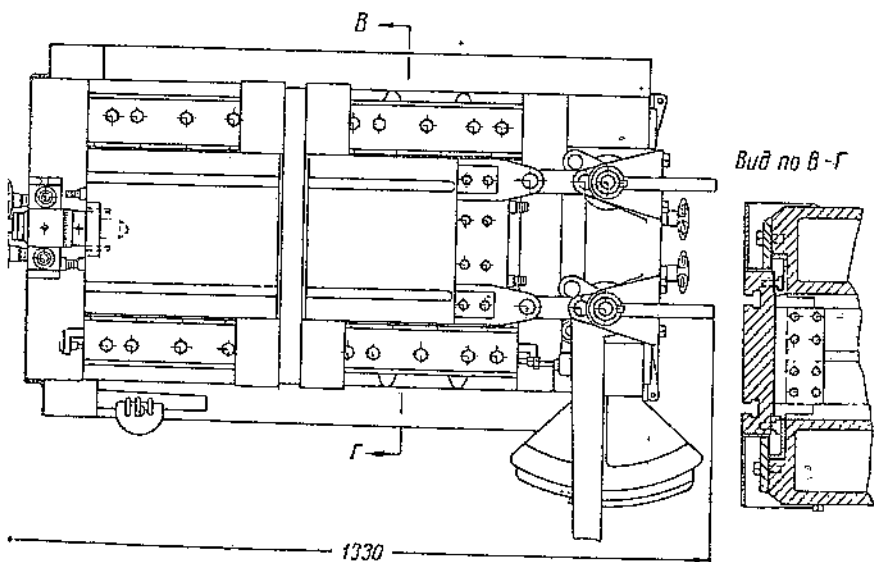
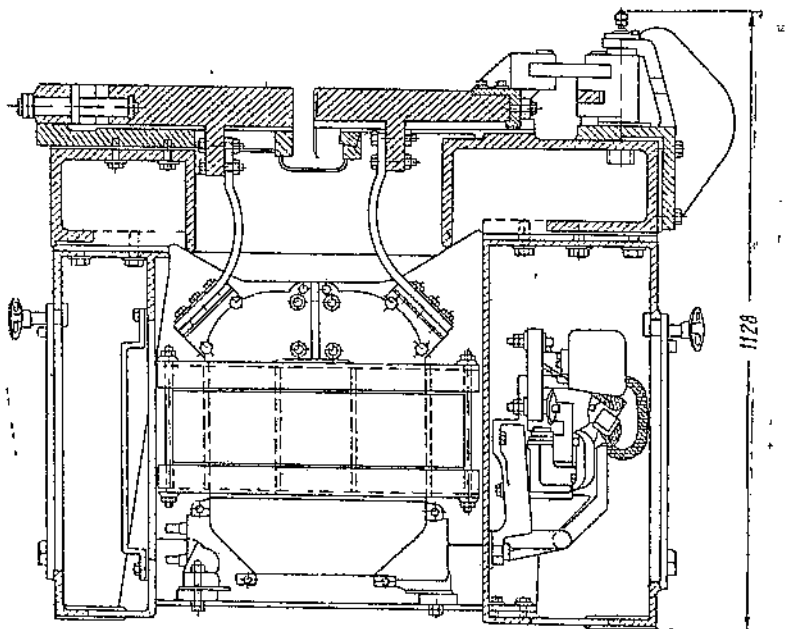
Вторичный виток трансформатора литой, с водяным охлаждением. Изменение вторичного напряжения холостого хода по ступеням показано в табл. 46.

Таблица 46

Напряжение холостого хода по ступеням на машине АСА-100

Ступень	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
.....	4,22	4,47	4,8	5,2	5,59	6,02	6,67	7,45

Машина имеет горизонтальный стол с Т-образными пазами, в которых крепятся на сухарях зажимные устройства. На машине имеется возможность установить радиальные зажимы, бла-



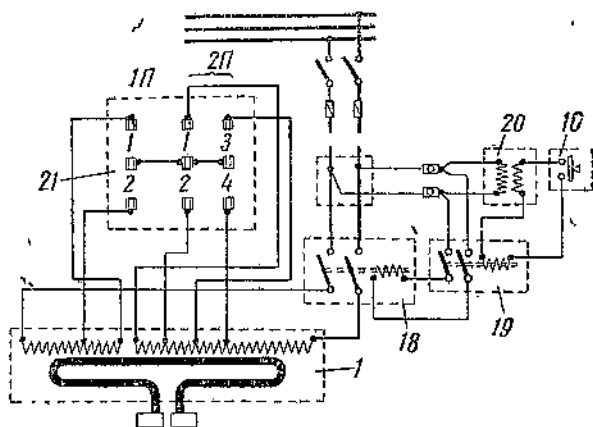
Фиг. 151. Машина для стыковой сварки АСА-100.

одаря чему удается сваривать изделия в виде стержней, полос, бочков и т. п. Во всех случаях сварки рекомендуется применять поры. Последние воспринимают на себя некоторое давление и разгружают контактные губки зажимов от излишнего давления, одновременно гарантируя от возможности проскальзывания изделий в контактных губках.

В случае сварки стык фасонных изделий применяют специальные зажимные устройства с конфигурацией, зависящей от формы изделий.

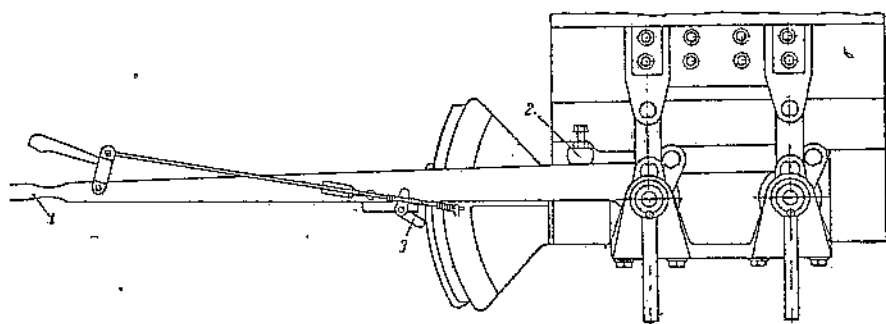
Устройство механизма подачи и осадки машины АСА-100 идно из фиг. 153.

Основной рычаг 1 связан с правой плитой, перемещающейся по стальным направляющим. Перемещение рычага влево возможно до упора 2, осуществленного в виде регулировочного винта. При перемещении



Фиг. 152. Электрическая схема машины АСА-100.

1, 2 — переключатели в регулировочном устройстве; 21 — переключатель ступеней; 18 — главный контактор; 20 — вспомогательный трансформатор; 19 — вспомогательный контактор; 10 — выключатель.



Фиг. 153. Механизмы подачи и осадки машины АСА-100.

рычага влево усилие передается правой плите через систему оленчатых рычагов и серег. В конце рычага укреплено приспособление для включения и выключения тока в обмотке вспомогательного контактора. При нажиме на ручку ток включается, при ее отпуске выключается. Ток также отключается, если тянуть вверх рычажок 3 с роликом на конце.

Для высококачественной стыковой сварки требуются не только одинаковые эффективные значения тока для каждого изделия, но также точное выключение тока в одной и той же точке пути перемещения (или в одно и то же время) при осадке свариваемых изделий. Для этой цели служит передвижной упор, устанавливаемый в экспериментально подобранной точке для данных изделий.

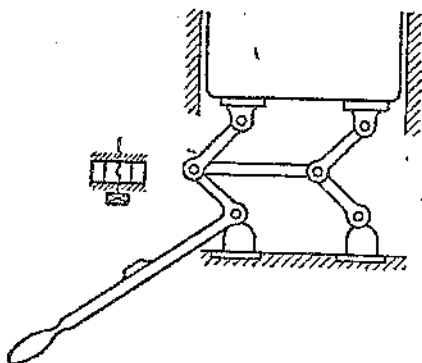


Рис. 154. Осадочное приспособление машины АСА-100.

Упор поднимает рычажок 3 вверх и выключает сварочный ток.

В табл. 47 даны технические данные стыковых аппаратов АСА-30; АСА-60 и АСА-100.

Таблица 47

Технические данные стыковых сварочных машин АСА-30, АСА-60, АСА-100-1

Элементы характеристики	Тип машины		
	АСА-30-1	АСА-60-1	АСА-100-1
Первичное напряжение, $U$ . . . . .	220; 380	220; 380	220; 380
Номинальная мощность, $kVA$ . . . . .	10	20	35
Режим: повторно-кратковременный:			
п. к. р., % . . . . .	12,5	12,5	25
мощность, $kVA$ . . . . .	30	60	100
прерывная работа { свариваемые сечен., $mm^2$	240	400	800
число сварок в час. . . . .	30—40	30—40	20—30
максимальное сечение свариваемого железа при работе с перерывами, $mm^2$	800	1600	2500
число ступеней мощности . . . . .	8	8	8
расход охлаждающей воды, $л/час$ . . . . .	200	200	600
наибольшее расстояние между плитами, $mm$ . . . . .	52	52	75
скорость подачи, $mm$ . . . . .	25	25	30
Высота барнты, $mm$ :			
высота . . . . .	1290	1290	1700
ширина . . . . .	1770	1770	2200
глубина . . . . .	1135	1135	1800
Вес машины, $kg$ . . . . .	800	850	1100

## Г. Специальные сварочные машины

### 67. Сварочный пресс APC-250

Машина APC-250 (фиг. 155) предназначена для рельефной сварки в нескольких местах одновременно на одном изделии по заранее подготовленным выштамповкам. На этой машине можно одновременно сваривать до восьми выступов на одном изделии.

Завод „Электрик“ рекомендует табл. 48 в качестве ориентировочных данных для определения размеров выступов верхнего листа при различных толщинах свариваемого материала.

Таблица 48

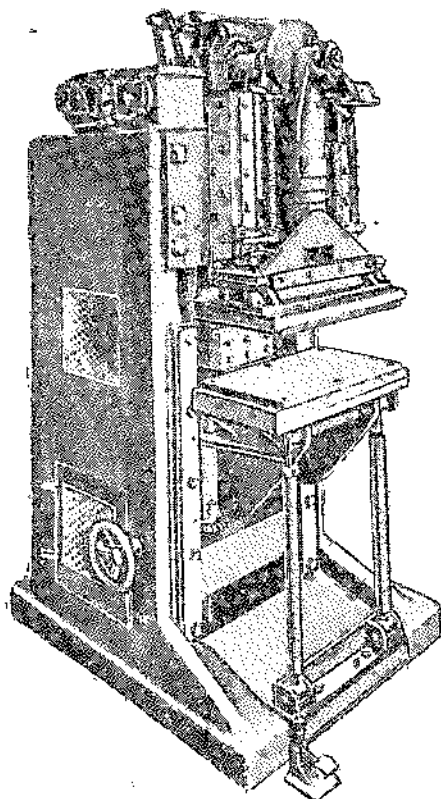
Размеры выступа верхнего листа

Нижний лист	Верхний лист			
	1	1,5	3	6
	размеры выступов, мм			
1	5	5	5	5
	1,2	1,2	1,2	1,2
1,5	4	4	4	5
	1	1	1	1,2
3	4	4	4	5
	1	1	1	1,2
6	5	5	5	5
	1	1	1	1,2

Примечание. В числителе стоит размер диаметра выступов верхнего листа, а в знаменателе — высота выступов.

В этой машине установлен броневой однофазный трансформатор с дисковыми обмотками, имеющий продолжительную мощность 80 kVA, а 250 kVA повторно-кратковременную. Трансформатор имеет 16 ступеней регулировки мощности (фиг. 156). Переключение ступеней мощности осуществляется при помощи двух однополюсных рубильников. Вторичное напряжение меняется при этом в пределах от 5,2 до 12 V. Распределение напряжения холостого хода на вторичной стороне трансформатора для всех 16 ступеней показано в табл. 49.

Вторичные витки отлиты из алюминия и имеют водяное охлаждение. Расположение обмоток на стержне трансформатора дисковое.

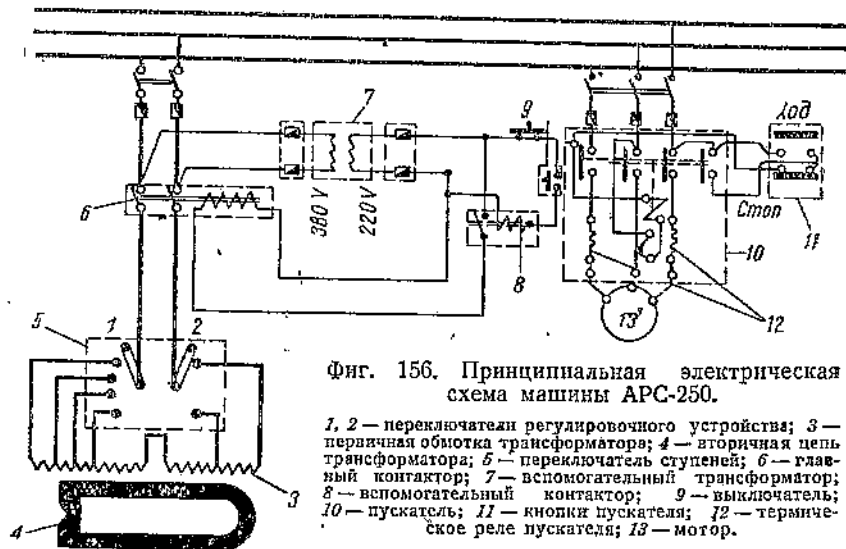


Фиг. 155. Машина для рельефной сварки APC-250.

## Распределение напряжения холостого хода рельефной машины APC-250

Ступень	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI
$1/2$	5,2	5,68	6,03	6,34	6,66	6,91	7,17	7,3	7,6	7,75	8,25	8,84	9,04	9,74	10,87	11,88

Витки вторичной обмотки соединены между собой параллельно и подключены одним полюсом жестко с контактной колодкой нижнего электрода, а другим — при помощи гибкой шины : бронзовой колодке верхнего электрода.



Фиг. 156. Принципиальная электрическая схема машины APC-250.

1, 2 — переключатели регулировочного устройства; 3 — первичная обмотка трансформатора; 4 — вторичная цепь трансформатора; 5 — переключатель ступеней; 6 — главный контактор; 7 — вспомогательный трансформатор; 8 — вспомогательный контактор; 9 — выключатель; 10 — пускатель; 11 — кнопки пускателя; 12 — термическое реле пускателя; 13 — мотор.

Включение и выключение первичной обмотки трансформатора производится при помощи главного и вспомогательного контакторов, катушки которых питаются переменным током 220 V. При напряжении сети выше 220 V применяют вспомогательный трансформатор. Катушка вспомогательного контактора управляется механическим выключателем.

На этой же фигуре показана схема кнопочного включения мотора (1,5 kW) при помощи магнитного пускателя, имеющего тепловое реле для защиты мотора от перегрузки. Кинематическая схема механизмов такой машины показана на фиг. 157. От электрического двигателя 1 вращение передается через шестеренки 2, 3 к коробке скоростей 4. От коробки скоростей через шестерни 5—6 вращение передается к червячной передаче 7, затем к разъемной муфте 8—9 и по шестерням 10—11 к главному валу 12. Шестерни 2, 3, а также 5, 6 соединены между



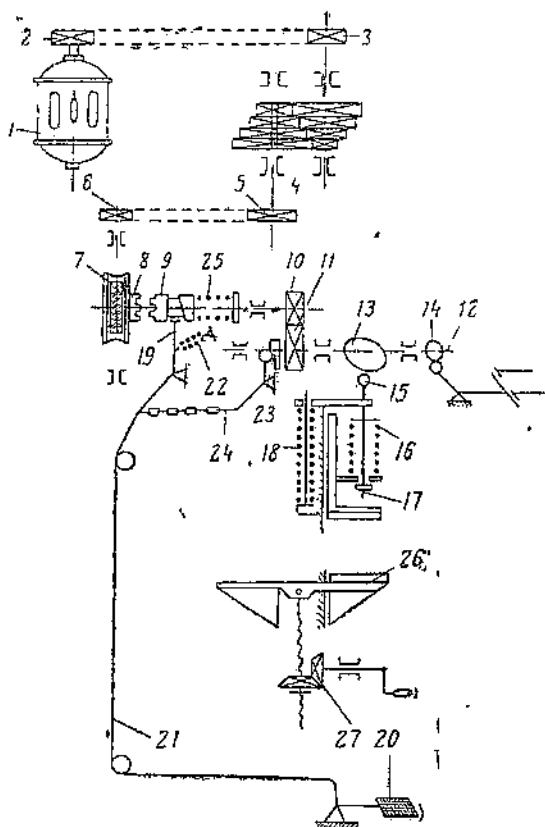
собой цепью Рейнольда. На главном валу 12 находится кулачок осадки 13 и кулачок включения тока 14.

Кулачок осадки 13 давит на ролик. Стержень 15 имеет в верхней части вилку, в которой посажен ролик. Вместе со стержнем перемещается в направляющих вся головка. На стержне расположена пружина 16, натяжение которой регулируется нижней гайкой 17. От вращения кулачка 13 перемещается

вниз стержень 15 и сжимает пружину 16. Вместе со стержнем опускается вниз вся подвижная часть до тех пор, пока не соприкоснутся между собой верхний и нижний электроды, после чего головка остановится, а стержень 15 будет перемещаться дальше вниз; давление на свариваемую деталь еще более увеличится. Головка возвращается в начальное положение благодаря действию вспомогательной пружины 18. Механизм, начиная от мотора до червячной передачи 7, а также левая часть муфты 8 вращаются все время, пока включена машина. Другая часть механизма — от правой части муфты 9 до главного вала 12 — находится в покое и вращается только по мере сцепления частей муфты 8—9 между собой. Правая часть муфты 9 имеет продольное перемещение на главном валу 12, осуществляемое давлением пружины. Муфта 9 удерживается от перемещения упирающимся в ее выступ ножом 19. Муфта входит в зацепление лишь после оттяжки ножа 19, благодаря чему вращение передается на главный вал 12.

Машина включается ножной педалью 20. Последняя оттягивает тросик 21, соединенный с ножом 19. При освобождении педали пружинка 22 устанавливает нож обратно в вырез муфты.

Шестерни 10, 11 имеют передаточное число 1:2, поэтому необходимо предусмотреть еще такое устройство, которое не позволило бы производить расцепление муфты 8, 9 на первом обо-



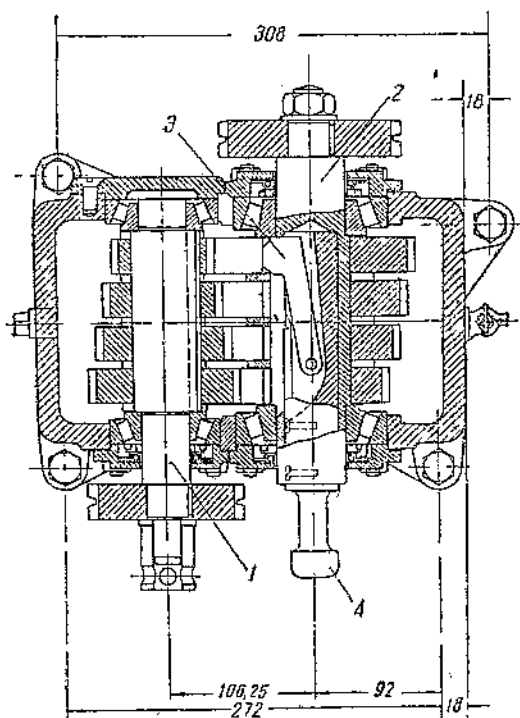
Фиг. 157. Кинематическая схема машины APC-250.

роте шестерни 10. С этой целью применяется дополнительный рычажный механизм. На главном валу закреплена профильная шайба 23, имеющая некоторый выступ. Нож 19 связан с коленчатым рычагом 24 при помощи цепочки. На конце рычага расположен ролик. Вначале ролик катится по тонкой части шайбы, а затем попадает на ее выступ, и поэтому, в случае преждевременного освобождения ножной педали, нож 19 задержится до тех пор, пока ролик рычага 24 не скатится с выступа шайбы.

Как только ролик скатился с выступа, пружина 25 воздействует на нож, и муфта расцепляется.

Нижний стол 26 может перемещаться в вертикальном положении при помощи винта. Трансформатор жестко связан с кронштейном и перемещается вместе со столом. Подача стола производится маховичком 27.

На фиг. 158 показана коробка скоростей машины АРС-250. На ведущем валу 1 насажено на шпонке четыре шестерни. Последние входят в зацепление с шестернями ведомого вала 2. Шестерни ведомого вала сидят свободной посадкой. Сцепление с валом производится рукояткой 4 поочередно при помощи передвижной шпонки 3. В этой коробке скоростей можно получить четыре скорости, зависящие от положения передвижной шпонки. Указанная машина в случае необходимости может применяться в качестве одноточечной машины. Полные технические данные этой машины помещены в табл. 50.



Фиг. 158. Коробка скоростей машины АРС-250.

лучить четыре скорости, зависящие от положения передвижной шпонки. Указанная машина в случае необходимости может применяться в качестве одноточечной машины. Полные технические данные этой машины помещены в табл. 50.

## 68. Многоточечная машина последовательного действия

В многоточечных машинах последовательного действия давление в сварочном контакте создается при помощи сжатого масла, подведенного к каждому электроду. Этим объясняется название таких машин „Гидроматик“. Схематическое изображение машины показано на фиг. 159. При помощи особого распределительного устройства производится подача масла от насоса высокого давления поочередно к каждому электроду. Различное

устройство распределителя масла отличает в основном конструкции таких машин.

Многоточечная машина последовательного действия для сварки листов из стали имеет обычно два однофазных трансформатора средней мощности (40—50 kVA), соединенных между собой параллельно. Коммутирующее устройство, а также управление сварочным процессом в каждой точке производится прерывателем контакторного типа. Токораспределение во вторичной (сварочной) цепи происходит от общей шины (одного полюса) через гибкие медные ответвления к каждому электроду в отдельности. Второй полюс приключен к медной контактной плите, на которой укрепляется свариваемая деталь, или подводится непосредственно к массе изделия дополнительным контактом. Масляный насос приводится в движение от асинхронного мотора в 2 л. с.

Электрододержатели в таких машинах представляют собой цилиндры, в которых движется поршень. Поршень в нижней своей части держит электрод.

Таким образом каждый электрододержатель присоединен трубкой к распределительному устройству масла и гибким кабелем ко вторичной обмотке трансформатора. Электроды могут быть расположены в различных плоскостях, в соответствии с конфигурацией свариваемых деталей.

Машина работает следующим образом: при нажатии кнопки приводится в действие мотор и связанный с ним насос; свариваемое изделие закрепляется в кондукторе при помощи сжатого воздуха, затем включается рас-

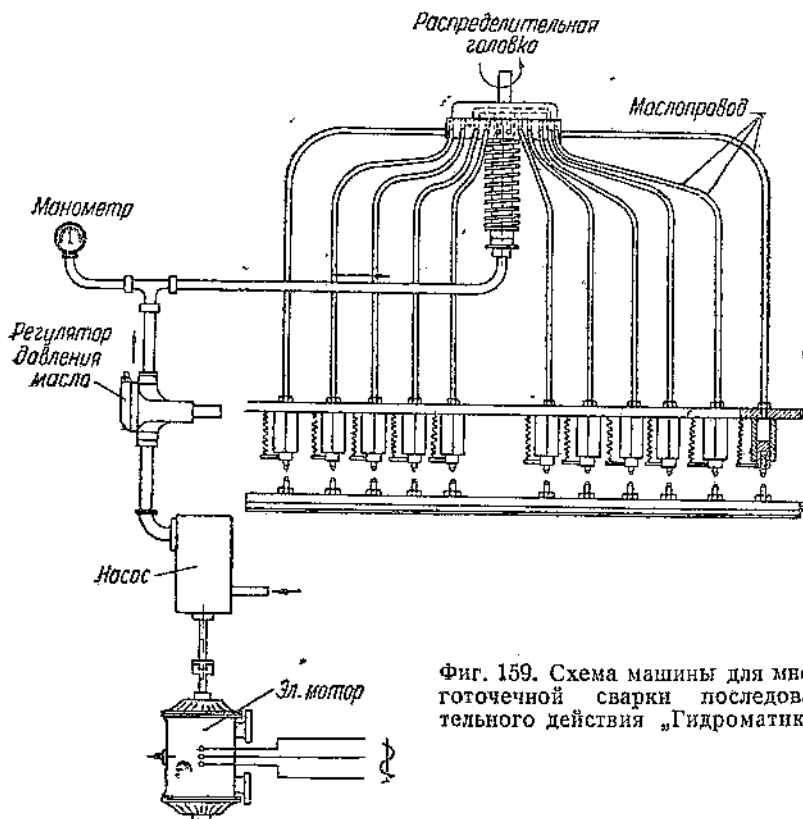
Таблица 50

Технические данные сварочного пресса типа АРС-250

Тип	Первичное напряжение $U$	Продолжительная мощность kVA	Повторно-кратковременный режим		Число ступеней регулировки	Расход воды л/час	Мощность мотора kW	Размеры контактной плиты мм	Максимальное расстояние между шипами мм	Рабочий ход электрода, мм	Максимальное давление, кг	Габариты			
			п.к.р. %	мощность kVA								число сварок в час	Высота, мм	Ширина, мм	Глубина мм
АРС-250	220—380	80	12,5	250	1800 1500 1200 900	16	750	2,2	420 × 280	240	52	2500	2211	963	1240

ределительное устройство, и масло подводится к одному из электрододержателей. Под действием масла электрод прижимается к изделию, через систему реле включается контактор а заданную продолжительность времени и происходит сварка одной точки.

При окончании сварки в данной точке давление снимается электрод возвращается в исходное положение при помощи



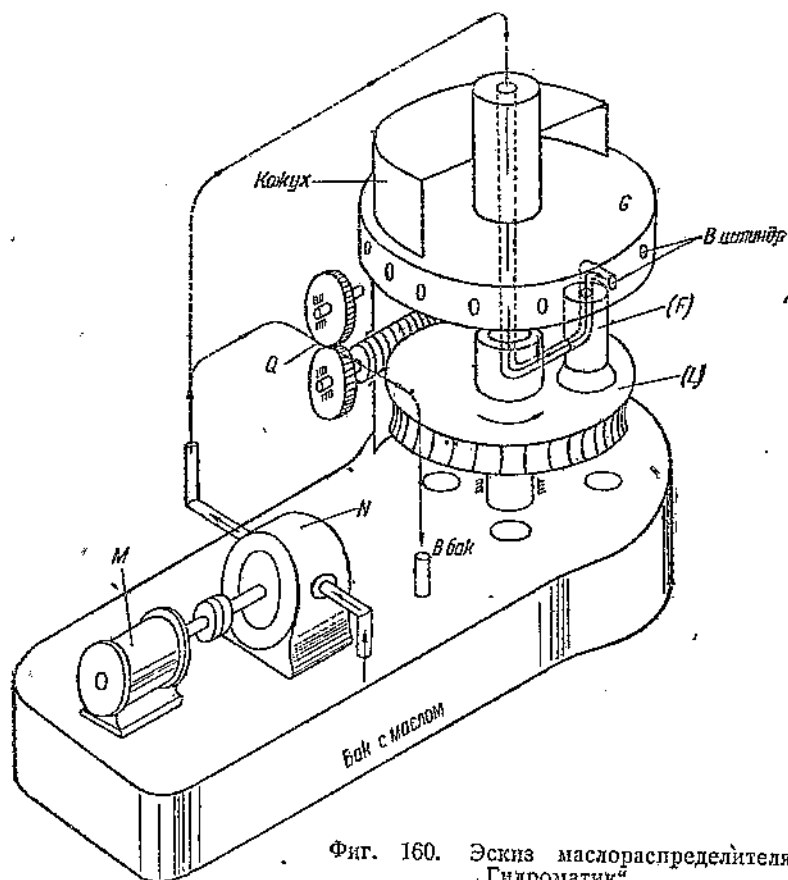
Фиг. 159. Схема машины для многоточечной сварки последовательного действия «Гидроматик».

ружины. Затем процесс повторяется, но уже под другим электродом и т. д. под всеми электродами. Подобным же образом можно предусмотреть сварку одновременно в двух точках гидроматика. Давление на электрод дают в зависимости от свариваемых толщин 200—300 кг. Многоточечные машины последовательного действия позволяют значительно увеличить производительность труда по сравнению с одноточечными сварочными машинами. Это весьма важный фактор для массового производства. Хотя такая машина рассчитана на определенную деталь, однако при постоянной загрузке ее в массовом производстве начальные затраты на такую машину себя оправдывают.

Для подачи масла к цилиндрам электродов применяется масло-распределитель.

На фиг. 160 показано отдельно схематическое изображение маслораспределителя.

Маслораспределитель установлен в верхней части машины на резервуаре для масла. На этом резервуаре установлены еще мотор  $M$  и насос  $N$ . Мотор мощностью в 2, 3 kW и с числом оборотов  $n = 900$  об/мин. приводит в движение насос, качающий масло из бака.



Фиг. 160. Эскиз маслораспределителя „Гидроматик“.

При помощи маслораспределителя масло подается по отдельным трубкам к поршням электродов. Давление масла можно регулировать. От насоса масло подводится еще к гидромотору  $O$ , который вращает механизм маслораспределителя.

Распределительный стакан  $F$  укреплен на диске  $L$ . Диск связан с червячным колесом. Червячное колесо вращается от гидромотора  $O$  и последовательно совмещает отверстие распределительного стакана с отверстием распределительного диска  $G$ . Таким образом обеспечивается подвод масла последовательно ко всем цилиндрам электродов. Сварка всего изделия завер-

\*

щается за время одного оборота червячного колеса. Каждое отверстие диска связано трубопроводом с двумя цилиндрами электродов, что обеспечивает одновременное включение давления в обоих цилиндрах, и сварка может происходить в двух точках. Продолжительность сварки всего изделия длится несколько секунд.

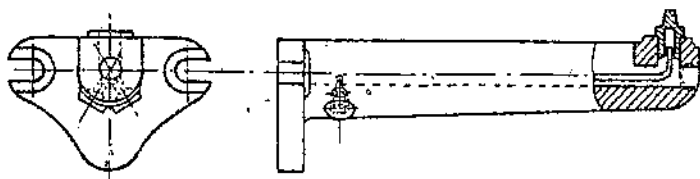
## Глава VIII

### РУКАВА, ЭЛЕКТРОДОДЕРЖАТЕЛИ И ЭЛЕКТРОДЫ

#### 69. Виды рукавов и электрододержателей

Неотъемлемой частью сварочной контактной машины являются рукава, электрододержатели и электроды.

Под электродом подразумевается та токоведущая часть внешнего контура, которая непосредственно соприкасается с изделием. Электроды относятся к виду инструмента, зависящего от свариваемых изделий.



Фиг. 161. Крепление нижнего рукава на плите.

Электрододержатель служит для жесткого укрепления электрода. В некоторых конструкциях электрододержатель отсутствует и электрод крепится непосредственно в рукаве. Рукавом называется токоведущая шина, служащая для электрического соединения с вторичной обмоткой сварочного трансформатора и в некоторых случаях являющаяся одновременно консолью жесткости.

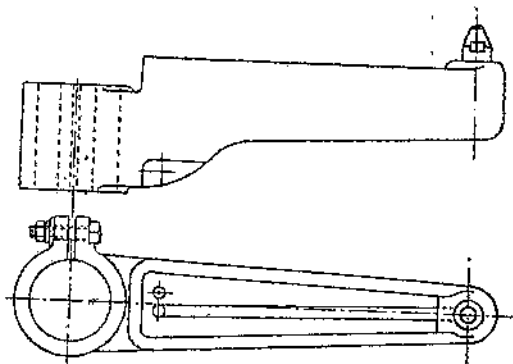
Крепление рукавов с вторичной обмоткой осуществляется различными способами. На фиг. 161—162 показаны два вида рукавов точечных машин, а также способы крепления их с вторичной обмоткой. В первом случае нижний рукав крепится к токоведущей плите на болтах, а во втором случае — на кронштейне.

В рассматриваемых видах рукавов нет промежуточного электрододержателя. Рукав и электроды охлаждаются водой. У современных сварочных машин нижний рукав крепится к токоведущим плитам, как это указано на фиг. 163.

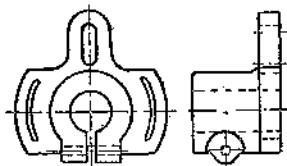
На фиг. 164 показан вместе с электродом верхний электрододержатель, имеющий интенсивное водяное охлаждение через центральный канал.

На фиг. 165 показана серия различных типов электрододержателей, применяемых для сварки в трудно доступных местах изделий. Рукава и электрододержатели, применяемые при точечной сварке переносными клещами, были описаны при рассмотрении установок для сварки переносными клещами.

В рельефной сварке, применяемой исключительно в массовом производстве, электроды в большинстве случаев приспособлены для сварки одной определенной



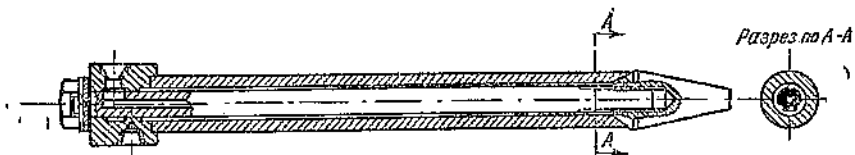
Фиг. 162. Крепление рукава на кронштейне.



Фиг. 163. Универсальная державка для рукавов.

детали. Разные детали требуют различных видов электродов, причем смена электродов при переходе на сварку с детали на деталь производится вместе со сменой электродной плиты. Плиты охлаждаются циркулирующей внутри водой.

Для роликовой сварки имеется большое число разнообразных конструкций токоведущих электродов (роликов). Наиболее простой вид рукава и ролика представлен на фиг. 166; медный



Фиг. 164. Верхний электрододержатель с интенсивным водяным охлаждением.

ролик вращается в проточной воде, охлаждающей одновременно нижний рукав и ролик. Такой ролик применим только для продольных швов. Крепление и охлаждение ведущего нижнего ролика для поперечного шва показано на фиг. 167. Внутри круглого рукава пропущен вал, являющийся одновременно и токоведущей частью. Ролик укреплен на валу на резьбе. Внутри вала циркулирует вода, охлаждающая электрод, ролик и рукав. На фиг. 168 показан верхний ролик для продольного шва. Ролик крепится на латунной коробке на болтах. Охлаждение ролика производится здесь неудачно; тепло от ролика отводится через латунные стенки охлаждающей водой, в то время как сам ролик не омывается водой.

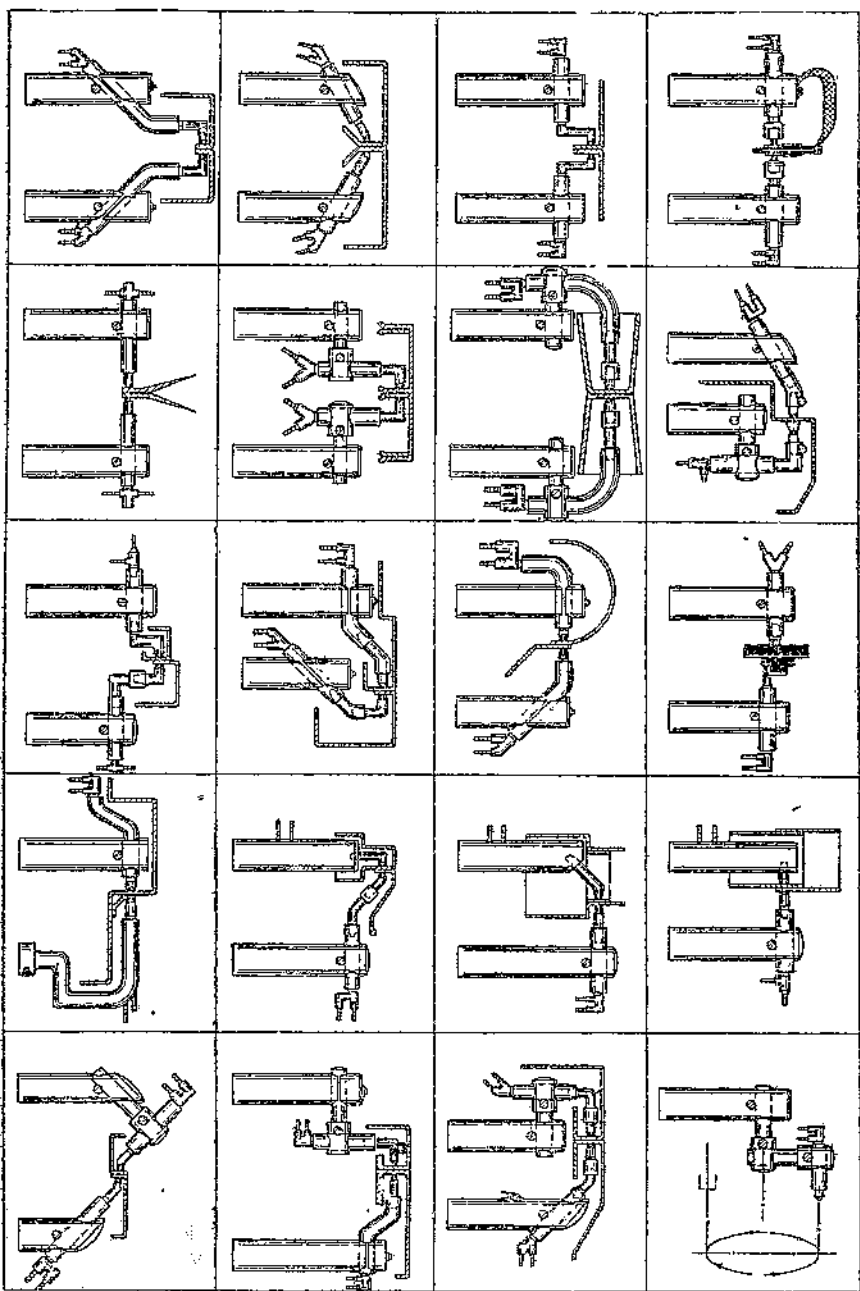


Рис. 165. Серия применяемых в практике специальных типов электродо-держателей и электродов для сварки в труднодоступных местах изделия.



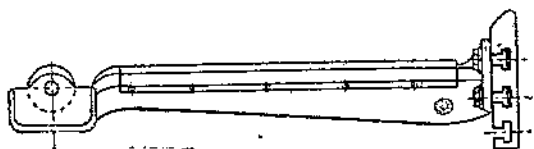
Некоторые фирмы США выпускают роликовые машины большой мощности с наружным водяным охлаждением роликов, осуществляемым четырьмя или двумя соплами непосредственно при сварке. Схема указанного способа показана на фиг. 169. Ролики изготовлены из красной меди. Ролики для роликовых машин применяются сплошные и со сменной рабочей поверхностью, а крепление роликов осуществляется при помощи болтов или на резьбе.

Ширина рабочей части ролика  $b$  определяется по эмпирической формуле

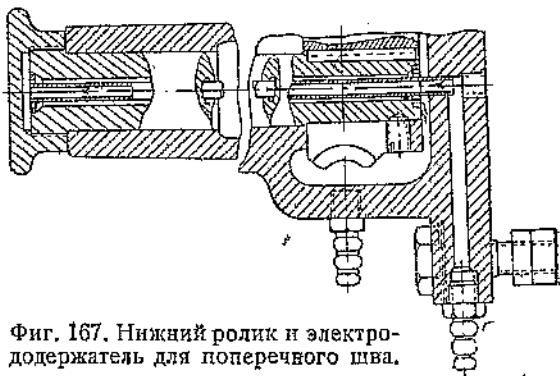
$$b = \delta (3 - 4) \text{ мм,}$$

где  $\delta$  — суммарная толщина свариваемых листов.

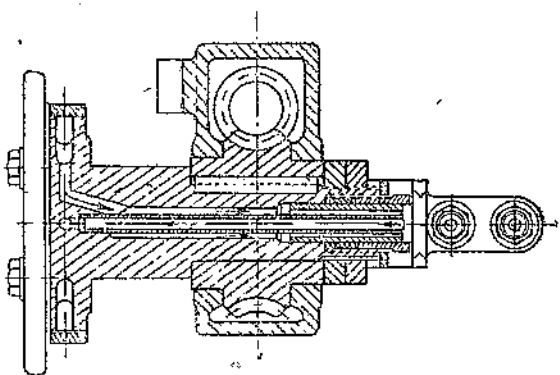
Форма электродов для стыковых машин зависит от конфигурации свариваемых изделий. Кроме того, весьма важную роль играет также метод крепления электродов к токоведущим плитам. Последнее осуществляется болтами и клиньями, как это показано на фиг. 170—172. В качестве материала для электродов стыковых машин применяются медь, бронза и другие специальные сплавы на медной основе.



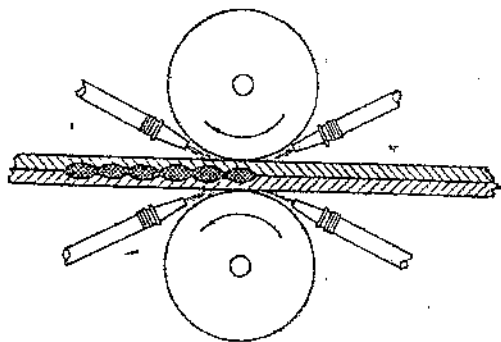
Фиг. 166. Нижний ролик и электрододержатель для продольного шва.



Фиг. 167. Нижний ролик и электрододержатель для поперечного шва.



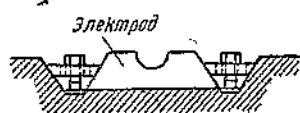
Фиг. 168. Верхний ролик и схема его охлаждения.



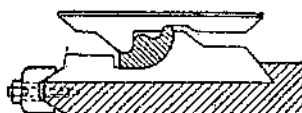
Фиг. 169. Схема охлаждения роликов с наружной стороны.

## 70. Материал для электродов

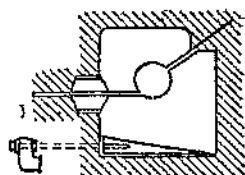
До недавнего времени основным материалом для электродов являлась исключительно электролитическая красная медь. Она обладает высокой электро- и теплопроводностью, благодаря чему возможна контактная сварка металлов при правильно выбранном давлении на электроды и других переменных величинах. Нагревание ме-



Фиг. 170. Крепление электрода болтами.

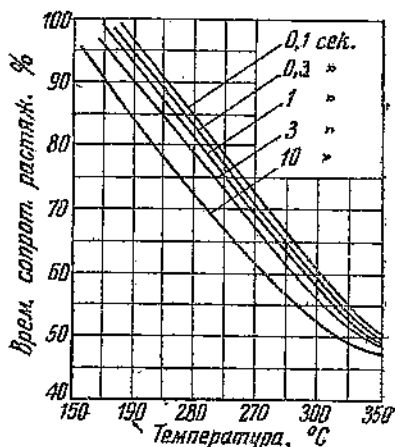
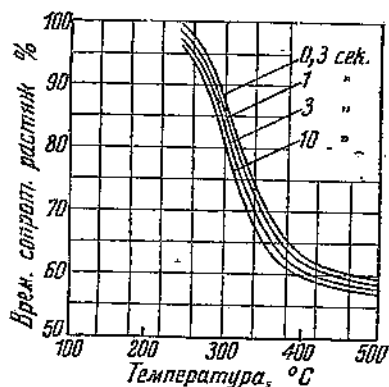


Фиг. 171. Крепление электрода в виде ласточкина хвоста.



Фиг. 172. Крепление электрода при помощи клиньев.

алла осуществляется в сварочном контакте между изделиями, в контактах, образующихся между каждым электродом и изделием, должно генерироваться незначительное количество тепла по сравнению с теплом в основном контакте. Высокая

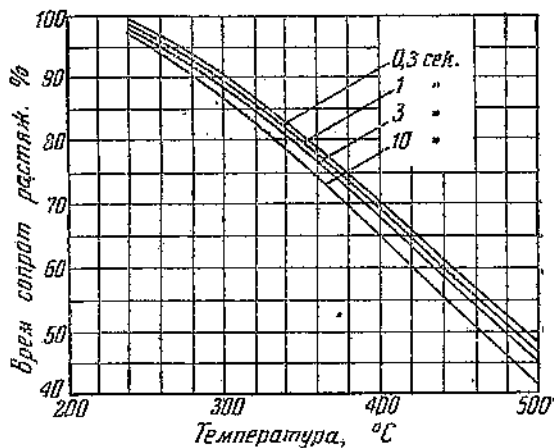


Фиг. 173. Твердотянутая красная медь. Фиг. 174. Твердотянутый алюминий. Зависимость временного сопротивления металла электродов от температуры при кратковременном нагревании.

теплопроводность медных электродов и охлаждение их циркулирующей водой обеспечивают быстрый отвод тепла, выделенного между электродом и деталью в процессе сварки.

Немаловажную роль при контактной сварке играют также механические свойства металла электродов, так как последние в процессе сварки претерпевают пластическое истечение, тем более, что концы электродов нагреваются до температуры, достигающей в некоторых случаях сотни градусов С. Хотя при

контактной сварке нагревание происходит кратковременно, однако, механическая прочность токоведущих материалов сильно понижается, даже при кратковременном их нагреве. На фиг. 173—175 показаны изменения временного сопротивления для меди, алюминия и бронзы в зависимости от температуры при различных кратковременных процессах нагревания. Значение временного сопротивления взято в процентах по отношению к величинам того же материала при нормальной температуре. Из этих кривых видно, насколько интенсивно должно происходить охлаждение электродов при сварке. Поэтому искусственное охлаждение электродов является весьма важным фактором, влияющим на их механическую прочность. Одно лишь интенсивное водяное охлаждение значительно увеличивает в практических условиях срок службы электродов, так как температура металла рабочей части электрода остается ниже температуры отжига или рекристаллизации. При этом весьма важно, чтобы охлаждение самого электрода производилось непосредственно циркулирующей водой, а не через теплопередачу в электрододержатель.



Фиг. 175. Твердотянутая бронза.

Зависимость временного сопротивления металла электродов от температуры при кратковременном нагревании.

Давление, приложенное к электродам при сварке сопротивлением, оказывает существенное влияние на сварочный процесс, но одновременно отражается на механической стойкости электродов. Появившаяся за последнее время тенденция повышения давления, приложенного к электродам, ограничивает применение красной меди в качестве электродов ввиду ее недостаточной механической прочности.

Для сварки алюминиевых сплавов лучшим металлом в качестве электродов является все же нагартованная электролитическая медь.

В качестве металла для электродов при сварке сопротивлением различных сталей был предложен ряд сплавов на медной основе, имеющих более высокую механическую прочность, чем медь.

Первым таким сплавом, предложенным в качестве электродов, является эльконайт. Он состоит из меди и вольфрама, соединенных механической смесью. Свойства этого материала складываются из свойств его компонентов, причем частицы

вольфрама, равномерно распределенные в меди, повышают ее механическую прочность. Медь и вольфрам, имеющие температуры плавления соответственно 1080 и 3300°, не смешиваются в жидком состоянии. Для приготовления этой смеси применяется так называемый металло-керамический метод с металлическими порошками. Порошки металлов замешивают, затем прессуют; прессовка и спекание производится в восстановительной или нейтральной зоне при температурах, близких к плавлению того металла, у которого более низкая температура. Хотя механическая прочность эльконайта в три-четыре раза выше прочности красной меди, его электропроводность в два с лишним раза ниже.

Приводим сравнительные данные для эльконайта и меди.

Удельный вес эльконайта  $\gamma = 14$ .

Удельный вес меди  $\gamma = 8,9$ .

Твердость эльконайта по Бринеллю  $H_B = 225$ .

Твердость катаной красной меди по Бринеллю  $H_B = 82$ .

Эльконайт обычно припаявается к рабочей торцевой поверхности медного электрода следующим специальным припоем: 65% Ag, 20% Cu, 15% Zn.

Изготовление медно-вольфрамовых соединений (эльконайт) для электродов освоено Электрокомбинатом им. Куйбышева в Москве. Испытания этого сплава при сварке на ряде заводов показали хорошие результаты. Однако широкого распространения медно-вольфрамовые электроды не получили по причине высокой стоимости.

Кроме эльконайта были предложены еще другие сплавы для применения их в качестве электродов при контактной сварке. К таким сплавам относятся мэлори-3, элкалой и хромоцинковая бронза, найденная в СССР. Состав компонентов первых двух сплавов не был опубликован и, судя по проводимости, можно предположить, что они также имеют медную основу.

Обстоятельные исследования поведения этих сплавов при точечной сварке были проведены Ларсеном (E. J. Larsen). Для сравнения были взяты три металла: медь, элкалой и мэлори-3. Опыты производились при точечной сварке сталей различной твердости толщиной листа в 1 мм; время сварки  $t_c \approx 0,25$  сек.

Таблица 51

Характеристика электродных материалов

Металл	Предел упругости, кг/мм <sup>2</sup>	Временное сопротивление, кг/мм <sup>2</sup>	Твердость по Роквеллу В	Проводимость в % к Cu = 100%	Температура отжига °C
Медь . . . . .	4,92	24,67	50	98	188
Элкалой . . . .	31,64	45,70	70	80	349
Мэлори-3 . . . .	35,15	49,2	80	80	538

Давление регулировалось калиброванной пружиной и было равно  $10,55 \text{ кг/мм}^2$ . Диаметр электрода обычно равнялся тройной толщине свариваемого материала. Характеристики указанных металлов даны в табл. 51.

Увеличение площади торца электродов при сварке холоднокатаной стали толщиной в 1 мм в зависимости от произведенного количества точек на сварочной машине показано на фиг. 176. Первоначальный диаметр заточки электрода 3,16 мм.

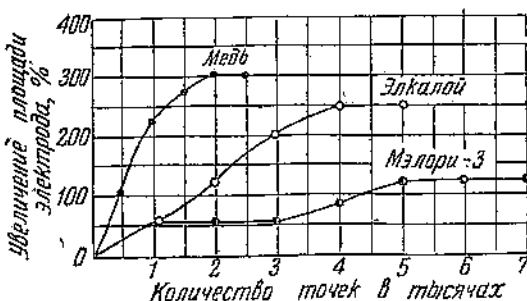
На фиг. 177 даны кривые, характеризующие увеличение площади заточки электродов при сварке оцинкованного железа толщиной 1,02 мм.

Тот же опыт для сварки нержавеющей стали толщиной 1,02 мм характеризуется графиками фиг. 178. Здесь так же, как в предыдущих опытах, диаметр электрода равен 3,16 мм, а удельное давление  $10,55 \text{ кг/мм}^2$ .

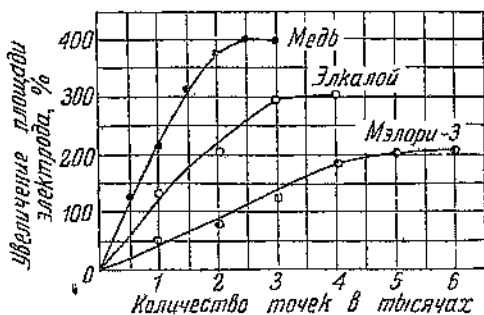
Из графика фиг. 179 видно, насколько увеличивается площадь касания электродов от смятия их при сварке для различных металлов электродов при условии одинакового удельного давления —  $10,55 \text{ кг/мм}^2$ .

На фиг. 179 даны кривые, характеризующие зависимость увеличения площади электрода от количества произведенных сварочных точек этими электродами без какой-либо промежуточной очистки электродов.

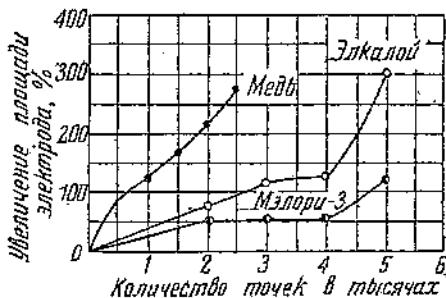
В качестве свариваемого материала была взята холоднокатаная сталь толщиной 1,04 мм.



Фиг. 176. Для холоднокатаной стали толщиной в 1 мм.



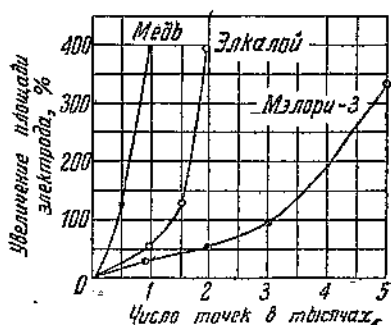
Фиг. 177. Для оцинкованного железа.



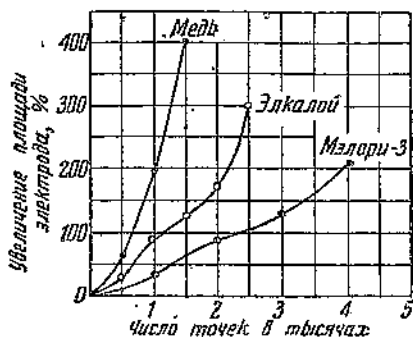
Фиг. 178. Для нержавеющей стали.

Фиг. 176—178. Зависимость увеличения контактной поверхности электродов при их зачистке от количества сварных точек на стальных листах.

Подобные характеристики электродов при сварке оцинкованного железа показаны на фиг. 180, а для нержавеющей стали— на фиг. 181. Как видно из этих кривых, изменение площади торца происходит весьма быстро. Так, например, площадь мед-

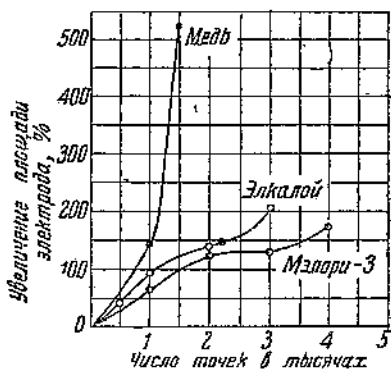


Фиг. 179. Холоднокатаная сталь.



Фиг. 180. Оцинкованное железо.

ного электрода увеличивалась на 400% при сварке 1000 точек на листах холоднойкатаной стали при удельном давлении в 10,55 кг/мм<sup>2</sup>, а при уменьшении удельного давления площадь электрода увеличивалась на 300% при сварке того же материала в количестве 2000 точек.



Фиг. 181. Нержавеющая сталь.

Фиг. 179—181. Графики увеличения контактной поверхности электродов от смятия их при работе в зависимости от количества произведенных сварочных точек на листовой стали.

При точечной сварке металлов необходимо производить частую зачистку поверхности электродов и придавать им первоначальную форму. Чем выше прочность электродов, тем реже приходится производить их очистку.

В табл. 52 приведено среднее количество сварочных точек, приходящееся на одну заточку электродов, для различного электродного материала. Здесь не следует смешивать заточку электрода с зачисткой его наждачной бумагой.

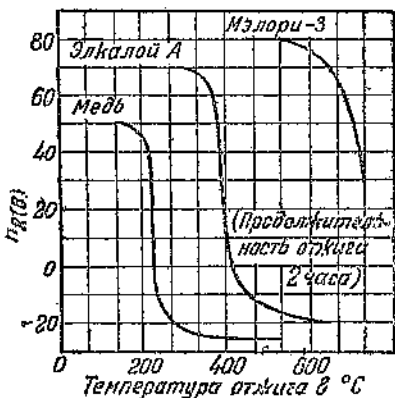
Следует все же иметь в виду, что указанное количество точек, приходящееся на 1 мм снятого материала электродов при их заточке, относится к данному режиму сварки. При других технологических условиях (удельное давление, время сварки, мощность) названные цифры будут меняться.

Средний срок службы электродов, полученных из практики сварки на различном оборудовании (принимая медь за 1) — следующий: медь — 1, элкалиой — 2 ÷ 3, мэлори-3 — 5 ÷ 7. Изменение твердости металла электродов в зависимости от отжига показано на фиг. 182. Уменьшение твердости торца электродов является прямой функцией температуры отжига материала. Твердость нагартованной меди уменьшается при температуре 188°, элкалиоя — при температуре выше 350°, мэлори-3 сохраняет твердость до 540°.

Мэлори-3 — материал, более дешевый, чем эльконайт. В связи с этим может быть рекомендован сплав — хромоцинковая бронза (0,6% Cr, 0,4% Zn, остальное Cu), найденная в Советском Союзе. Стоимость этого сплава при массовом изготовлении 4—5 руб. за 1 кг. Механические и физические свойства его даны в табл. 53.

Ценность хромоцинковой бронзы состоит еще в том, что она сохраняет свою твердость при повышенных температурах (до 500°). Испытание стойкости электродов из указанного сплава при сварке в сравнении с медными электродами показало следующие результаты: при сварке листов нержавеющей стали стойкость электродов получилась в семь-восемь раз больше, чем у медных; при сварке хромомолибденовой стали — в пять-семь раз; углеродистой стали — в три-пять раз больше, чем у медных электродов.

Хромоцинковая бронза может быть рекомендована в качестве электродного материала для точечной, роликовой, а также стыковой сварки различных сталей.



Фиг. 182. Изменение твердости металла электродов в зависимости от отжига, получающегося в процессе точечной сварки.

Таблица 52

Характеристика износа различного электродного материала при сварке

Элементы характеристики	Средние величины на одну заточку электродов		
	медь	элкалиой	мэлори-3
Количество точек . . . . .	489	1362	4590
Толщина материала, снятого за одну очистку, мм . . . . .	1,04	0,91	0,61
Количество точек, приходящееся на 1 мм снятой толщины электрода . . . . .	470	1500	7500

Свойства хромоникелевой бронзы по сравнению с медью

Металл электродов	Предел текучести кг/мм <sup>2</sup>	* Сопротивление разрыву кг/мм <sup>2</sup>	Удлинение, %	Твердость по Бринеллю, кг/мм <sup>2</sup>	Электропроводность по сравнению со стандартной медью, %
хромоникелевая бронза . . . . .	44	46	12	130	85
медь (15 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> наклепа) . . . . .	5	25	20	75	99
медь (40 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> наклепа) . . . . .	—	36	2	110	98

## Глава IX

## АСИНХРОННЫЕ ТОКОПРЕРЫВАТЕЛИ

## 71. Основные виды токопребрываетелей

При контактной сварке изделий возникает необходимость включения тока каждый раз в начальный момент сварки и выключения его при окончании сварки в данной точке. Количество таких включений и выключений тока зависит от необходимой скорости производства данного количества сварок (точек) на изделии в единицу времени. Продолжительность времени включения сварочного тока должна быть строго регламентирована для каждого вида сварки. Она является одним из основных факторов регулирования сварочного процесса. В связи с этим устройство, производящее коммутацию сварочного тока, представляет собой весьма ответственную часть сварочной машины или самостоятельный аппарат, которому уделяется за последнее время исключительное внимание. Такое устройство или аппарат, коммутирующий периодически и по заданному времени процесса ток в первичной обмотке сварочного трансформатора в контактной машине, называется токопребрываетелем. Многообразные типы токопребрываетелей разделяются на два основных вида:

- 1) асинхронные токопребрываетели и
- 2) синхронные ионные прерыватели.

К асинхронным токопребрываетелям относятся:

- а) механические (педальные, кулачковые и барабанные);
- б) магнитные или контакторные; в) механо-магнитные, в которых кулачком регулируется время включения и выключения тока электромагнита контактора.

К синхронным прерывателям относятся: а) тиристорные прерыватели с сериес-трансформатором с горячим катодом; б) тира-



онные прерыватели без сериес-трансформатора с жидким  
годом; в) игнитронные прерыватели.

В начале развития контактной сварки, когда этим методом  
единения металлических деталей пользовались, главным  
разом, для малоуглеродистых сталей, включение и выключе-  
е сварочного тока производилось с успехом однополюсным  
бильником от руки, а затем педальным рубильником, пред-  
вляющим собой однополюсный рубильник, включающийся  
жной педалью каждый раз после предварительного обжатия  
приваемой детали. Подобные типы прерывателей не обеспе-  
ают в какой-либо степени одинаковую продолжительность  
мени сварки каждой детали. Последнее зависит исключи-  
тельно от навыков сварщика и не поддается контролю.

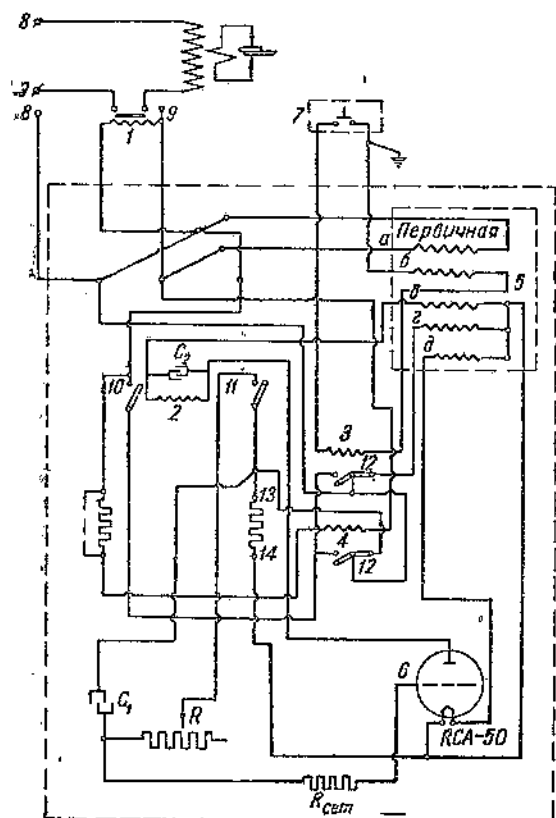
Дальнейшее развитие механических прерывателей пошло  
двум направлениям: 1) по пути применения кулачковых  
анизмов, вращающихся от мотора, и 2) по пути применения  
вершенствованных магнитных контакторов. Наиболее широ-  
е применение в последнее время нашли при точечной, рельеф-  
й и стыковой сварках токопрерыватели с применением кон-  
тора. Эти токопрерыватели имеют различные схемы управ-  
ния только вспомогательных электрических цепей, но ток  
вичной обмотки в этих схемах разрывается всегда контак-  
ом. Различные схемы сварочных машин с применением  
такторных токопрерывателей были показаны выше при раз-  
е отдельных типов сварочных машин. Из всех прерывателей  
такторного типа наибольший интерес представляет преры-  
ель типа Катлер-Гаммер, в котором применяется электрон-  
лампа и система трех реле для управления продолжитель-  
тью сварочного процесса.

## 72. Прерыватель фирмы Катлер-Гаммер (США)

Токопрерыватель Катлер-Гаммер (Cutler-Hammer) (фиг. 183)  
гоит из двух отдельных аппаратов: двухполюсного свароч-  
о контактора и прибора, управляющего включением и вы-  
чением контактора на определенную заданную продолжи-  
ьность времени сварки. Этот прерыватель предназначен,  
зным образом, для применения к машинам точечной, стыко-  
и рельефной сварки.

Управление контактором сводится здесь к включению и вы-  
чению тока в обмотке *I* электромагнита сварочного конта-  
ра. Для этой цели применяются электронная лампа и вспомо-  
льное реле. Как только клеммы 8 и 9 приключены к на-  
жению сети, автоматически включается первичная обмотка *a*  
гообмоточного трансформатора малой мощности. Обмотка *b*  
го трансформатора соединена последовательно с электро-  
витной катушкой реле 2, а также с анодной цепью электрон-  
лампы. Реле 2 имеет два контакта 10 и 11, замкнутые  
чно при отключенном напряжении сети, т. е. когда в ка-  
ке реле 2 не протекает ток. С приключением трансформра-

тора к напряжению сети включается анодная цепь лампы, и реле 2 размыкает свои контакты 10 и 11. Катушка *b* питает обмотку реле 2 через электронную лампу с момента приключения аппарата к напряжению сети. Обмотка *d* питает цепь накала лампы.



Фиг. 183. Электрическая схема магнитного прерывателя фирмы Катлер-Гаммер.

1 — сварочный контактор; 2 — промежуточное реле; 3, 4 — быстродействующие реле; 5 — многообмоточный трансформатор малой мощности; 6 — электронная лампа с управляемой сеткой; 7 — кнопка включения; 8, 9 — клеммы; 10, 11 — контакты промежуточного контактора; 12 — якорь реле 3 и 4; 13, 14 — омическое сопротивление.

щим действием полуволны напряжения от обмотки трансформатора через участок сетка—катод лампы 6. Потенциалы на конденсаторе распределяются так: минус к сетке, а плюс к катоду.

Как было указано выше, при прохождении тока через анодную цепь лампы и катушки реле 2 контакты 10 и 11 удерживаются в разомкнутом состоянии, следовательно, при зарядке конденсатора сопротивление *R* будет отключено от конденсатора *C*<sub>1</sub> контактом 11. Чтобы включить сварочный контактор и начать сварку, необходимо выключить реле 2. Это достигается тушением электронной лампы путем подачи на ее сетку отри-

Характеристика лампы подобрана таким образом, что она пропускает полный анодный ток. При этом обмотка сварочного контактора 1 остается еще разомкнутой, что легко проследить по схеме.

К сетке электронной лампы приключен гридлик (конденсатор *C*<sub>1</sub> и переменное омическое сопротивление *R*). Назначение гридлика состоит в том, чтобы в нужный момент подать накопленный на конденсаторе отрицательный запирающий потенциал на сетку лампы. Подбором параметров емкости и сопротивления регулируется время зарядки конденсатора.

Как только электронная лампа начинает пропускать ток, происходит зарядка конденсатора, обусловленная выпрямляю-

пательного напряжения смещения от конденсатора  $C_1$ . Теперь продолжительность сварки будет зависеть от того, как долго лампа окажется запертой. Время запираения сетки лампы определяется параметрами  $R$  и  $C_1$  согласно уравнению

$$T = -RC_1 \ln \left( 1 - \frac{U_c}{U_{ист}} \right) \text{ сек.},$$

где  $U_c$  — напряжение на конденсаторе,  
 $U_{ист}$  — напряжение на обмотке  $z$ .

Постоянная времени  $\tau = RC_1$ . Разряд конденсатора происходит на сопротивлении  $R$ .

Чтобы включить сварочный контактор  $I$  и начать сварку, замыкают вначале кнопку  $7$ . Катушка вспомогательного реле  $3$  оживляется током от обмотки  $b$ , размыкает свой правый контакт и одновременно включает левый контакт. Конденсатор  $C_1$  при этом отключается от обмотки  $z$  и остается включенным между сеткой и катодом через сопротивление  $13, 14$ . Отрицательный потенциал, приключенный к сетке, оказывается достаточным для запираения лампы, анодный ток в ней прекращается, и реле  $2$  освобождает якорь, благодаря чему контакты  $10$  и  $11$  замыкаются. С этого момента включается обмотка сварочного контактора, и начинается сварочный процесс. Сварка прекратится только тогда, когда запирающий потенциал конденсатора снизится до величины, при которой лампа вновь зажжется. При включении контакта  $11$  происходит одновременно параллельное включение сопротивления  $R$  к емкости  $C_1$ , поэтому с начального момента сварки происходит разряд конденсатора  $C_1$  на сопротивление  $R$ , и в зависимости от величины сопротивления происходит быстрая или медленная разрядка конденсатора. После разрядки конденсатора его потенциал падает, и лампа загорается вновь.

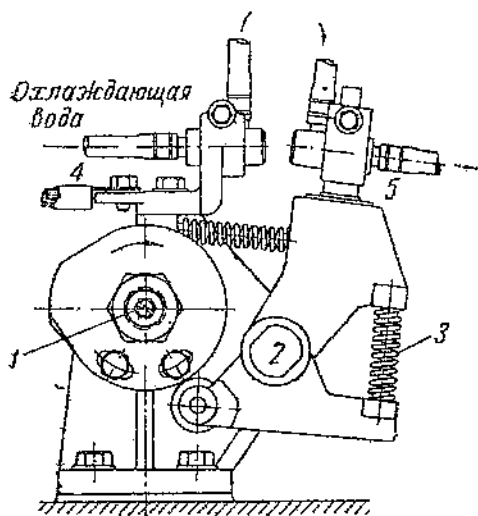
Следует еще отметить, что контакты реле  $4$  соединены параллельно с контактами реле  $3$  и блокируют последнее, так как реле  $3$  мгновенно замыкает левый контакт и вновь принимает исходное положение сразу после нажатия кнопки.

Обмотка реле  $4$  питается от сети и приключена параллельно к обмотке сварочного контактора  $I$ . Когда обмотка реле  $4$  оживляется током в начальный момент сварки, происходит одновременно включение левого и выключение правого его контактов, благодаря чему конденсатор  $C_1$  отключается от питающей его обмотки  $z$ . Вспомогательный конденсатор  $C_2$  служит для сглаживания тока неустановившегося режима в обмотке реле  $2$ .

Этот прерыватель обеспечивает устойчивую продолжительность процесса сварки, начиная от 0,10 до 2 сек. Время сварки предварительно устанавливается при помощи переменного сопротивления  $R$  с широкой регулировкой.

## 73. Кулачковые прерыватели

Все кулачковые прерыватели обычно вращаются от мотора. Принцип действия такого прерывателя показан на чертеже фиг. 184. На валу мотора 1 насажен кулачок, собранный из отдельных пластин. Левый электрод укреплен неподвижно, правый укреплен в стержне, вращающемся в колене на оси 2. Нижний стержень с роликом на конце притягивается пружиной 3 к кулачку. Как только ролик набегает на выступ кулачка, правый электрод перемещается



Фиг. 184. Кулачковый токопрерыватель.

влево и приходит в соприкосновение с неподвижным левым электродом. Продолжительность времени касания этих двух электродов определяет время сварки. Шайбы кулачка изготавливаются таким образом, что длина дуги его выступа может изменяться в зависимости от необходимого времени сварки. К клеммам 4 и 5 электродов подключают последовательно первичную обмотку сварочного трансформатора. Наиболее удачным следует считать применение кулачкового выключателя для коммутирования тока

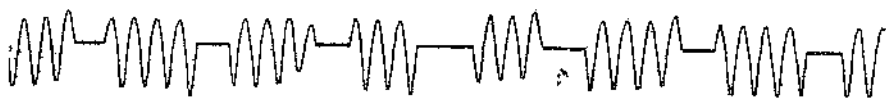
в цепи электромагнита обычного контактора (механо-магнитный прерыватель), имея в виду, что современные контакторы с магнитным гашением вольтовой дуги выдерживают большое количество включений весьма надежно.

## 74. Точность работы механических токопрерывателей

Синхронные ионные прерыватели позволяют весьма точно производить включение и выключение сварочного процесса на определенной, заранее заданной точке синусоидальной волны напряжения. Механические токопрерыватели являются асинхронными, т. е. каждое включение сварочного тока происходит произвольно и не синхронизировано с напряжением сети, поэтому моменты включения для каждой точки не совпадают между собой и происходят в различные точки волны напряжения.

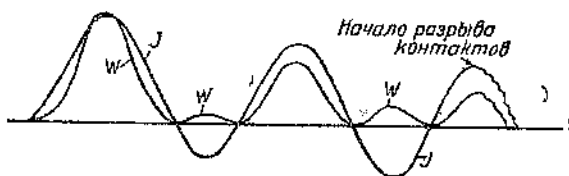
Осциллограмма тока при роликовой сварке, произведенной механическим прерывателем, представлена на фиг. 185. На этой осциллограмме легко заметить, что число периодов тока на каждую сварную точку неодинаково, поэтому время каждой

аузы также различно. Включение сварочного процесса происходит в различных точках волны напряжения. В связи с этим агрегирование каждой точки производится различным количеством епла, что безусловно влияет на результат сварки.



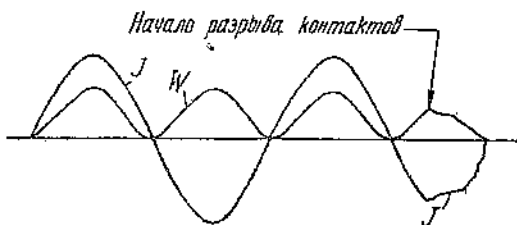
иг. 185. Осциллограмма тока при роликовой сварке, произведенной механическим прерывателем.

Чтобы представить себе, насколько асинхронное включение оличественно отражается на сварочном процессе, обратимся ля сравнения к осциллограммам, снятым для точечной сварки с применением механического прерывателя (иг. 186 и 187) и ионного (иг. 188). На каждой из этих осциллограмм записано две кривых: тока и мощности.

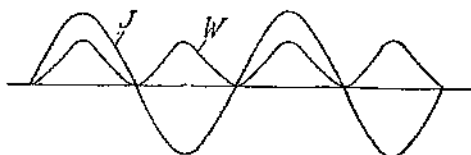


Фиг. 186. Осциллограммы тока и мощности для механического прерывателя при точечной сварке.

Механический прерыватель отрегулирован на включение сварочного тока длительностью в 2 пер. На иг. 186 показаны кривые тока и мощности при точечной сварке, где вместо необходимого времени сварки 2 пер. синусоидального тока действительная энергия в  $W$  сек., численная по данной кривой мощности, оказалась на 95% больше данной. Здесь сказались два фактора — режим в момент включения и запоздание момента окончательного выключения.



Фиг. 187. Осциллограммы тока и мощности для механического прерывателя.



Фиг. 188. Осциллограммы тока и мощности для ионного прерывателя.

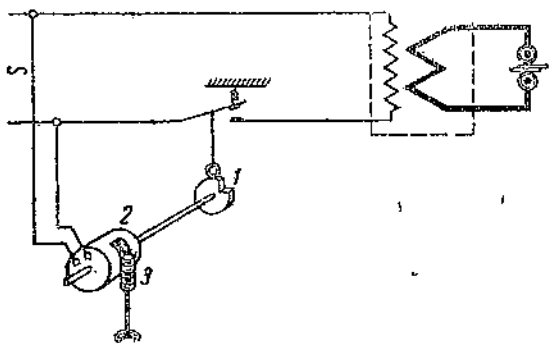
На фиг. 187 показана осциллограмма тока и мощности, где включение механическим прерывателем произошло раньше заданного времени (2 пер.); энергия в  $W$  сек. оказалась при этом 12% меньше заданной. Наконец, на фиг. 188 даны кривые тока и мощности, снятые при включенном ионном прерывателе

в первой цепи сварочного трансформатора. В данном случае время сварки точно равно заданным 2 пер.

Сравнивая последние три осциллограммы между собой, легко убедиться, что применение механических или магнитных прерывателей для малых времен сварки связано с большой погрешностью, достигающей в данном случае 95%. Величина погрешности будет еще больше, если прерыватель будет установлен на меньшее время сварки (порядка 1 пер. тока). Наоборот, чем больше время сварки, тем меньше относительная ошибка. Поэтому для контактной сварки сталей, где время сварки достигает целых секунд, механический прерыватель позволяет проводить сварочный процесс с достаточной для них точностью.

## 75. Механический прерыватель с синхронным моторчиком

Следующим типом токопрерывателей является механический токопрерыватель, вращающийся от синхронного мотора. Схема такого прерывателя показана на фиг. 189. Этот прерыватель



Фиг. 189. Схема механического прерывателя с синхронным моторчиком.

1 — кулачок; 2 — синхронный моторчик; 3 — червячный механизм, позволяющий производить перемещение статора при работе мотора по направлению или против направления вращения.

отличается от обычных прерывателей тем, что вращается от синхронного моторчика, у которого статор может быть перемещен относительно ротора. На валу мотора посажен кулачок (или шайба с сегментом), на котором производятся периодические замыкания скользящих по сегменту токоведущих щеток. Предполагалось, что моторчик, вращающийся синхронно с частотой напряжения сети,

позволит устанавливать систематическое включение сварочного тока в начальных углах синусоидальной волны тока, а выключение — в момент перехода волны тока через нулевое значение; точную регулировку момента выключения мыслилось производить при помощи перемещения статора мотора относительно ротора. Таким образом удалось бы избежать образования вольтовой дуги при каждом выключении сварочного тока. Однако на практике не удалось достичь желаемых результатов. Причины неудачи заключаются в том, что угол сдвига волны тока по отношению к волне напряжения, характеризующийся  $\cos \varphi$ , не остается строго постоянным при контактной сварке. Некоторое изменение  $\cos \varphi$  происходит не только с переключением ступени мощности, но и благодаря незначительному на первый взгляд изменению сопротивления сварочного

контакта. Изменение сопротивления во вторичном контуре по своей абсолютной величине (даже порядка  $10^{-5}$  Ω) повлечет за собой изменение  $\cos \varphi$  машины. В связи с этим выключение тока прерывателем происходит не при нуле, как это было установлено вначале перед сваркой, а при некотором значении тока, вызывающем при этом незначительное вначале искрение при коммутировании тока. Такое искрение вызывает в свою очередь повышенное разогревание контактирующих электродов прерывателя, обгорание их, что затягивает процесс выключения до последующего перехода тока через нулевое значение. По мере незначительного хотя бы обгорания контактов прерывателя образовавшейся вольтовой дугой меняется также расстояние между контактами, а по ним и время протекания тока.

Дальнейший ход сварочного процесса вызывает еще большее искрение, обгорание контактов и изменение времени сварки. В результате указанных причин, а также инерции масс, существующие прерыватели с синхронным моторчиком работают асинхронно с частотой сети, как все прочие механические прерыватели.

Осциллограммы сварки на этом прерывателе при длительной работе и без регулировки ничем не отличаются от осциллограммы, приведенной на фиг. 186—188.

Завод „Электрик“ выпускает синхронный механический токопрерыватель для роликовой сварки системы инж. Катлера. Включение и выключение сварочного тока производится на разных металлических кольцах (коллекторах), а гашение дуги в момент выключения тока происходит при помощи включения конденсатора параллельно размыкающимся контактам.

Изменение угла сдвига между током и напряжением, происходящее в случае перемены режима сварки (степень мощности, состояние сварочного контакта, толщина материала, размеры окна внешнего контура и др.), не влияет на синхронизм выключения токопрерывателя, вследствие применения насыщенного дросселя особого устройства. Дроссель включается последовательно со сварочным трансформатором. Эта конструкция токопрерывателя позволяет получать безискровую коммутацию сварочного тока.

Длительность цикла (сварка плюс пауза) лежит в пределах 0,04—0,2 сек.

## Глава X

### ИОННЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

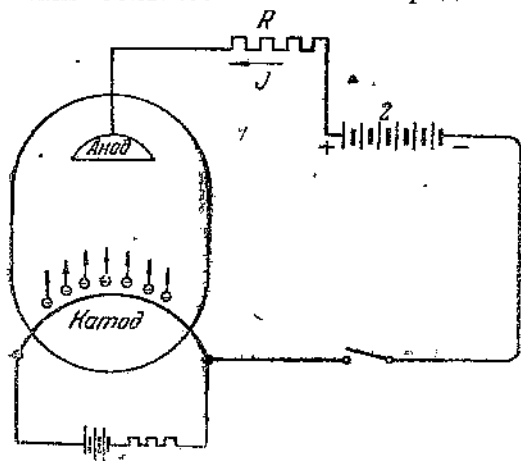
Прежде чем приступить к рассмотрению ионных синхронных прерывателей для контактной сварки, необходимо хотя бы в самой сжатой форме ознакомиться с основными видами выпрямителей, применяющихся в различных схемах синхронных прерывателей.

## 76. Принцип действия ионных выпрямителей

Вакуумные выпрямители представляют собой герметически закрытые сосуды, стеклянные или металлические, имеющие обычно два или большее число электродов. Из сосуда выкачивают

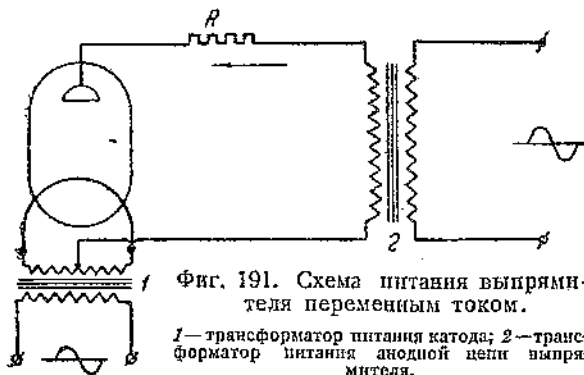
предварительно воздух до тех пор, пока давление в нем снижается до величины  $10^{-5} \div 10^{-7}$  мм рт. ст. Это составляет приблизительно  $10^{-8} \div 10^{-10}$  ат.

Один из электродов в сосуде, называемый катодом, накаливается до высокой температуры, благодаря которой происходит свободное излучение электронов в окружающее пространство. Накал катода в зависимости от типа выпрямителя производится различно. Например, в ртутных выпрямителях (с ртутным катодом) источником электронной эмиссии является вспомогательная вольтова дуга на поверхности ртути. Выпрямители типа вакуумных ламп имеют в качестве катода специ-



Фиг. 190. Ионные выпрямители. Схема питания выпрямителя постоянным током.

1 — батарея питания анодной цепи выпрямителя; 2 — батарея питания катода.



Фиг. 191. Схема питания выпрямителя переменным током.

1 — трансформатор питания катода; 2 — трансформатор питания анодной цепи выпрямителя.

альную металлическую нить, нагреваемую от постороннего источника электрическим током до температуры, при которой ее поверхность начинает излучать достаточное количество электронов. Второй электрод (холодный), помещенный в выпрямителе, носит название анода.

Если такой выпрямитель присоединить к напряжению постоянного тока (плюс к аноду и минус к катоду), то под воздействием электрического поля электроны, излучаемые катодом, будут двигаться от катода к аноду, как это схематически показано на фиг. 190. Но так как электроны представляют собой



отрицательно заряженные частицы, условились считать направление тока от анода к катоду.

С изменением полярности приложенного напряжения (минус (-) к аноду и плюс (+) к катоду) электроны, излучаемые катодом, возвратятся к нему обратно, и течение тока прекратится, т. е. цепь в данном случае окажется разомкнутой. Следовательно, в подобных выпрямителях токопрохождение возможно лишь в том случае, когда анод является положительным по отношению к катоду. При включении такого прибора в сеть переменного тока (фиг. 191) через него пройдет лишь положительный полупериод тока. Такая схема называется схемой полупериодного выпрямления.

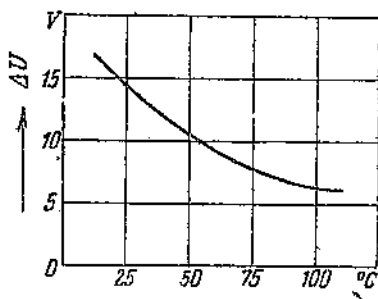
## 77. Газотрон

Газотрон представляет собой ионный выпрямитель, наполненный до некоторой степени или ртутными парами, образующимися от введенной в лампу одной или нескольких капель ртути, или каким-либо инертным газом (неон, аргон, гелий) после предварительной откачки воздуха из сосуда до возможного вакуума ( $10^{-5}$  —  $10^{-6}$  мм рт. ст.). Газотрон служит для выпрямления переменного тока сильноточных цепей в постоянный. Название газотрона определяется его газовым наполнением.

Основное преимущество газотрона перед двухэлектродным вакуумным выпрямителем (кекотроном) заключается в уменьшении падения напряжения в проводящем направлении независимо от пропускаемого тока, не выходя, конечно, за пределы тока, на который рассчитан данный выпрямитель. Второе преимущество газонаполненного прибора заключается в том, что он может быть построен на большие токи, достигающие сотни ампер.

В газотронах с ртутным наполнением давление насыщенных паров соответствует данной температуре. Благодаря зависимости давления от температуры применение ртутных газотронов возможно лишь в тех случаях, когда колебание температуры лежит в определенных пределах. Вне пределов этих температур ртутные газотроны меняют свои характеристики.

Зависимость падения напряжения выпрямителя от температуры показана на фиг. 192. Характеристика газотрона определяется температурой холодной части сосуда (нижней части горловины газотрона), так как от этого зависит давление паров ртути. Наиболее холодная часть колбы находится обычно вблизи ее основания. Область изменения температур, при которых может быть применен газотрон с ртутными парами, находится



Фиг. 192. Зависимость падения напряжения в выпрямителе от температуры его нагрева.

между 25 и 80°. Указанные значения температуры относятся к наиболее холодному месту колбы. Температура последнего превышает температуру окружающего воздуха приблизительно на 10°.

Падение напряжения в ртутном газотроне достигает в среднем 13 ÷ 15 V. В высоковольтных газотронах, наполненных инертным газом (неоном, аргонном), оно равно около 30 V.

Увеличение падения напряжения выпрямителя данной конструкции возможно в тех случаях, когда уменьшится ток эмиссии катода, что в свою очередь может произойти, когда напряжение накала слишком мало или же когда катод лампы служит слишком долгое время. В случае работы ртутного выпрямителя при низкой температуре происходит уменьшение давления ртутных паров внутри лампы, что также вызывает увеличение падения напряжения.

В табл. 54 даны основные параметры ртутных газотронов, изготавлиющихся в СССР.

Таблица 54

Характеристика ртутных газотронов

Элементы характеристики	Тип машины					
	ВГ-161	В-129	ВГ-130	ВГ-131	ВГ-126	ВГ-167
Максимальное значение тока, А . . .	1	1,5	4	10	40	100
Среднее значение тока, А . . . . .	0,35	0,6	1,3	3,5	15,0	35,0
Максимум запираемого напряжения, V	2 000	5 000	7 000	10 000	12 000	10 000
Напряжение накала, V . . . . .	2,5	2,5	2,5	5,0	5,0	5,0
Ток накала, А . . . . .	4,5—5,5	8—10	20—25	27—33	35—45	50
Время подогрева катода перед включением рабочего напряжения, мин.	2	5	5	5	10	20
Время прогрева после длительного бездействия, час . . . . .	1	1	1,5	4	2	2
Диаметр шаровой части, мм . . . . .	60	85	115	165	225	225
Максимальная высота, мм . . . . .	140	205	330	445	540	430
Средний срок службы, час . . . . .	800	800	600	600	800	800

78. Тиратрон

Тиратроном называется ионный газонаполненный выпрямитель с управлением анодного тока при помощи сетки.

Тиратроны отличаются от газотронов тем, что у них имеется, кроме анода и катода, еще третий электрод — сетка, расположенная конструктивно между анодом и катодом. Схематическое изображение тиратрона показано на фиг. 193. Сетка представляет собой электрод электровакуумного прибора, служащий для электрического управления током. Она имеет вид перфори-

рованного цилиндра, изготовленного из листового никеля или вольфрамовой проволоки и помещенного между анодом и катодом.

При отключенной сеточной цепи действие тиратрона не отличается от действия газотрона. Характеристика зажигания тиратрона определяется величиной заряда сетки относительно анода и катода, а также давлением газа в выпрямителе.

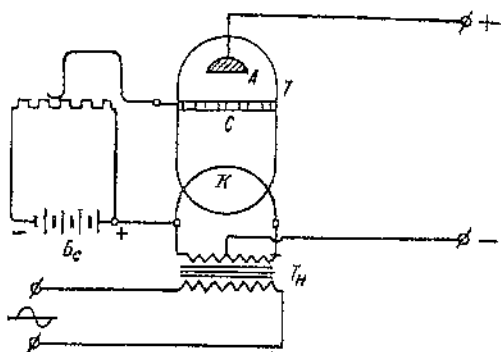
## 79. Роль сетки в тиратроне

Применение сетки в ионных выпрямителях позволило использовать их не только в качестве выпрямителей, но также для управления и регулирования различных силовых систем. Если сетка заряжена отрицательным потенциалом, то электроны, стремящиеся под влиянием приложенного напряжения от катода к аноду, встречая на своем пути сетку, отталкиваются от нее и возвращаются обратно в направлении к катоду. Естественно, что в этом случае разряда между анодом и катодом не будет, несмотря на положительный заряд анода. Чтобы препятствовать прохождению тока между анодом и катодом, необходимо, чтобы отрицательный заряд сетки был больше притягивающей силы поля анода (фиг. 194).

Если уменьшить потенциометром отрицательное напряжение на сетке (фиг. 193) до величины, превышающей силу притяжения поля анода, то некоторым электронам удастся прорваться через сеточное ограждение в направлении к аноду, и электронный ток выпрямителя возрастет (фиг. 195).

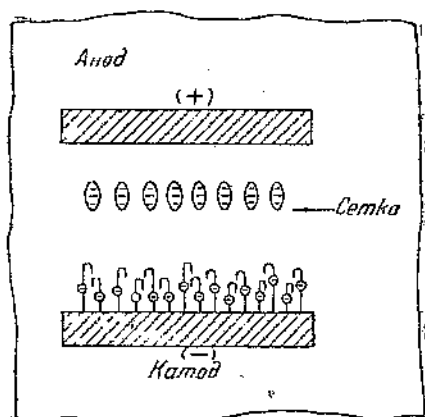
Если же изменить полярность сетки и зарядить ее положительным потенциалом, то возникнет дуга между анодом и катодом, и получится полный разряд.

При подаче положительного потенциала на сетку тиратрона



Фиг. 193. Схема включения тиратрона с сетки.

$T$  — тиратрон;  $A$  — анод;  $C$  — сетка;  $K$  — катод;  $T_n$  — трансформатор накала;  $B_c$  — батарея смещения сетки.

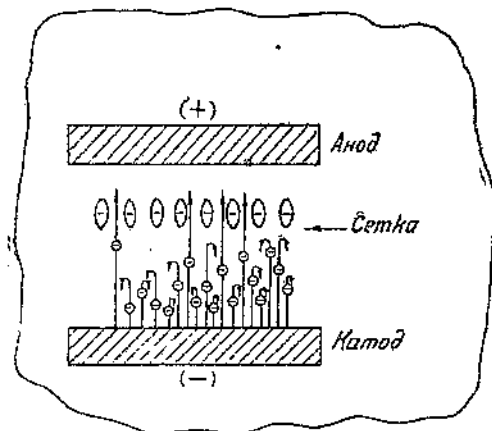


Фиг. 194. При большом отрицательном напряжении смещение на сетке тиратрона преграждает путь электронам.

возрастает сила электрического поля анода и происходит также увеличение энергии электрона. При столкновении электрона с молекулой газа происходит расщепление молекулы на электрон и ион. Новый электрон в промежутке между двумя столкновениями также накапливает энергию, достаточную для ионизации. При столкновении этого электрона с молекулой образуется новый электрон. Следовательно, при достаточном анодном напряжении начнется лавинообразное нарастание количества свободных электронов, стремящихся под влиянием анодного поля к аноду, при этом образуется ток в тиратроне.

Положительно заряженные ионы под действием анодного поля стремятся к катоду. Скорость движения ионов вследствие большой массы невелика, поэтому ионный ток представляет небольшую составляющую анодного тока.

Как только тиратрон зажжется, прекращается управляющее действие сетки. Подавая отрицательный потенциал на сетку тиратрона во время разряда, не удастся прекратить горение тиратрона, даже если величина отрицательного потенциала окажется в несколько раз больше первоначальной величины запирающего напряжения сетки. Прекращение управляющего действия сетки объясняется тем, что



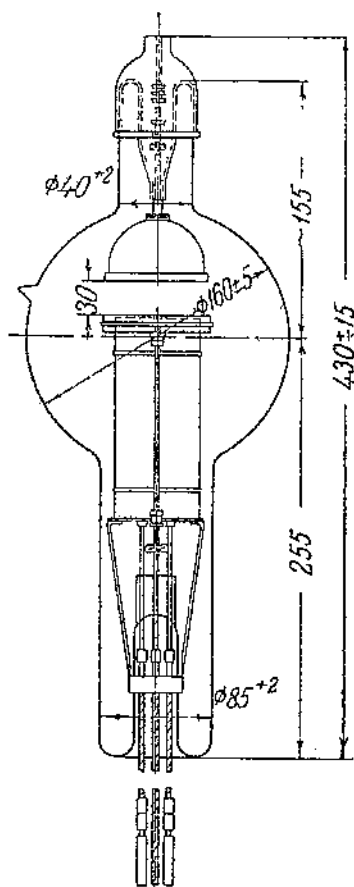
Фиг. 195. При малом отрицательном напряжении на сетке некоторые электроны проскакивают через сетку.

положительные ионы, заполняющие весь объем тиратрона после его зажигания, окружают сетку со всех сторон.

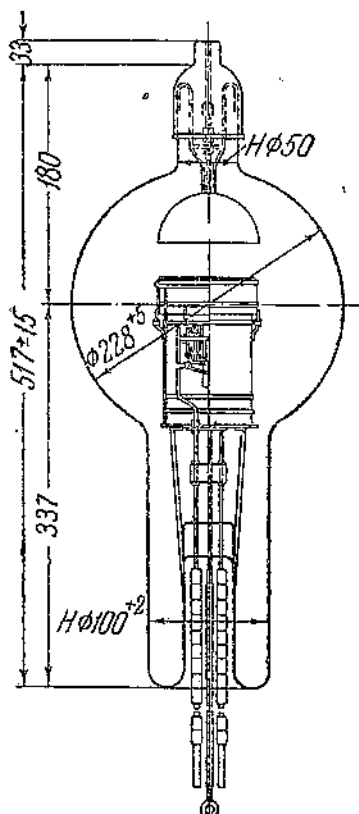
Ионы, подходя к отрицательно заряженной сетке, присоединяют к себе недостающий им электрон и превращаются в нейтральную молекулу. Вследствие теплового движения частиц нейтральная молекула будет диффундировать от сетки, уступая место другим ионам. Следовательно, во время разряда в тиратроне ионы все время нейтрализуют отрицательные заряды сетки и препятствуют гашению тиратрона. Следовательно, сетка открывает токопрохождение (разряд) выпрямителя и позволяет при этом регулировать величину протекающего тока. Свое название „тиратрон“ выпрямитель получил от греческого слова „тира“, означающего дверь. В данном выпрямителе сетка, открывающая токопрохождение в приборе, выполняет роль двери.

Наименьшее значение приложенного к сетке напряжения, при котором разряд между электродами не возникает (анодный ток равен нулю), называется запирающим потенциалом сетки. Величина запирающего потенциала меняется в зависимости от приложенного анодного напряжения.

Таким образом, в отличие от электронных ламп, сетки в тиратронах могут только препятствовать возникновению разряда и фиксировать начало его возникновения. Но после возникновения разряда между анодом и катодом сетка уже не в состоянии повлиять на процесс протекания тока в тиратроне путем подачи ей отрицательного напряжения смещения. Это объ-



Фиг. 196. Тиратрон ТГ-204.



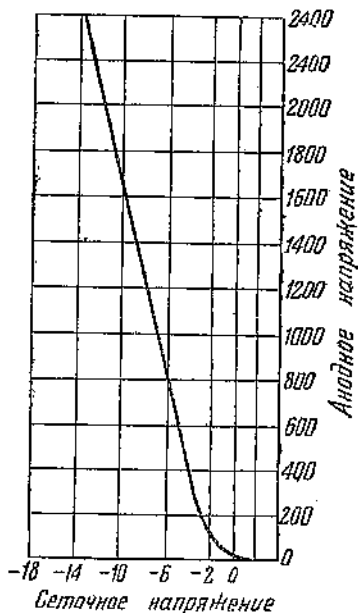
Фиг. 197. Тиратрон ТГ-162.

ясняется тем, что с момента появления разряда в пространстве между анодом и катодом получается примерно одинаковое количество электронов и положительных ионов; последние нейтрализуют электроны, и, следовательно, пространственного заряда здесь не будет. В связи с этим отрицательно заряженная сетка не может повлиять на ход разряда.

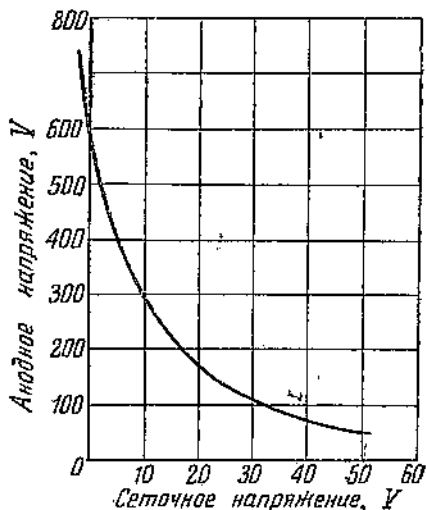
Прекращение разряда в газотроне или тиратроне, включенных в схемах постоянного тока, возможно двояким образом: либо надо уменьшить ток до нуля и разорвать анодную цепь,

либо уменьшить анодное напряжение до величины, меньшей значения падения напряжения в тиратроне.

Тиратрон, включенный в цепь управления переменного тока, действует как выпрямитель и восстанавливает непрерывно свою управляемость благодаря периодическому изменению полярности анодного напряжения, а также уменьшению величины анодного тока при каждом периодическом переходе через нулевое значение. На фиг. 197 показано два вида тиратронов на силу тока в 10 и 40 А.



Фиг. 198. Изменение анодного напряжения зажигания тиратрона в зависимости от величины отрицательного напряжения на сетке.



Фиг. 199. Характеристика зажигания тиратрона в зависимости от положительного заряда сетки.

Изменение величины анодного напряжения, достаточного для начала разряда в тиратроне, в зависимости от значения отрицательного смещения сетки тиратрона показано на фиг. 198. Следующий вид характеристики зажигания тиратронов в зависимости от положительного потенциала на сетке показан на фиг. 199. Из этой характеристики видно, что с увеличением величины положительного потенциала на сетке тиратрона анодное напряжение, при котором он зажигается, резко падает. Промежуток времени или длительность зажигания и потухания тиратрона соответственно называются временем ионизации и временем деионизации. Ионизация газа и возникновение разряда происходят в очень малые промежутки времени, определяемые примерно от 1 до 50  $\mu$ S (микросекунд). Время, необходимое для прекращения токопрохождения и потухания тиратронов (деионизация), определяется 0,001 сек. Названные цифры показывают, что схемы с применением тиратронов должны быть рассчитаны так,

чтобы они успевали деионизироваться до момента подачи следующего положительного импульса напряжения на анод.

Средняя продолжительность службы тиратронов равна 800 час. Основные параметры тиратронов, изготовляющихся в СССР, даны в табл. 55.

Таблица 55

Электрические параметры тиратронов

Элементы характеристики	Тип тиратронов				
	ТГ-160	ТГ-205	ТГ-203	ТГ-204	ТГ-162
Напряжение накала, V . . . . .	2,5	2,5	2,5	5	5
Максимальный импульс тока, А	1	1,5	4	10	40
Ток накала, А . . . . .	4,5—5,5	8—10	20—25	27—33	35—45
Наибольшее значение выпрямленного тока (среднее значение), А . . . . .	0,36	0,6	1,3	3,5	15
Максимальное регулируемое напряжение, V . . . . .	750	750	2250	2250	3500
Ширина пусковой области, V	2	3	5	5	5
Рекомендуемое сопротивление в цепи сетки, Ω . . . . .	10 <sup>3</sup> —10 <sup>6</sup>	10 <sup>3</sup> —10 <sup>5</sup>	10 <sup>3</sup> —10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup> —10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup> —5·10 <sup>3</sup>
Амплитуда обратного напряжения, V . . . . .	1000	1000	3000	3000	5000
Время прогрева в эксплуатации, мин. . . . .	2	5	5	10	20
Время прогрева после хранения, час. . . . .	1	1	1,5	2	2

Падение напряжения на тиратроне колеблется в пределах 10—15 V. Коэффициент полезного действия ионного выпрямителя вычисляется по известной формуле:

$$\eta = \frac{(U - e)I}{U \cdot I},$$

где  $U$  — напряжение цепи;  $I$  — ток нагрузки;  $e$  — падение напряжения в выпрямителе.

Постоянное падение напряжения на ртутном тиратроне принято в среднем равным 13 V. Из этой формулы видно, что с повышением напряжения сети к.п.д. возрастает. В случае сетевого напряжения, равного 380 V,

$$\eta = \frac{380 - 13}{380} = 0,965;$$

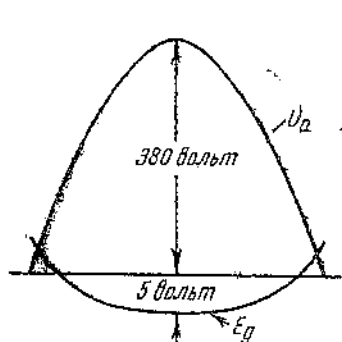
при  $U = 220$  V

$$\eta = 0,94.$$

## 80. Схемы управления сеточной цепи тиратрона

В цепях переменного тока регулирование тиратронов можно производить двумя различными способами: 1) изменением величины сеточного напряжения тиратрона и 2) сдвигом фазы сеточного напряжения по отношению к анодному напряжению.

Приняв напряжение  $U_a$  переменного тока, подведенного к аноду тиратрона, синусоидальным, необходимое сеточное напряжение, вызывающее зажигание тиратрона в момент подачи зажигательного потенциала в любой точке волны положительного полупериода анодного напряжения, может быть представлено кривой  $E_g$ , называемой кривой критического сеточного напряжения. Эта кривая изображена на фиг. 200.



Фиг. 200. Кривая критического напряжения зажигания тиратрона.  $U_a$  — напряжение, приложенное к аноду тиратрона.  $E_g$  — критическое сеточное напряжение.



Фиг. 201. Зажигание тиратрона от импульса постоянного тока, приложенного к сетке.

Если сеточное напряжение зажигания ниже критической кривой, то тиратрон не зажжется. Если же довести сеточное напряжение до критического значения и выше, то тиратрон зажигается при данном мгновенном значении анодного напряжения и будет гореть до момента перехода тока через нулевое значение. Такая регулировка анодного тока от импульса постоянного тока, поданного на сетку, например через вращающуюся шайбу, показана на фиг. 201.

Этот метод позволяет в некоторой степени регулировать средний ток тиратрона. Однако этим методом пользуются большей частью лишь для включения тока. В качестве метода регулировки величины тока он мало пригоден вследствие малого его диапазона, ограниченного пологой частью критической кривой.

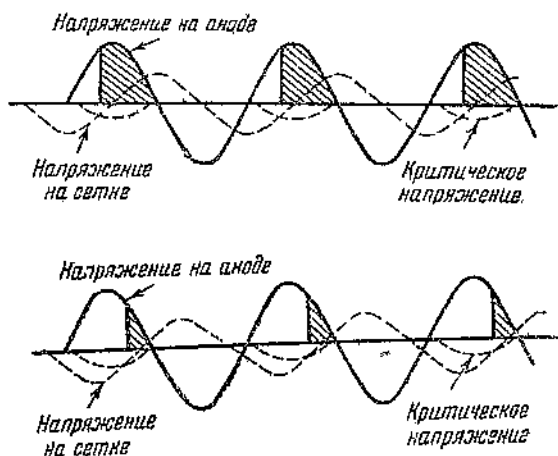
Второй метод регулировки анодного тока осуществляется подачей на сетку тиратрона переменного напряжения с постоянной амплитудой, фаза которого сдвигается по отношению



к анодному напряжению  $U_a$ . Такой способ регулировки среднего значения анодного тока был впервые предложен французским инж. Тулоном (P. Toulon). Как показано на фиг. 202—203, этот метод позволяет регулировать ток анода в широких пределах.

Существуют различные способы сдвига фаз сеточного напряжения. Здесь будут рассмотрены лишь два основных вида, получившие наибольшее распространение в промышленности.

На фиг. 204 представлена схема регулирования момента зажигания тиратрона при помощи магнитного фазорегулятора, представляющего собой заторможенный асинхронный двигатель с фазным ротором. Как видно из схемы, отрицательный потенциал смещения сетки получает от аккумуляторной батареи. Зажигательный потенциал подается на сетку в момент, когда напряжение на аноде имеет положительный знак. В приведенной схеме управление сдвигом фаз производится вручную.



Фиг. 202, 203. Изменение момента зажигания тиратрона путем сдвига фазы сеточного напряжения (переменного тока).

Возможный диапазон регулировки анодного тока тиратрона в зависимости от угла сдвига фазы сеточного напряжения показан на графике фиг. 205. Средний протекающий через тиратрон ток может быть найден из выражения

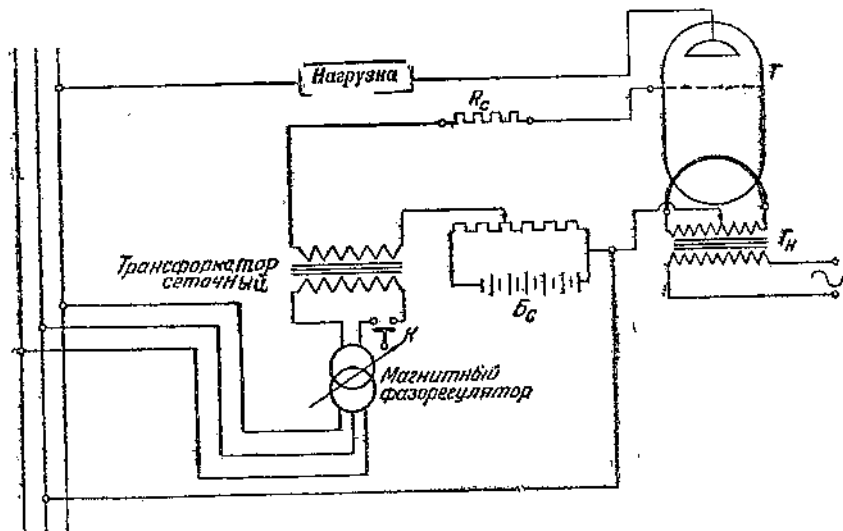
$$I_{cp} = I_{ампл} \cdot \frac{1 + \cos \alpha}{\pi}, \quad (82)$$

где  $\alpha$  — угол, при котором начинает проходить ток, или угол запаздывания разряда выпрямителя.

Вторым способом сдвига фазы сеточного напряжения является схема электрического мостика, составленная из омического сопротивления или самоиндукции и емкости. Схема мостика более компактна и дает при этом такие же результаты, как и магнитный фазорегулятор.

На фиг. 206 представлена схема регулирования тока тиратрона при помощи статического фазорегулятора. Напряжение приключено к клеммам  $A-C$ . Из точек  $O-B$  напряжение подводится к сеточной цепи. Складывая векторно напряжения  $E_c$  и  $E_R$  (см. векторную диаграмму на этой же фигуре), получаем общее напряжение, приложенное к потенциометру. С изменением

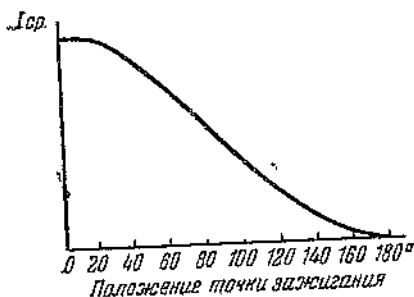
величины сопротивления  $R$  сдвигается фаза напряжения, подведенного к сетке. Чем больше сопротивление  $R$  при данной емкости, тем больше угол сдвига фазы сеточного напряжения.



Фиг. 204. Схема регулирования момента зажигания тиратрона при помощи магнитного фазовращателя.

$T$  — тиратрон;  $T_n$  — трансформатор накала;  $R_c$  — сопротивление внешней цепи сетки;  $B_c$  — батарея отрицательного смещения потенциала сетки;  $K$  — кнопка или коммутатор.

С уменьшением величины сопротивления  $R$  до нуля фаза сеточного напряжения будет совпадать с фазой анодного напряжения, и выпрямитель зажжется в начальных углах волны напряжения.



Фиг. 205. Изменение среднего тока в тиратроне в зависимости от момента его зажигания.

Векторная диаграмма статического фазовращателя показана на этой же фигуре. Напряжение сети определяется вектором  $\vec{A}-\vec{C}$ . Падения напряжения на конденсаторе  $C$  и на реостате  $R$  определены соответствующими векторами, изменяющимися по мере изменения их параметров. Вектор  $\vec{O}-\vec{B}$  имеет переменный угол и может изменяться на  $180^\circ$ , однако, по своей абсолютной величине остается неизменным.

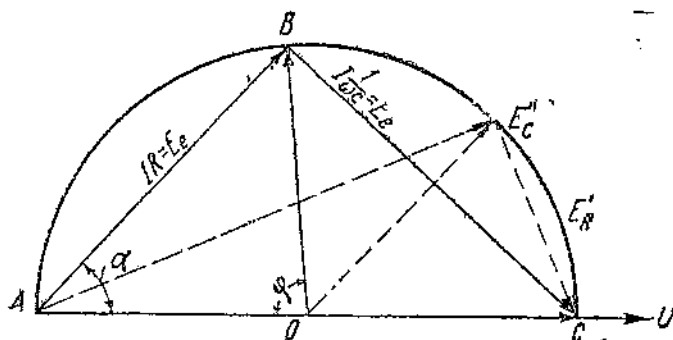
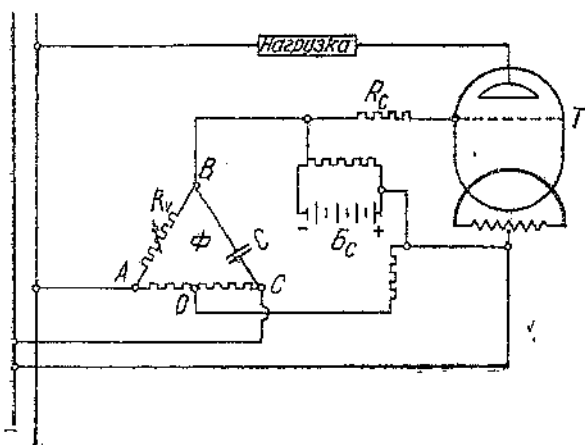
Вычисление необходимых параметров мостика (сопротивление и емкость или сопротивление и индуктивность) производится, таким образом, из равнобедренного треугольника  $ABO$ .

Находим

$$\pi - \varphi = 2\alpha;$$

$$\varphi = \pi - 2\alpha,$$

где  $\varphi$  — угол сдвига фаз между током и напряжением в цепи вторичной обмотки трансформатора.



Фиг. 206. Схема регулирования тока в тиратроне путем включения статического фазовращателя в цепь сетки.

$\Phi$  — статический фазовращатель;  $T$  — тиратрон;  $B_C$  — батарея смещения потенциала сетки;  $R_C$  — ограничительное сопротивление сетки.

Затем из треугольника  $ABC$  определяем

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{R_{\omega} C}.$$

Следовательно, интересующий нас угол сдвига

$$\varphi = \pi - 2 \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{1}{R_{\omega} C}.$$

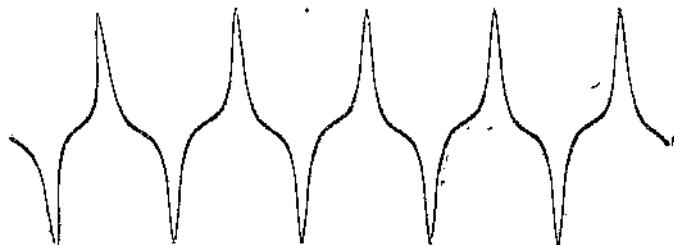
*Пример.* Вычислить величину сопротивления для сдвига фазы напряжения зажигания на угол  $\varphi = 90^\circ$ , если емкость конденсатора  $C = 4\mu\text{F}$ .

$$\alpha = \frac{\pi - \varphi}{2} = 45^\circ; \operatorname{tg} 45^\circ = 1,$$

откуда

$$R = \frac{1}{\omega C} = \frac{10^6}{314 \times 4} = 800 \Omega.$$

Для более четкой фиксации момента зажигания выпрямителя применяют сеточный трансформатор специальной конструкции, дающий вместо синусоидальной кривой вторичного напряжения острую пикообразную кривую напряжения зажигания на сетку.



Фиг. 207. Оциллограмма импульсного (пикового) напряжения сеточного трансформатора.

Кривая импульсного напряжения такого трансформатора показана на фиг. 207. Такая кривая напряжения получается благодаря применению трансформатора с насыщенной магнитной системой.

### 81. Ртутный выпрямитель

Ртутный выпрямитель представляет собой ионный газонаполненный прибор с ртутным катодом, применяемый для выпрямления сильных переменных токов.

Ртутный выпрямитель отличается от других выпрямителей тем, что у него в качестве катода служит ртуть, налитая на дне сосуда. В резервуаре выпрямителя впамяно несколько главных электродов (аноды) и в случае мощных выпрямителей еще два вспомогательных электрода. Ртутный выпрямитель обладает двумя преимуществами. Ртутный катод при дуговом разряде (имеющем место в таком выпрямителе) представляет собой неограниченный источник электронной эмиссии. Этого преимущества лишены выпрямители с горячим катодом, у которых оксидный катод не выдерживает нагрузки, большей эмиссионной способности нити накала.

Резервуар выпрямителя имеет обычно большую поверхность, для того чтобы пары ртути могли конденсироваться. Конденсация должна происходить быстро, иначе возрастет давление паров и возникнет большая вероятность обратного зажигания.

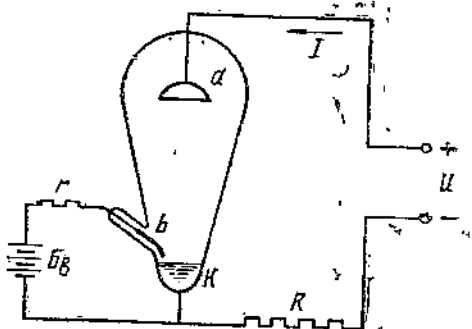
Второе преимущество ртутного катода — это его долговечность. Испаряемая ртуть при работе конденсируется на холодных стенках резервуара и возвращается вновь к катоду.

На фиг. 208 представлена схема однофазного выпрямителя с независимым возбуждением от вспомогательного электрода  $B$ . Если к выпрямителю подвести рабочее напряжение от источника электроэнергии  $U$ , то через него ток не пойдет. При горении вспомогательной вольтовой дуги на поверхности катода образуется катодное пятно с высокой температурой, являющееся мощным источником излучения свободных электронов. Стоит только вызвать вольтову дугу между вспомогательным электродом и ртутным катодом  $K$ , как между анодом  $a$  и катодом  $K$  возникнет разряд, и в цепи анода потечет ток  $I$ , ограниченный сопротивлением  $R$ . Если к выпрямителю приложено напряжение переменного тока, то в момент, когда на аноде плюс, а на катоде минус, между анодом и катодом будет проходить электрический разряд. В начале полупериода, когда значение напряжения меньше величины, называемой порогом зажигания, скорость движущихся электронов от катода к аноду под влиянием электрического поля недостаточна, чтобы ионизировать атомы паров ртути, поэтому незначительная величина тока, проходящего через выпрямитель, обусловлена только электронной эмиссией, излучаемой горячим катодом. При этом значение тока очень мало вследствие появления отрицательного объемного электронного заряда.

По мере возрастания напряжения между анодом и катодом до величины напряжения зажигания скорость электронов, летящих от катода к аноду, достигает значения, достаточного для ионизации паров ртути, и выпрямитель загорается, пропуская полную величину тока; в прохождении тока через выпрямитель кроме электронов участвуют также и ионы.

Как только выпрямитель зажегся, падение напряжения на нем снижается, а сила тока возрастает до величины, ограниченной сопротивлением внешней цепи выпрямителя. После зажигания дуги в выпрямителе образовавшиеся в нем ионы увлекаются полем к катоду и бомбардируют пятно. От ударов ионов о катод выделяется тепло, поддерживающее его температуру достаточно высокой для испускания необходимой электронной эмиссии.

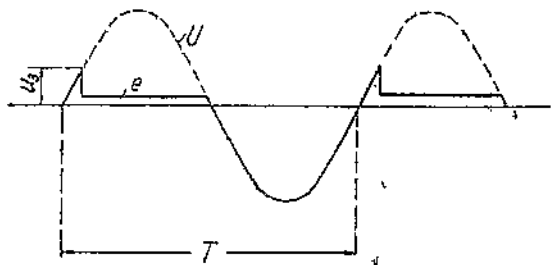
Рассматриваемый процесс зажигания дуги характеризуется



Фиг. 208. Схема включения ртутного выпрямителя.

$a$  — анод выпрямителя;  $K$  — ртутный катод;  $b$  — вспомогательный электрод;  $B$  — батарея вспомогательного зажигания;  $r$  — ограничительное сопротивление зажигания;  $R$  — сопротивление в анодной цепи.

кривой изменения напряжения, указанной на фиг. 209. Пунктирная часть кривой показывает форму волны приложенного напряжения.

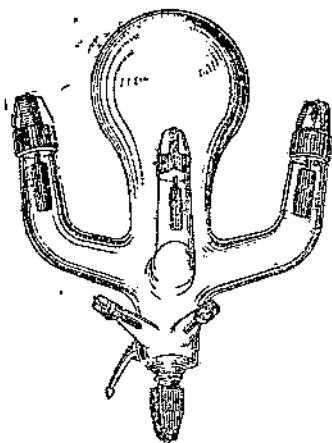


Фиг. 209. Изменения напряжения на аноде выпрямителя в момент зажигания и горения дуги.  $U$  — напряжение, приключенное к выпрямителю;  $U_0$  — напряжение зажигания выпрямителя;  $e$  — падение напряжения в момент горения.

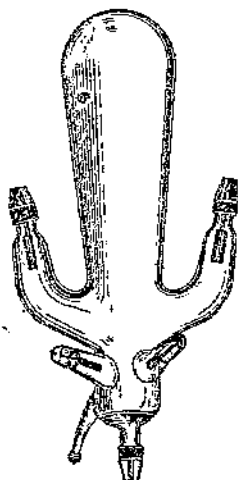
На фиг. 210 показан ртутный выпрямитель типа ЗВН-100 с допустимой силой тока в 100 А. Выпрямитель имеет три главных (рабочих) анода и два вспомогательных для независимого возбуждения расположенных ниже рабочих электродов.

Шарообразная часть колбы служит для конденсирования паров ртути. Кроме указанных электродов у катода впаян еще небольшой стеклянный отросток, наполненный также ртутью. Этот ртутный электрод служит вспомогательным анодом в момент зажигания.

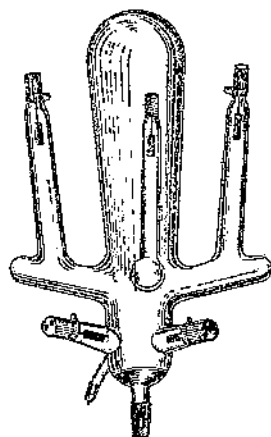
Шарообразная часть колбы служит для конденсирования паров ртути. Кроме



Фиг. 210. Ртутный выпрямитель типа ЗВН-100 с тремя рабочими анодами и двумя анодами независимого возбуждения.



Фиг. 211. Ртутный выпрямитель типа ЗВН-20 с двумя рабочими анодами и двумя анодами независимого возбуждения.



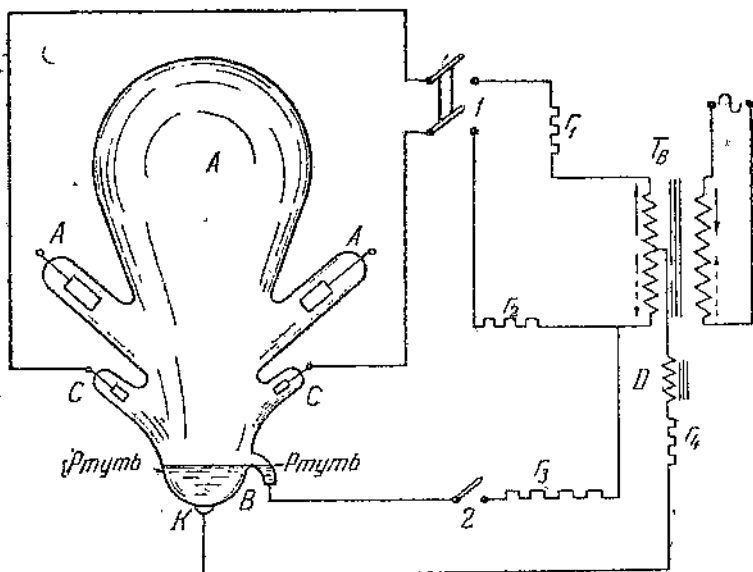
Фиг. 212. Ртутный выпрямитель высоковольтный, типа ЗВН-6.

Он расположен так, что при вертикальном положении колбы ртуть в нем не касается ртути катода, но при незначительном наклоне колбы ртуть из отростка соприкасается со ртутью катода, образуя небольшую вольтову дугу, достаточную для зажигания дуги между катодом и электродами возбуждения.

На фиг. 211 и 212 представлено еще два других ртутных выпрямителя, но на меньший ток: один — 3ВН-6 на 6 А, другой — 2ВН-20 на 20 А. Выпрямители имеют вспомогательные электроды для дежурного зажигания.

## 82. Зажигание ртутного выпрямителя с независимым возбуждением

На фиг. 213 представлена электрическая схема питания электродов независимого возбуждения стеклянного ртутного выпрямителя. Вторичная обмотка вспомогательного трансформатора



Фиг. 213. Схема питания независимого возбуждения ртутного выпрямителя.

$T_в$  — трансформатор возбуждения;  $D$  — магнитный дроссель;  $r_1, r_2, r_3, r_4$  — резисторы;  $A$  — рабочие аноды выпрямителя;  $C$  — аноды дежурного зажигания;  $K$  — ртутный катод;  $B$  — вспомогательный катод.

тора  $T_в$  присоединена к электродам через сопротивление  $r_1$  и  $r_2$ . Катод выпрямителя присоединяется к средней точке вторичной обмотки через дроссель  $D$  и сопротивление  $r_4$ . Напряжение между катодом и вспомогательным электродом равно около 60 В.

Для возбуждения дуги включают рубильники 1 и 2 и легким покачиванием колбы зажигают дугу. Как только дуга между вспомогательными электродами  $C$  и катодом  $K$  зажглась, выключают рубильник 2. Ток вспомогательного возбуждения равен приблизительно 5 А. Эта схема обеспечивает непрерывность горения дуги возбуждения. Таким образом в мощных выпрямителях имеются «вспомогательные» выпрямители для возбуждения вольтовой дуги. В маломощных выпрямителях отсутствует

независимое возбуждение. Срок службы ртутных выпрямителей 1500 час.

В табл. 56 даны электрические данные стеклянных ртутных выпрямителей, изготавлиющихся в СССР.

Таблица 56

Характеристики стеклянных ртутных выпрямителей заводов СССР

Элементы характеристики	Тип выпрямителей					
	однофазные		трехфазные			
	2В-20	2ВН-20	3В-30	3ВН-30	3ВН-60	3ВН-100
Число анодов:						
основных . . . .	2	2	3	3	3	3
вспомогательных	—	2	—	2	2	2
Наибольшая допустимая сила выпрямленного тока, А . .	20	20	30	30	60	100
Наибольшее допустимое выпрямленное напряжение, В . .	250	250	250	250	250	250
Наименьшая допустимая сила выпрямленного тока, А . .	5	1	5	1,5	3	5
Предельные токи независимого возбуждения, А . . . .	—	5—7	—	5—7	5—7	5—7
Охлаждение . . . .	Естеств.	Естеств.	Естеств.	Естеств.	Искусств.	Искусств.

Если поместить сетки между анодами и катодом ртутного выпрямителя, то такой выпрямитель становится управляемым. Такие управляемые ртутные выпрямители получили широкое применение в прерывателях для контактной сварки. Большое развитие в промышленности получили металлические ртутные выпрямители, изготавлиющиеся в нашем Союзе заводом „Электросила“ на силу тока до 7000 А. Принцип действия металлических ртутных выпрямителей не отличается от описанного принципа действия стеклянных ртутных выпрямителей. Металлические выпрямители также изготавливаются с управляемыми сетками.

### 83. Игнайтрон

Игнайтроном называется ионный газонаполненный прибор с зажигающим карборундовым электродом.

Игнайтрон является новым типом управляемого ртутного выпрямителя, изготовленного впервые фирмой Вестингауз (США)

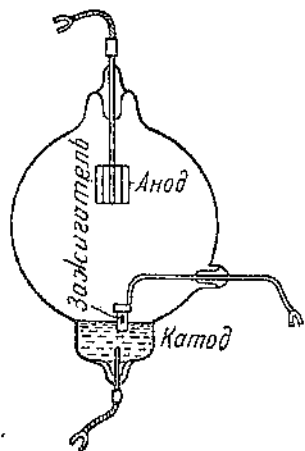


в результате недавнего открытия нового метода зажигания, найденного Слепяном и Людвигом. Вместо дежурного зажигания от вспомогательных электродов, имеющегося в обычном ртутном выпрямителе, зажигание дуги в игнайтроне производится в начале каждого рабочего полупериода. Последнее освобождает рассматриваемый выпрямитель не только от непрерывно действующих вспомогательных анодов возбуждения, но также и от управляемых сеток. Игнайтрон получил свое название от английского слова игнайтор (Ignitor) — зажигатель.

Кроме зажигателя, основными элементами игнайтрона являются твердый анод (железный или графитовый) и ртутный катод. Все указанные элементы заключены в сосуд, стеклянный или металлический, в котором установлен вакуум. Стеклянный игнайtron показан на фиг. 214.

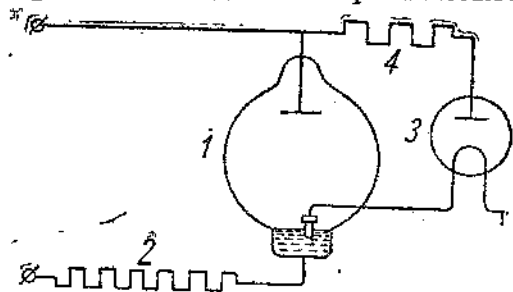
Согласно исследованию Слепяна и Людвига, если пропустить ток через границу двух сред, имеющих удельное сопротивление, резко отличающееся друг от друга, например, карборунд и ртуть, то в точках касания этих сред образуется значительный перепад напряжения. В качестве зажигателя служит карборундовый стержень, опущенный в ртуть катода. При прохождении тока достаточной величины через цепь зажигатель — ртуть, между ними возникает небольшая электрическая дуга, которая перемещается затем вверх по стержню к точкам, имеющим больший положительный потенциал. Этот процесс обеспечивает образование устойчивого катодного пятна на поверхности ртути для электронной эмиссии. Если потенциал анода положителен в отношении катода и приложенное напряжение достаточно по своей величине, то между ними мгновенно зажжется дуга и погаснет при питании переменным током в конце положительного полупериода напряжения. Время, необходимое для зажигания дуги, исчисляется несколькими микросекундами. Зажигатель ионизирует и при достаточном анодном напряжении зажигает игнайtron в начале каждого выбранного полупериода тока наподобие того, как это происходит при зажигании горючей смеси в цилиндре автомобильного двигателя при каждом рабочем ходе.

В ртутных выпрямителях ионизация от дуги вспомогательных электродов происходит непрерывно как во время положительного, так и отрицательного полупериода напряжения; от этого увеличивается опасность обратного зажигания во время отрицательного полупериода. Как видно из схемы на фиг. 215, в игнайтронном выпрямителе в непроводящий полупериод



Фиг. 214. Стеклянный игнайtron.

на зажигателе нет напряжения, и в междуэлектродном пространстве остается незначительное количество остаточных зарядов. Последние быстро исчезают, рекомбинируясь на электродах.

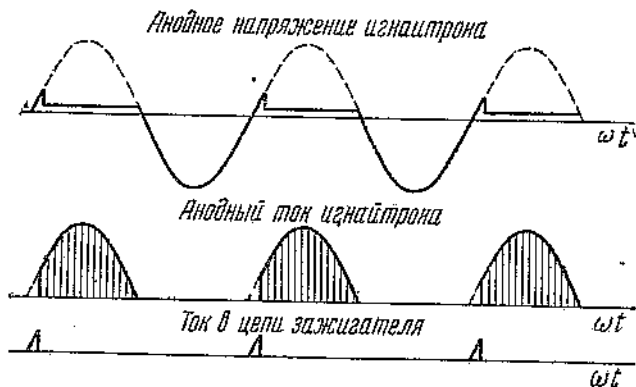


Фиг. 215. Элементарная схема включения игнайтрона 1 через нагрузку 2 к сети.

3 — вспомогательный газотрон; 4 — ограничительное сопротивление в цепи анода газотрона и зажигающего игнайтрона.

Как видно из той же схемы, питание цепи зажигающего производится через газотрон, обеспечивающий протекание тока по зажигающему, и, следовательно, возбуждение катодного пятна в течение положительной полуволны рабочего напряжения. Вслед за появлением дуги на зажигающем появляется дуга на рабочем аноде, при этом ток в цепи зажигающего

уменьшается до ничтожно малой величины вследствие того, что основная дуга игнайтрона шунтирует цепь зажигающего. В начале следующего положительного полупериода зажигание повторяется. Кривые токов цепей анода, зажигающего и кривая анодного напряжения показаны на фиг. 216.



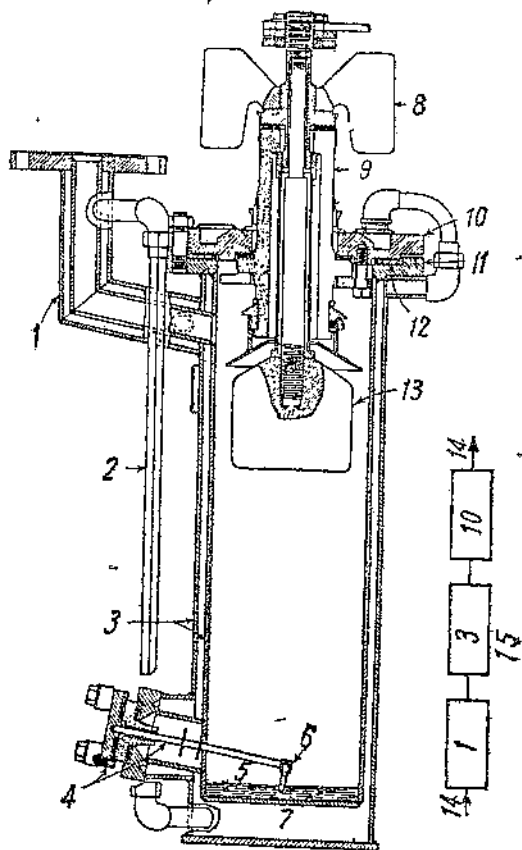
Фиг. 216. Кривые анодного напряжения и токов в цепи анода и зажигающего игнайтрона.

В тех случаях, где имеется необходимость регулировать эффективное значение анодного тока, вместо газотрона применяют тиратрон с сеточным управлением; зажигание игнайтрона произойдет в той точке положительной волны напряжения, на которую установлен фазорегулятор тиратрона. Таким образом игнайтрон обладает преимуществами, свойственными ртутному выпрямителю (большая эмиссионная способность жидкого катода), а также управляемыми свойствами, которыми обладает сетка в тиратроне.

Одна из существующих схем включения управляемого тиратрона в цепи зажигания игнайтрона показана на фиг. 215. Импульс тока, необходимый для зажигания игнайтрона, зависит от свойств самого зажигающего и колеблется от 5 до 35 А. Однако продолжительность прохождения тока равняется нескольким микросекундам. Поэтому средняя сила тока в цепи зажигающего примерно равна долям 1 А.

Игнайтрон способен выдерживать большую перегрузку тока по сравнению с другими видами выпрямителей. Например, средний ток, пропускаемый через игнайтрон, не имеющий специального охлаждения, равен 5 А, а допустимое амплитудное значение тока равно 750 А, т. е. в 150 раз больше. Для тиратронов это соотношение колеблется в пределах 2,5—6.

На фиг. 217 представлен чертеж металлического игнайтрона на 200 А среднего значения в изготовлении фирмы Вестингауз. Как видно из чертежа, анод, катод и весь резервуар охлаждаются циркулирующей водой.



Фиг. 217. Металлический игнайтрон на 200 А среднего значения:

1 — насосные соединения; 2 — водяная труба; 3 — резервуар; 4 — зажигающий; 5 — ртуть; 6 — кристалл; 7 — водяная рубашка; 8 — ребра для охлаждения; 9 — фарфоровый изолятор анода; 10 — анодная планка; 11 — сошедшие катоды; 12 — резиновая прокладка; 13 — графитовый анод; 14 — вход, выход; 15 — водная система.

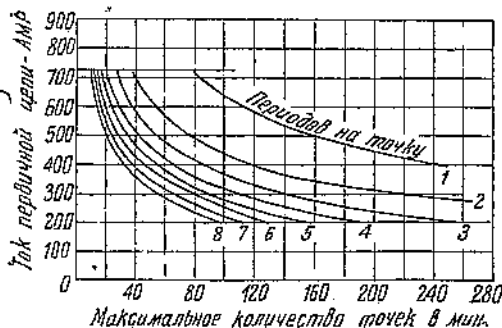
#### 84. Выбор игнайтронов по силе тока

При выборе игнайтронов для прерывателей контактной сварки необходимо иметь в виду, что они характеризуются тремя величинами тока: максимальным допустимым током, средним значением тока и средним квадратичным током. Такими характеристиками снабжается каждый игнайтрон.

Представленный выше металлический игнайтрон рассчитан на средний ток 200 А и 5000 А, максимального значения. Среднее квадратичное значение тока зависит здесь от режима сварочного процесса. Сведения о допустимом среднем квадратич-

ном значении тока необходимы для того, чтобы предупредить возможность перегрева подводящих проводов. Максимальное значение тока регламентирует наибольшую допустимую величину тока для каждого отдельного режима сварки. Среднее допустимое значение тока важно знать потому, что нагревание игнйтрона прямо пропорционально силе протекаемого тока, так как падение напряжения в нем остается практически постоянным для всех значений тока, лежащих в допустимом диапазоне.

Если процесс протекает кратковременно со значительными перерывами между каждой сваркой, что имеет обычно место при точечной сварке, то игнйтрон может быть значительно перегружен. Например, при точечной сварке продолжительностью времени в один период (0,02 сек.) и 60 сварных точек в мин.



Фиг. 218. Диаграмма допустимого анодного тока в цепи игнйтрона в зависимости от количества сварных точек и продолжительности сварки, 1—8—число периодов.

ных точек, произведенных в минуту. Этот график построен для игнйтронного прерывателя со стеклянными игнйтронами с естественным воздушным охлаждением системы Вестингауз. Для различной продолжительности сварки, выраженной в периодах, построены отдельные кривые. Отсюда видно, что с увеличением времени сварки каждой точки уменьшается максимальное допустимое количество точек в 1 мин. (т. е. частоту сварки следует при этом уменьшить). Согласно верхней кривой, построенной для времени сварки в один период, настоящий прерыватель может быть включен в цепь сварочной машины, имеющей 710 А в первичной цепи, для производства 80 точек в 1 мин. Время сварки при этом равно одному периоду, что составляет 312 kVA при напряжении сети в 440 V. Такую же мощность допускает игнйтронный прерыватель при времени сварки в 8 пер., но при меньшей частоте (10 точек в 1 мин.).

В случае роликовой сварки, где процесс ведется с большой частотой (200—1000 и более точек в 1 мин.), требуется гораздо большая мощность ламп, чем при точечной сварке, если мощности сварочных машин в обоих случаях одинаковы.

$$\alpha, \text{ к. п.} = \frac{0,02}{1} \cdot 100 = 2\% .$$

Для такого режима сварки требуется маломощный игнйтрон, в то время как мощность сварочной машины весьма значительна.

На фиг. 218 представлена диаграмма допустимого значения тока  $I$ , протекающего при сварке в первичной обмотке сварочного трансформатора, в зависимости от количества сварочных точек, произведенных в минуту.

Для мощных прерывателей, применяемых при роликовой сварке, фирма Вестингауз ставит исключительно металлические игнайтроны, у которых средний ток примерно в четыре раза более, чем у стеклянных.

Вычисление тока игнайтрона может быть произведено при помощи следующих ураниений, для которых введем предварительно необходимые обозначения:

$I_a$  — средний ток, измеренный амперметром постоянного тока в цепи отдельного игнайтрона;

$I$  — среднее квадратичное значение тока, протекающего в первичной цепи трансформатора при сварке;

$I_{\max}$  — амплитудное значение тока в А.

Максимальный ток

$$I_{\max} = I\sqrt{2}.$$

Средний ток в первичной цепи сварочной машины

$$I_a = I \frac{\text{п. к. р.}}{2,2},$$

где п. к. р. =  $\frac{t_c}{T}$ ;

$I_{\text{ср. кв}}$  — среднее квадратичное значение тока, измеренное амперметром переменного тока в цепи отдельного игнайтрона,

$$I_{\text{ср. кв}} = \frac{I}{\sqrt{2}} \sqrt{\text{п. к. р.}}$$

## 85. Терминология, употребляемая в схемах с управляемыми ионными выпрямителями

Допустимый мгновенный анодный ток есть наибольшее значение мгновенного тока, протекающего по внешней цепи анода, которое может выдержать выпрямитель в нормальной работе. Частота, с которой выпрямитель может пропускать этот ток при данной продолжительности, определяется нагревом выпрямителя.

Допустимый перегрузочный анодный ток является мерой способности выпрямителя противостоять неустановившимся токам больших величин. Тиратроны переносят такую перегрузку в весьма ограниченных пределах. Более легко подобные кратковременные перегрузки переносятся ртутными выпрямителями и особенно игнайтронами.

Допустимый средний анодный ток есть ток, величина которого лимитируется допустимым нагревом выпрямителя и представляет собой анодный ток, измеряемый амперметром постоянного тока. Допустимый средний анодный ток равен наибольшему значению среднего тока, который может непрерывно протекать по выпрямителю.

Запирающее сеточное напряжение есть наименьшее значение отрицательного напряжения, подведенного минусом к сетке, а плюсом к катоду, при котором тиратрон не зажигается при данном анодном напряжении.

Сеточный ток есть электрический ток, протекающий по внешней цепи сетки.

Анодным напряжением называется напряжение, измеряемое на выводах анода и катода электровакуумного прибора.

Зажигательный потенциал управляемого выпрямителя есть наименьшая величина сеточного напряжения при данном анодном напряжении выпрямителя, при котором последний загорается.

Максимальная амплитуда обратного зажигания выпрямителя представляет собой наивысшее мгновенное значение напряжения, приложенное в направлении, обратном прохождению тока (минус на аноде и плюс на катоде), при котором разряд не происходит, причем указанное напряжение является безопасным для определенного интервала температур.

## Глава XI

### ИОННЫЕ (СИНХРОННЫЕ) ТОКОПРЕРЫВАТЕЛИ

#### 86. Основные виды ионных токопрерывателей

Асинхронные токопрерыватели не удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям в части точной регулировки кратковременных импульсов сварочного тока. Такие прерыватели не могут надежно обеспечить сварку продолжительностью меньше десятых долей секунды. Разрешение задачи сварки кратковременными импульсами тока оказалось возможным лишь после появления в промышленном изготовлении управляемых ионных выпрямителей большой мощности. Ионные токопрерыватели для контактной сварки работают на принципе использования управляемых ионных выпрямителей в качестве своеобразных выключателей.

Существующие схемы ионных прерывателей подразделяются на следующие две основные группы:

1. К первой группе относятся прерыватели с непосредственным включением управляемых выпрямителей последовательно в первичную цепь сварочного трансформатора. Схема включения показана на фиг. 219. Как видно из схемы, непрерывное прохождение переменного тока в течение заданного времени (несколько периодов) возможно лишь тогда, когда в цепь включены два выпрямителя. Через каждый выпрямитель проходит ток одного полупериода. Выпрямители включены таким образом: при одном полупериоде, когда ток имеет одно направление, загорается первый выпрямитель, а при следующем полупериоде он уже не

пропускает тока и оказывается запертым вследствие измененной полярности напряжения на его аноде. Тогда загорается второй выпрямитель, у которого в этот момент к аноду проходит положительное напряжение. Такое соединение выпрямителей между собой называется антипараллельным соединением.

Когда сетки выпрямителей заперты отрицательным смещением, то цепь сварочного трансформатора оказывается разомкнутой, и тока в сварочной цепи нет. При подаче положительного (зажигательного) импульса на сетки выпрямители поочередно загораются, и ток протекает в цепи до тех пор, пока сетки выпрямителей вновь не получат отрицательное напряжение смещения (или в случае выключения анодного напряжения).

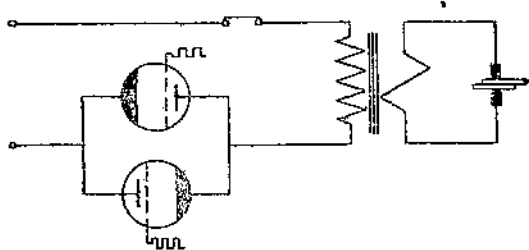
Из существующих видов токопрерывателей наиболее совершенными являются игнитронные прерыватели. Они относятся также к первой группе. К первой группе относятся схемы прерывателей систем Вестингауз (США), АБГ, Сименс-Шуккерт и др. В дальнейшем будет описана лишь схема Вестингауза.

Следует отметить, что предложенные прерыватели с одним выпрямителем, включенным в первичную цепь сварочной машины<sup>1</sup> (фиг. 220), технически нецелесообразны ввиду загрузки общей сети переменного тока составляющей постоянного тока, что искажает форму кривой тока в сети и понижает ее коэффициент мощности.

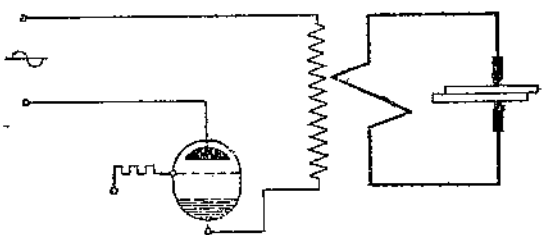
2. Ко второй группе относятся прерыватели, у которых включение управляемых выпрямителей к сварочному трансформатору производится через сериес-трансформатор (трансформатор, включенный последовательно со сварочной машиной). Управляется сварочный процесс помощью регулируемых сеток.

Принципиальная схема таких прерывателей показана на фиг. 221.

В схемах первой группы выпрямители должны быть рассчитаны на силу тока, протекающего в первичной цепи сварочного



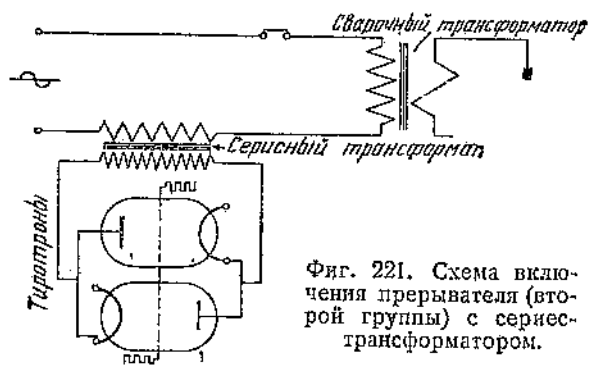
Фиг. 219. Схема включения ионного прерывателя первой группы.



Фиг. 220. Схема включения ионного прерывателя с одним выпрямителем в цепи сварочной машины.

<sup>1</sup> С. Я. Эмдин, Ионные контроллеры для контактных сварочных машин, ОНТИ, 1937.

трансформатора. Это во многих случаях затрудняет использование таких схем ввиду необходимости управляемых выпрямителей большой мощности и работающих при сравнительно низком напряжении 220—380 В. Взамен этих схем была предложена фирмой ДЖИИ схема прерывателя с применением сериес-трансформаторов. Благодаря тому, что вторичная обмотка сериес-трансформатора выполняется на высокое напряжение, величина тока в ней получается небольшой, а коммутируемая мощность остается та же. В промышленном изготовлении тиристоры на высокое напряжение и сравнительно небольшие силы тока гораздо более освоены, чем тиристоры на большие силы тока и низкие напряжения. В связи с этим тиристоры на 50—100 А и высокого напряжения в состоянии управлять большими мощностями.



Фиг. 221. Схема включения прерывателя (второй группы) с сериес-трансформатором.

Так, например, при помощи 40-амперных тиристорных и напряжении вторичной обмотки сериес-трансформатора в 5 кВ можно построить прерыватель с номинальной мощностью в 100 кВА.

Недостатком схемы с сериес-трансформатором является высоковольтная

цепь последнего, требующая дополнительных мер безопасности (хотя доступ к высоковольтной цепи во время работы совершенно излишен и всегда должен быть закрыт).

Когда тиристоры в этой схеме заперты, вторичная обмотка сериес-трансформатора разомкнута, и последовательно со сварочной машиной оказывается включенным большое индуктивное сопротивление. При замкнутых электродах сварочной машины (на изделие) подведенное напряжение сети распределяется таким образом, что к зажимам сварочной машины подходит напряжение порядка 5%, а остальное падает на первичную цепь сериес-трансформатора. Это равносильно выключению сварочной машины.

Явление становится понятным, если вспомнить, что индуктивное сопротивление трансформатора с разомкнутой вторичной обмоткой во много раз больше сопротивления индуктивности рассеяния короткозамкнутого трансформатора. Последнее составляет обычно 3—5% индуктивного сопротивления трансформатора при холостом ходе. При замкнутой вторичной цепи сериес-трансформатора через горящие тиристоры трансформатор оказывается замкнутым почти накоротко, и его индуктивное сопротивление резко падает. Подведенное напряжение сети распределяется следующим образом: 3—5% напряжения падает в сериес-

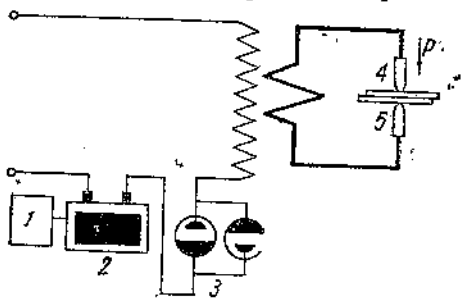


трансформаторе (при условии одинаковой мощности обоих трансформаторов), а остальное напряжение подводится к сварочному трансформатору. В сварочной цепи протекает полный ток до следующего момента запирания тиратронов. Таким образом в схемах с серийс-трансформаторами включение и выключение сварочного тока производится без разрыва цепи, путем вывода и ввода индуктивного сопротивления в цепи сварочного трансформатора.

Ко второй группе относятся схемы, разработанные фирмой Дженераль Электрик (США), заводом „Светлана“, автором настоящей книги и др.

Кроме двух основных групп прерывателей следует еще отметить ионно-механический прерыватель, у которого ионный выпрямитель включен последовательно с вращающимся барабаном, через который проходит весь ток первичной цепи сварочной машины, а разрыв тока происходит в выпрямителе. Принципиальная схема этого прерывателя представлена на фиг. 222. Такая схема прерывателя была осуществлена в „Дирижаблестрое“.

Недостатком этой схемы является коммутирование полного тока через вращающийся барабан и большая инерция последнего.



Фиг. 222. Схема включения ионно-механического прерывателя.

1 — синхронный мотор; 2 — барабан; 3 — ртутные выпрямители; 4, 5 — электроды.

## 87. Игнайatronный прерыватель для контактной сварки системы Вестингауз

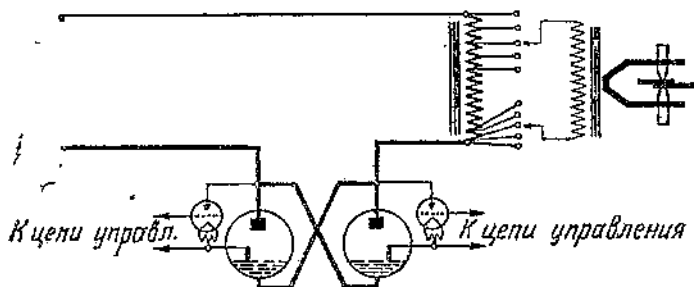
а) Принцип действия. Основное отличие прерывателей Вестингауз (Westinghouse, США) от других видов — применение игнайтронов в качестве управляемых выпрямителей. Первоначальные конструкции прерывателей этого типа отличаются от выпускаемых прерывателей в настоящее время как самой схемой автоматизации управления, так и конструкцией ламп-игнайтронов: вместо стеклянных игнайтронов применяются теперь металлические с постоянной откачкой насосом и без откачки (отпаянные)<sup>1</sup>.

Принципиальная схема включения игнайatronного прерывателя в цепь сварочной машины показана на фиг. 223. Оба игнайatronа включены антипараллельно между собой и последова-

<sup>1</sup> Фирма GEC также производит токопрерыватели для точечной и роликовой сварки, но с отпаянными металлическими игнайatronами. Они отличаются малыми габаритами по сравнению с игнайatronными токопрерывателями системы Вестингауз. Однако отпаянные игнайatronы имеют ограниченные сроки эксплуатации по сравнению с неотпаянными игнайatronами.

тельно в первичную цепь сварочной машины. Вся установка приключена к напряжению сети, но ток в цепи сварочной машины не течет, так как при отсутствии разряда в лампах цепь оказывается разомкнутой. Чтобы зажечь игнайтроны, необходимо вначале возбудить их, включив ток в цепь зажигаемых. Сварка начинается с момента зажигания игнайтронов. Прекращается сварка размыканием цепи зажигаемых. Для управления током цепи зажигания игнайтрона применяются небольшие вспомогательные тиратроны, управляемые при помощи сеток.

• Схема автоматического управления сварочным процессом прерывателей первых образцов игнайтроновых прерывателей осуществлялась следующим образом: металлический диск с высверленными по окружности отверстиями приводился во вращение



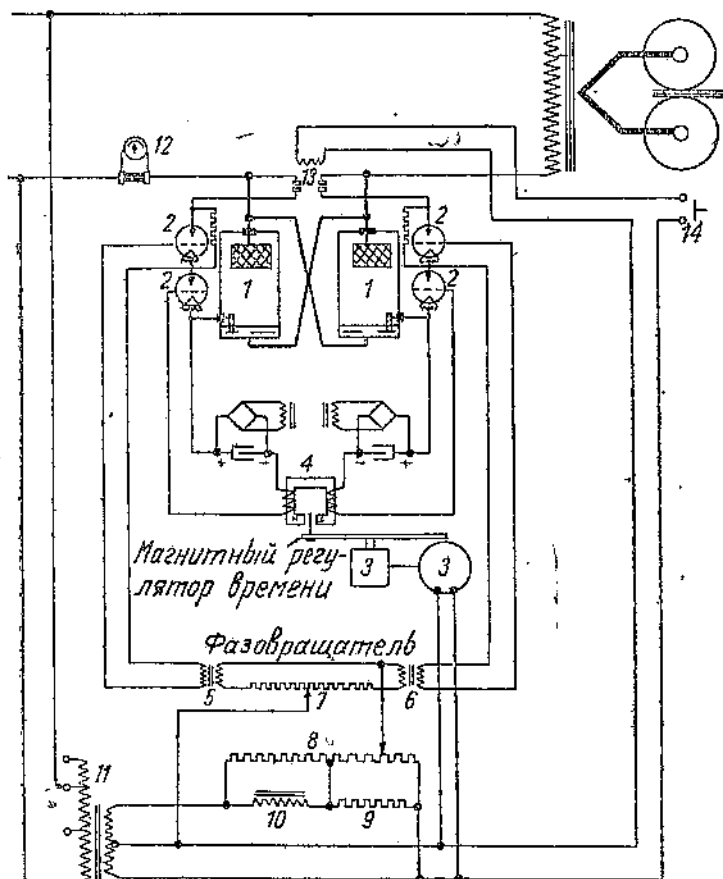
•Фиг. 223. Принципиальная схема включения игнайтронового прерывателя для точечной сварки.

1 — игнайтроновые трубки; 2 — управляемые тиратроны малой мощности; 3 — автотрансформатор для регулирования сварочного процесса; 4 — сварочная машина.

через редуктор от синхронного моторчика. С одной стороны диска была установлена электрическая лампочка накаливания, свет которой проникал через отверстия диска на фотоэлемент. Фотоэлемент от светового луча становился токопроводящим и включал усилительный контур, соединенный с цепью зажигания игнайтронов.

Разберем электрическую схему игнайтронового прерывателя последней конструкции Вестингауз для роликовой сварки (фиг. 224). Фотоэлемент со всей вспомогательной цепью заменен синхронным устройством индуктивного типа, регулирующим время сварки и время перерывов. От синхронного моторчика диск приводится во вращение через редуктор (фиг. 225). Диск имеет высверленные отверстия, расположенные по краю его на одинаковом расстоянии друг от друга. Он изготовляется из алюминиевого сплава. Число отверстий на диске равно 120, и при питании моторчика напряжением с частотой в 60 пер./сек. диск делает 1 об/сек., и следовательно, каждое отверстие соответствует по времени половине периода. Отверстия диска являются гнездами, куда вставляются тщательно пригнанные к ним стальные шпильки. Количество их устанавливается соответственно заданному времени сварки и времени паузы. Шпильки закре-

пляются при помощи общего зажимного диска, покрытого резиной и расположенного над регулировочным диском. Установленные на вращающемся диске шпильки проходят через воздушный зазор полюсов небольшого постоянного магнита с катушками. В момент прохождения шпильки через воздушный зазор магни-



Фиг. 224. Принципиальная схема игнитронного прерывателя для роликовой сварки.

1 — игнитроны; 2 — управляемые тиратроны; 3 — синхронный коммутатор; 4 — индуктивный регулятор времени; 5, 6 — вспомогательные трансформаторы; 7, 8, 9 — реостаты; 10 — дроссель; 11 — вспомогательный трансформатор; 12 — гальванометр; 13 — вспомогательное реле; 14 — кнопка.

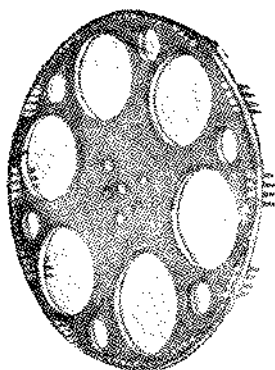
тов магнитное сопротивление его резко уменьшается, и в катушках магнитов индуктируется напряжение, которое подводится к сеткам тиратронов и является достаточным для их зажигания.

Момент зажигания тиратронов по отношению к волне напряжения сети определяется отдельной цепью, регулирующей сварочный ток, а не индуктивным контроллером. Контроллер индук-

тивного типа фиксирует полупериоды линейного напряжения и количество периодов сварки, а цепь, осуществляющая контроль сварочного тока, регулирует заданную активную часть полупериода линейного напряжения в каждом икнайтроне. Индуктивный контроллер проще и надежнее в работе прерывателя с фотоэлементом.

б) Цепь управления вспомогательными тиратронами (фиг. 224). В каждую цепь зажигания икнайтронов 1 включено параллельно к икнайтрону два вспомогательных тиратрона 2, соединенных между собой последовательно. До зажигания икнайтронов должны сперва зажигаться указанные тиратроны 2. Такое включение произведено для того, чтобы совершенно прекратить

ток в цепи зажигагателя с момента возникновения разряда в икнайтроне. Автоматическое выключение цепи зажигагателя происходит потому, что в момент загорания каждого икнайтрона падение напряжения на клеммах анод—катод является недостаточным для поддержания дуги в обоих тиратронах. Управление тиратронами осуществляется при помощи индуктивного регулятора 4 и цепью регулирования сварочного тока.



Фиг. 225. Диск со шпильками.

Основной функцией индуктивного регулятора продолжительности сварки является контроль продолжительности времени включения и паузы сварочного тока. Это осуществляется путем подачи индуктированного в обмотках магнита пульсирующего положительного напряжения к сеткам каждого нижнего тиратрона 2 в тот момент, когда каждая стальная шпилька диска заполняет воздушный зазор магнита 4. Зажигание происходит автоматически для каждого положительного или отрицательного полупериода тока, и в зависимости от полярности зажигагательного импульса загорается правый или левый тиратрон 2 при условии включенной кнопки управления и других элементов схемы.

Основной функцией цепи управления сварочным током является контролирование момента зажигания икнайтронов по отношению к волне напряжения сети. Этим достигается дополнительное регулирование величины сварочного тока. Для осуществления указанной регулировки тока используется статический фазорегулятор, подающий к сеткам верхних вспомогательных тиратронов напряжение со сдвинутой фазой по отношению к напряжению сети. Второй функцией цепи контроля сварочного тока является обеспечение незначительной, но также регулируемой разности напряжения, подводимого к двум сеточным трансформаторам. Эта цепь обеспечивает компенсацию тока для получения полного равновесия (отсутствие каких-либо составляющих постоянного тока в цепи) между двумя икнайтронами, имеющими при случае неодинаковое падение напряжения в дуге.

Питание цепи контроля сварочного тока производится от средней точки вторичной обмотки вспомогательного трансформатора и подвижного контакта на потенциометре 8 статического фазорегулятора.

Фазорегулятор питается от вторичной обмотки вспомогательного трансформатора. Сдвиг фазы может в данном случае меняться от 0 до  $180^\circ$  в зависимости от того, в каком положении находится подвижной контакт потенциометра 8. Если подвижной контакт присоединен к середине потенциометра, то регулируемое напряжение будет отставать на  $90^\circ$ , так как индуктивное сопротивление 10 равно сопротивлению 9. Когда подвижной контакт уравнивающего потенциометра 7 находится в среднем положении, то сеточные трансформаторы (5 и 6) подают к сеткам тиратронов 2 напряжения, фазы которых опрокинуты на  $180^\circ$  точно так же, как их анодные напряжения. Когда же подвижной контакт потенциометра 7 смещен к краю 6 потенциометра, то сеточный трансформатор 6 будет получать напряжение непосредственно от вспомогательного трансформатора 11. Напряжение, подведенное к сеточному трансформатору 6, будет при этом очень мало, так как оно теряется в сопротивлении потенциометра.

Трансформаторы 5 и 6 должны получать синусоидальный намагничивающий ток, который, проходя через сопротивление 7, будет создавать до некоторой степени отставание напряжения, подведенного к трансформатору 5, по отношению к напряжению, подведенному к трансформатору 6.

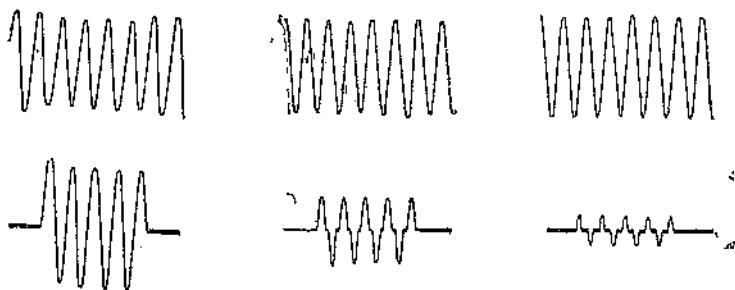
Таким образом напряжение трансформатора 5 может быть либо отстающим, либо опережающим напряжение трансформатора 6. Следовательно зажигание в каждом игнайтроне может происходить с запаздыванием по отношению к другому игнайтрону, компенсируя возможно меньшее падение напряжения в дуге.

Чтобы определить наличие составляющих постоянного тока в первичной цепи сварочной машины, может быть использован гальванометр постоянного тока (с двухсторонним отклонением), включенный через шунт в цепь переменного тока. Слагающая постоянного тока в данном случае устраняется при помощи уравнивающего потенциометра 7.

На практике угловое положение магнита 4 по отношению к регулировочному диску 3 рассчитано так, чтобы положительное напряжение подавалось к нижнему тиратрону 2 со значительным опережением по отношению к электрическому углу, под которым цепь управления сварочным током при полной мощности возбуждает верхний тиратрон 2. Нижний тиратрон 2 при прохождении иглы через воздушный зазор магнита будет ионизоваться и останется в этом состоянии, пока включенный с ним последовательно верхний тиратрон не получит зажигающий импульс. Верхний тиратрон 2 может также получать возбуждение от цепи управления сварочным током, когда происходит зажигание игнайтрона. Реле 13 включает две цепи за-

жигания тиратронов, из которых одна — для магнитного регулятора, а другая — для управления цепи сварочного тока.

Для зажигания игнайтрона необходимы следующие условия: потенциал анода должен быть положительным, индуктивный контроллер должен снабдить сетку нижнего тиратрона положительным потенциалом, а верхний тиратрон — получить зажигающий потенциал от цепи управления сварочным током. Контрольное реле 13 должно быть включено. При соблюдении этих условий ток для зажигания игнайтронов будет протекать от сети через тиратроны к зажигающему и ртутному катоду игнайтрона. Как только зажжется игнайтрон, дуга его моментально шунтирует вспомогательные тиратроны 2 цепи зажигающего, и они потухнут.



Фиг. 226—228. Осциллограммы импульса тока при роликовой сварке в  $4\frac{1}{2}$  пер. при различных углах зажигания игнайтронов.

в) Регулирование сварочного тока. Выше были разобраны элементы прерывателя, позволяющие регулировать сварочный ток по продолжительности и по амплитудному значению. Регулировка значения тока при заданном времени сварки производится в широких пределах сдвигом момента зажигания игнайтронов относительно волны напряжения. Наличие индуктивного сопротивления в сварочной машине вызывает значительное понижение величины тока, даже при небольших углах сдвига момента зажигания.

На осциллограммах (фиг. 226—228) показаны кривые импульса тока роликовой сварки для различных углов зажигания игнайтронов и продолжительности протекания в 4,5 периода. Осциллограммы записаны для первичной цепи сварочной машины. Эффективное значение тока для осциллограммы на фиг. 226 равно 1100 А, для кривой на фиг. 227—540 А и для кривой на фиг. 228—170 А; масштаб один и тот же для всех трех осциллограмм.

Уравнение результирующего тока для случая сдвига угла зажигания складывается из синусоидальной составляющей тока и составляющей неустановившегося режима в момент включения:

$$i = I [\sin(\Theta + \omega t) - (\sin \Theta) e^{-\frac{R}{X} \omega t}] \quad (83)$$

где  $i$  — мгновенное значение первичного тока трансформатора;  
 $I$  — амплитудное значение синусоиды тока без запаздывания  
 зажигания игнитронов;

$\theta$  — угол сдвига момента зажигания, выраженного в радианах;  
 $\omega = 2\pi f$ ;

$t$  — время протекания  
 тока после  
 зажигания в  
 сек.;

$R$  и  $X$  — соответствующие омические  
 и индуктивные  
 сопротивления  
 сварочного  
 трансформато-  
 ра в  $\Omega$ .

Это выражение от-  
 носится только к одной  
 полуволне тока. Это  
 же выражение дей-  
 ствительно для второй  
 полуволны тока, если  
 второй игнитрон сдви-  
 нут на  $180^\circ$ .

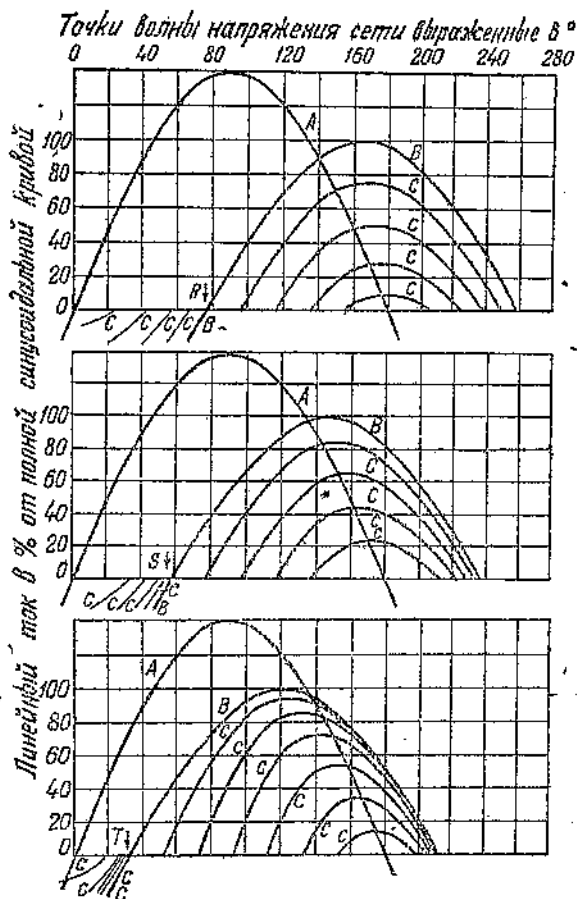
Ток вторичной об-  
 мотки будет аналогич-  
 ен току первичной  
 обмотки.

На диаграммах  
 (фиг. 229—231) показана  
 постепенное умень-  
 шение амплитуды вол-  
 ны тока, получающееся  
 при постепенном сме-  
 щении угла зажигания  
 игнитронов. Эти кри-  
 вые смещены по отно-  
 шению к кривой, по-  
 строенной для нор-  
 мального угла, харак-  
 теризующего коэффи-  
 циент мощности  $\cos \varphi$   
 машины.

На фиг. 229—231  
 кривые обозначают:

$A$  — волна напряжения сети,  $B$  — волна сварочного тока без  
 специального сдвига момента зажигания,  $C$  — кривые свароч-  
 ного тока при различных углах сдвига момента зажигания.

На фиг. 232 показана диаграмма эффективного значения тока



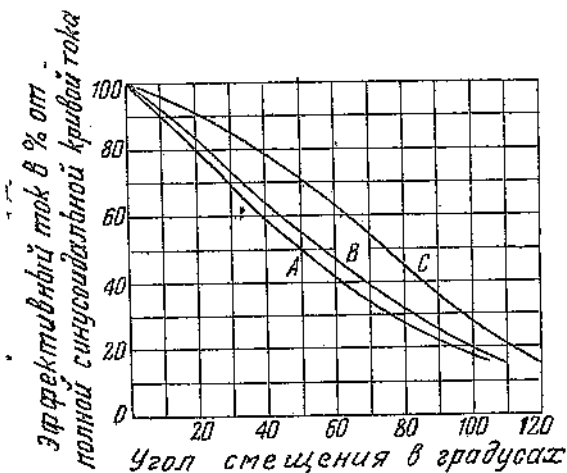
Фиг. 229—231. Изменение амплитуды тока в  
 зависимости от угла зажигания игнитронов и  
 коэффициента мощности сварочной машины.

Фиг. 229. Для коэффициента мощности сварочной машины,  
 имеющей  $\cos \varphi = 0,25$ .

Фиг. 230. Для коэффициента мощности сварочной машины,  
 имеющей  $\cos \varphi = 0,55$ .

Фиг. 231. Для коэффициента мощности сварочной машины,  
 имеющей  $\cos \varphi = 0,85$ .

при сдвиге момента зажигания в процентном отношении к максимальному значению тока без сдвига. Кривые *A*, *B* и *C* относятся к сварочным машинам, имеющим коэффициенты мощности соответственно в 0,25, 0,55 и 0,85.

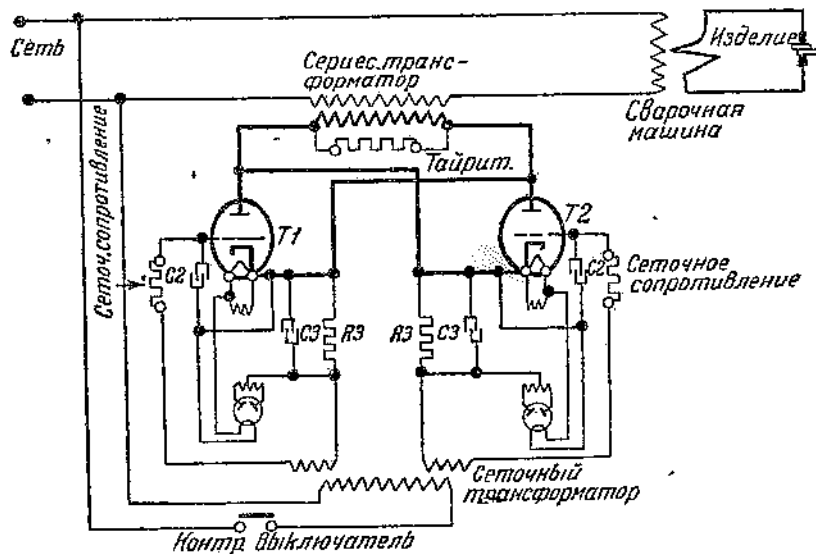


Фиг. 232. Диаграмма изменения эффективного значения тока в зависимости от угла зажигания ингайтронов.

### 88. Тиратронный прерыватель системы Джeneralь Электрик К° (США)

а) Принцип действия. Идея применения сериес-трансформатора в схеме тиратронного прерывателя для контактной сварки была впервые предложена и разработана американской фирмой ДЖИИ (GEC). Схема силовой цепи

этого прерывателя показана на фиг. 233. На вторичной стороне сериестрансформатора включено два тиратрона  $T_1$  и  $T_2$ , таким обра-



Фиг. 233. Схема тиратронного прерывателя системы ДЖИИ (GEC).

зом, чтобы обе полуволны переменного тока могли протекать по этой цепи, т. е. тиратроны соединены антипараллельно. Напря-



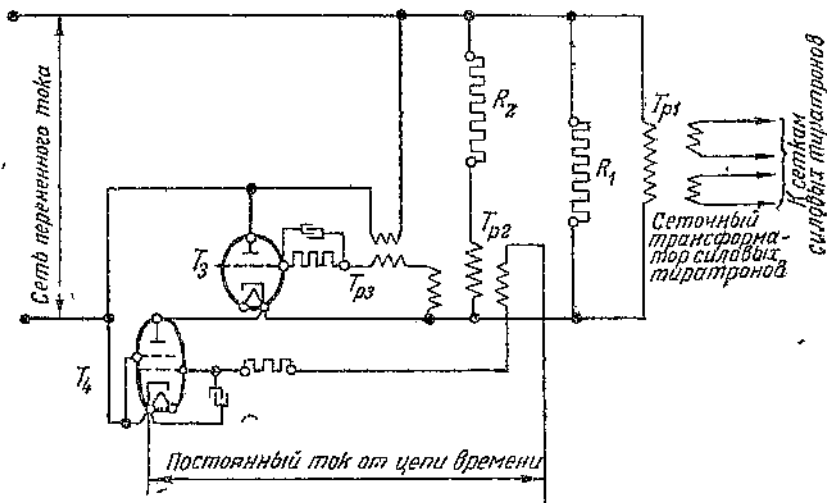
жение высоковольтной обмотки серийно-трансформатора устанавливается обычно в 2000, 4000 или 6000 В в зависимости от необходимой мощности прерывателя. К сетке каждого силового тириатрона подведено отрицательное напряжение смещения от отдельного двуханодного кенотрона. Отпирающее (положительное) напряжение подводится к сеткам от отдельных обмоток сеточного трансформатора; эти обмотки включаются таким образом, чтобы напряжение на их концах было сдвинуто друг относительно друга на  $180^\circ$  и при периодическом появлении положительного потенциала на аноде каждого тириатрона сетка его получала от сеточного трансформатора также положительный потенциал зажигания в тот момент, когда его первичная обмотка приключена к напряжению той же сети. При замкнутом положении контрольного выключателя загораются силовые тириатроны. Таким образом при помощи контрольного выключателя оказывается возможным включать и выключать силовые тириатроны. Параллельно в высоковольтной обмотке серийного трансформатора включено сопротивление, называемое тайритом. Оно защищает тириатроны от возникающего перенапряжения в обмотках трансформатора в момент выключения установившейся цепи или при замыкании сварочной цепи под напряжением. Тайрит представляет большое сопротивление для нормального напряжения, поэтому ток в его параллельной цепи весьма ограничен, но для более высокого напряжения сопротивление тайрита значительно уменьшается. При нормальном напряжении тайрит поглощает некоторое количество энергии. Возникающее перенапряжение в трансформаторе закорачивается через тайритовое сопротивление, и волна перенапряжения к тириатронам не доходит.

Между сеткой и катодом силовых тириатронов присоединены конденсаторы. Они предназначены для короткого замыкания сетки с катодом при возникновении перенапряжения. Сопротивление конденсаторов при нормальной частоте очень велико по сравнению с сопротивлением в цепи сетки. Однако при перенапряжениях, когда частота значительно возрастает, сопротивление этих конденсаторов будет значительно меньше, и ток в результате перенапряжения стекает по наружной цепи, не попадая на сетку.

Для включения и выключения первичной обмотки сеточного трансформатора к сети переменного тока предусмотрена дополнительная цепь управления (вместо контрольного выключателя), состоящая из цепи управления времени сварки, и цепи регулирования времени сварки и времени паузы.

б) Цепь управления сварочным циклом. На фиг. 234 показана цепь управления, регулирующая сварочный процесс. Сеточный трансформатор  $T_{р1}$  для питания сетки силовых тириатронов Fg-41 управляется при помощи двух маломощных тириатронов  $T_3$  и  $T_4$ . Последние соединены между собой антипараллельно, благодаря чему в первичной обмотке сеточного трансформатора протекает полная волна переменного тока.

Для устранения необходимости регулировки обеих ламп от специальной лампы, регулирующей время, одна из ламп  $T_3$  включена таким образом, что она зажигается непосредственно вслед за первой (ведущей) лампой  $T_4$ . Вторую лампу  $T_3$  называют еще прицельной лампой. Подобное устройство цепи управления позволяет питать сеточный трансформатор полными волнами переменного тока. Ведущая лампа  $T_4$  имеет еще экранирующую сетку. Трансформатор  $T_{p2}$  имеет также три обмотки. Он питает сетки обеих ламп и приключен первичной обмоткой через ограничительное сопротивление  $R_2$  параллельно с первичной обмот-



Фиг. 234. Цепь управления сварочным процессом тиратронного прерывателя.

кой сеточного трансформатора  $T_{p1}$ . Напряжение на вторичных обмотках трансформатора  $T_{p2}$  имеет пикообразную форму. Напряжение на первичной обмотке трансформаторов  $T_{p2}$  равно  $1/4$  от напряжения сети.

Трансформатор  $T_{p2}$  подает на сетку лампы  $T_3$  запирающее напряжение, смещенное на  $180^\circ$  по отношению к фазе анода. В цепи сетки лампы  $T_3$  включено еще сопротивление и емкость (гридлик) для получения дополнительного напряжения смещения от выпрямляющего действия сетки. Поэтому лампа  $T_3$  остается не включенной. Лампа  $T_4$  включается и выключается постоянным током, получаемым от цепи времени. Для дальнейшего изучения работы схемы необходимо вначале ознакомиться с цепью регулирования времени.

в) Цепь регулирования времени сварки. Принцип действия цепи регулирования времени сварки становится ясным при ознакомлении со схемой (фиг. 235). Питание этой цепи производится от сети постоянного тока. Цепь состоит из тиратрона  $T_1$ , конденсатора постоянной емкости  $C_1$  и четырех реостатов  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$ ; последовательно с тиратроном  $T_1$  включен дроссель  $X_2$ . Эта цепь регулирует продолжительность сва-

рочного цикла и устанавливает одновременно соотношение между временами включения и паузы.

К сетке тиратрона  $T_1$  приключен импульсный сеточный трансформатор, у которого первичная обмотка привключена к напряжению сети переменного тока. Продолжительность зарядки конденсатора зависит от величины емкости и сопротивления, включенного в зарядную цепь. Чем больше  $R$  и  $C$ , тем длительнее происходит зарядка. Зарядка конденсатора производится постоянным током через постоянное сопротивление  $R_5$  и переменное сопротивление  $R_1$ .

г) Действие цепи времени. В момент включения постоянного тока все напряжение (в 250 В) подается на сопротивления  $R_1$  и  $R_5$ , так как в начальный момент времени включения, когда  $t=0$ , разность потенциалов на обкладках конденсатора  $U_c=0$ , и ток в цепи получается такой величины, как в случае короткого замыкания конденсатора. Зарядный ток конденсатора выражается уравнением

$$i_{зар} = \frac{U}{r} e^{-\frac{t}{r \cdot C}};$$

при  $t=0$

$$i_{зар} = \frac{U}{r} = i_0,$$

где  $U$  — напряжение сети;

$C$  — емкость в Ф;

$$r = R_1 + R_5.$$

В следующий момент времени ( $t = \Delta t$ ) зарядный ток уменьшится до величины

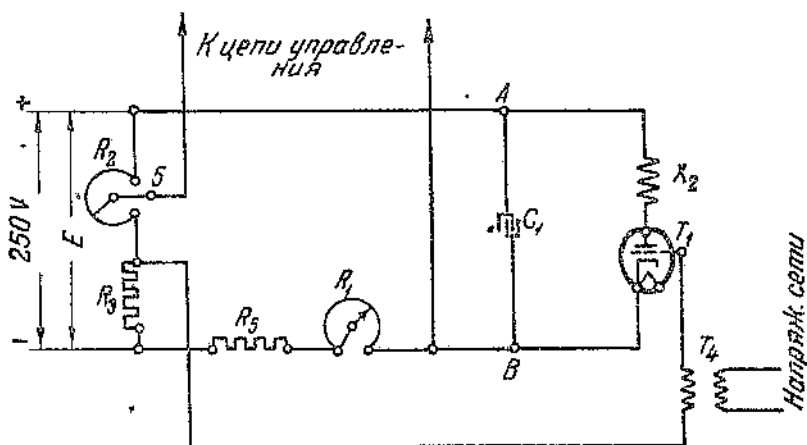
$$i_{зар} = \frac{U}{r} e^{-\frac{\Delta t}{r \cdot C}}.$$

Разность потенциалов на обкладках конденсатора получится равной

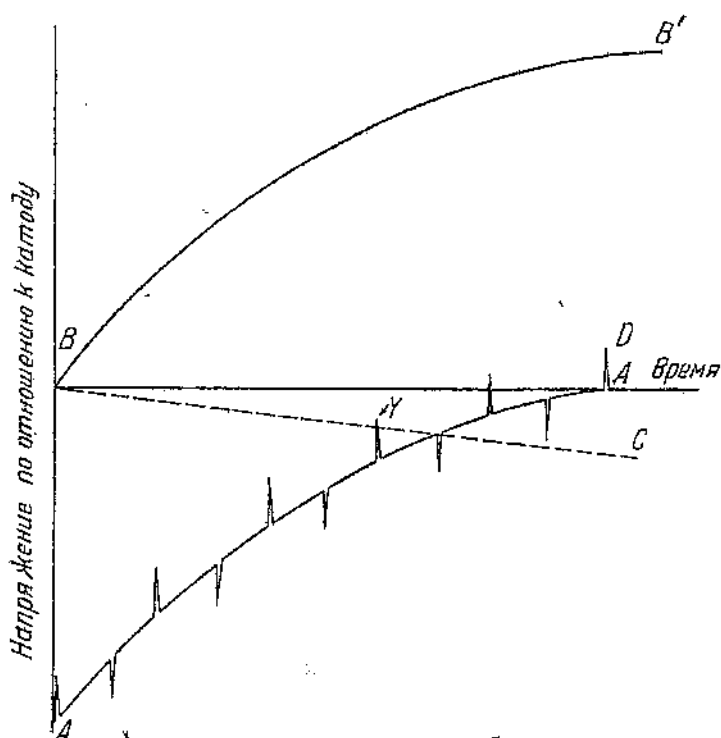
$$u = U - Ue^{-\frac{\Delta t}{r \cdot C}} \text{ В.}$$

Напряжение на сопротивлениях  $R_1$  и  $R_5$  соответственно уменьшится. Уменьшение напряжения на реостатах происходит по закону экспоненциальной кривой, по которой возрастает напряжение на конденсаторе  $C_1$ . Напряжение на аноде и катоде тиратрона  $T_1$  в каждый отдельный момент времени равно напряжению на конденсаторе. Отрицательное напряжение смещения сетки тиратрона  $T_1$  имеет переменное значение и также зависит от напряжения на конденсаторе (фиг. 235). Изменение сеточного напряжения происходит по тому же экспоненциальному закону и зависит от параметров цепи времени. Кроме того, на кривую сеточного напряжения накладывается еще импульсная кривая напряжения от пикового трансформатора  $T_1$ .

Кривые напряжения в зависимости от времени показаны на фиг. 236. Кривая  $BB'$  здесь представляет изменение напряжения на конденсаторе  $C_1$  (фиг. 235) и одновременно на тиратроне  $T_1$ .



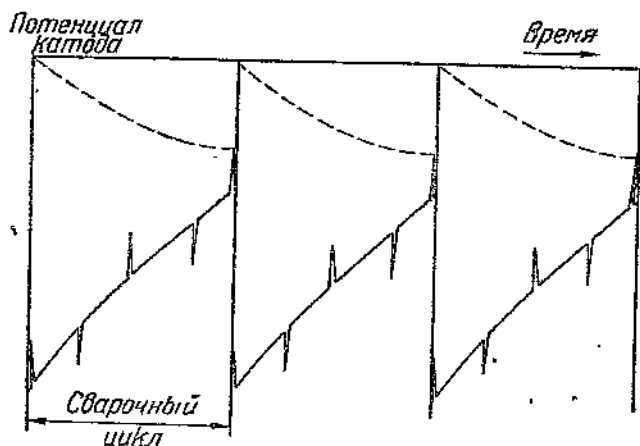
Фиг. 235. Цепь регулирования времени сварки тиратронного прерывателя.



Фиг. 236. Кривые напряжения зажигания тиратрона в цепи времени.

Кривая  $BC$  (фиг. 236) — характеристика зажигания тиратрона  $T_1$ . Кривая  $D$  — сеточное напряжение. В точке  $Y$  кривая сеточного напряжения пересекает критическую кривую зажигания тиратрона, что указывает момент разряда конденсатора  $C_1$  на тиратрон  $T_1$ . Разряд конденсатора на тиратрон происходит мгновенно. Дроссель  $X_2$ , включенный последовательно с анодом тиратрона, накапливает электромагнитную энергию  $\frac{LI^2}{2}$  и затягивает процесс протекания тока. При этом происходит зарядка конденсатора  $C_1$  в обратном направлении, в результате чего прекращается прохождение тока в тиратроне  $T_1$ .

Теперь весь процесс зарядки должен повторяться вновь, и в цепи времени начнется повторный цикл. Разобранная цепь времени управляет сеткой тиратрона  $T_4$  (фиг. 234).



Фиг. 237. Кривые напряжения зажигания в цепи времени для трех циклов сварки.

На фиг. 237 показано изменение напряжения при работе цепи времени для трех сварочных циклов.

Напряжение на сетке ведущей лампы будет зависеть от положения движка потенциометра  $R_2$  и величины емкости в цепи времени (обозначения дальше идут по фиг. 234 и 235).

В первый момент включения постоянного тока в цепь времени, когда все напряжение ложится на зажимы сопротивления  $R_5$  и  $R_1$  (начало зарядки конденсатора  $C_1$ ), сетка лампы  $T_4$  также получает максимальное положительное напряжение; по мере зарядки конденсатора  $C_1$  это напряжение падает по экспоненциальной кривой:

$$U_{\text{сетки}} = IR_2 - U_{\text{конд}}$$

В некоторый момент напряжение на сетке станет настолько малым, что лампа в следующий полупериод уже не зажигается.

Как только ведущая лампа  $T_4$ , получив импульс зажигания из цепи времени, пропустит первую полуволну тока, начнет ра-

ботать импульсный трансформатор  $T_2$ , первичная обмотка которого включена в анодные цепи ламп  $T_4$  и  $T_3$ . Импульсная кривая накладывается на сеточное напряжение прицепной лампы  $T_3$  и отпирает ее вслед за ведущей лампой  $T_4$ . Пропустив вторую полуволну, лампа  $T_3$  тухнет, но импульсная кривая сеточного напряжения ведущей лампы накладывается на кривую сеточного напряжения ведущей лампы  $T_4$ , отпирает ее вновь, а каждое зажигание ведущей лампы влечет за собой зажигание прицепной лампы. Так будет продолжаться до тех пор, пока напряжение на сетке ведущей лампы не станет настолько малым, что лампа  $T_4$  не сможет зажечься. Момент потухания лампы  $T_4$  можно точно регулировать потенциометром  $R_2$  (фиг. 235).

В зависимости от величины введенного сопротивления меняется абсолютная величина сеточного напряжения лампы  $T_4$ . При введенном сопротивлении  $R_2$  можно получить непрерывное токопрохождение, так как даже при минимальном напряжении на сетке, получаемом из цепи времени, суммарное напряжение с импульсной кривой оказывается больше критического напряжения этой лампы, и, наоборот, при полностью выведенном  $R_2$  ведущая лампа, пропустив один полупериод, потухнет и вновь зажечься не сможет до тех пор, пока не получит новый импульс из цепи времени.

Время между двумя импульсами из цепи времени на сетку ведущей лампы есть время полного сварочного цикла и равно времени зарядки конденсатора  $C_1$ . Это время весьма точно регулируется в определенных пределах, зависящих от величины  $C_1$  и  $R_1$ . Итак, регулируя  $R_1$ , можно установить необходимую продолжительность сварочного цикла, а регулируя  $R_2$  — продолжительность прохождения сварочного тока, т. е. п. к. р., с которым будет работать сварочная машина.

### 89. Элементы расчета сериес-трансформатора

В точечных и роликовых машинах, у которых сварочный процесс ведется при помощи прерывателей, нагрузка является повторно-кратковременной. При точечной сварке частота обычно меньше, а при роликовой — значительно больше. Частота нагрузки характеризуется коэффициентом п. к. р., равным отношению чистого времени сварки к времени полного цикла. Для роликовых машин этот коэффициент редко превышает 0,6, а для точечных — порядка 0,1 ÷ 0,25. Естественно, что нагревание обмоток трансформатора при прерывистой нагрузке будет менее, чем при продолжительной нагрузке. С этим вопросом приходится также сталкиваться при расчете трансформаторов для сварки сопротивлением. Сериес-трансформатор в цепи прерывателя должен пропустить весь ток первичной цепи сварочной машины через свою первичную обмотку, когда горят силовые тиратроны. Следовательно, максимальная мощность сериес-трансформатора должна быть равна максимальной мощности сварочной машины.

Однако при расчете допустимой нагрузки на медь обмотки трансформатора надо принимать во внимание повторно-кратковременный характер нагрузки.

Если обозначим длительность сварки в каждой точке через  $t_c$  сек., а длительность паузы между отдельными сварками  $t$ , то время всего цикла выразится  $T = t_c + t$ .

Далее требуется определить величину продолжительного тока, эквивалентную максимальному значению тока сериес-трансформатора. Она может быть найдена из соотношения теплового равновесия  $I_{np}^2 \cdot T = I_{max}^2 \cdot t_c$ , откуда  $I_{np} = I_{max} \sqrt{\frac{t_c}{T}}$ , где  $I_{np}$  — продолжительный (расчетный) ток трансформатора.

Исходя из этих уравнений, следует выбрать необходимое сечение проводов обмоток сериес-трансформатора по продолжительному току. Что же касается сечения железа трансформатора, то оно вычисляется для максимальной мощности. Встречающаяся в литературе формула расчета сериес-трансформатора

$$W_{сер} = W_{max} \sqrt{\frac{t_c}{T}}$$

относится исключительно к обмоткам, но не ко всему трансформатору. Основной расчет трансформатора ведется обычным способом.

## 90. Тиратронный прерыватель системы инж. Ф. И. Кислюка<sup>1</sup>

Схема тиратронного прерывателя системы Кислюка также относится ко второй группе аппаратов. Она отличается от других схем этой группы. Во-первых, во вторичной высоковольтной цепи сериес-трансформатора включен один тиратрон вместо двух (фиг. 238), чем достигается экономия в одной лампе; кроме того, в схемах с двумя лампами требуются две отдельные высокоизолированные цепи питания сеток и накала тиратронов, при одной же лампе имеется всего одна сеточная цепь с заземленным катодом на тиратроне.

Второе преимущество схемы относится к автоматизации управления. Главный (сварочный) ток здесь коммутируется при помощи тиратрона, а сеточный ток к тиратрону — при помощи синхронного коммутатора и магнитного реле.

а) Форма и амплитуда кривой тока. Необходимо исследовать изменение формы кривой установившегося тока в первом контуре схемы, когда в третьем контуре включен один управляемый выпрямитель. Для этого напишем уравнение

<sup>1</sup> Эта схема была опробована автором в лаборатории акад. К. И. Шенфера во Всесоюзном электротехническом институте (ВЭИ) в 1934 г. Построенные аппараты по этой схеме работают безаварийно по настоящее время.

Кроме этой схемы автор разработал еще тиратронный прерыватель с автоматическим управлением от фотоэлемента. Схема описана в журн. „Электричество“ № 10, 1935. Эта схема была опробована в 1934—1935 г. и показала хорошие результаты.

баланса напряжения в первой цепи, приводя индуктивность вторичного контура к первичной цепи

$$U_{1m} \sin \omega t = i_1 R_1 + \omega L \frac{di_1}{dt} + \omega M_1 \frac{di_2}{dt} \quad (84)$$

или

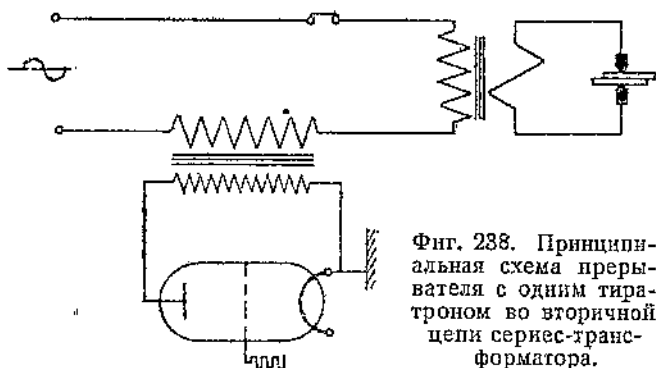
$$U_{1m} \sin \omega t dt = i_1 R_1 dt + \omega L di_1 + \omega M_1 di_2.$$

Проинтегрировав почленно обе части уравнения за время полного периода  $T = 2\pi$ , легко убедиться, что ток в первичной цепи представляет собой переменный ток:

$$U_1 \int_0^{2\pi} \sin \omega t dt = R_1 \int_0^{2\pi} i_1 dt + \omega L \int_0^{2\pi} di_1 + \omega M_1 \int_0^{2\pi} di_2$$

или

$$0 = R_1 \int_0^{2\pi} i_1 dt + 0 + 0.$$



Все члены уравнения имеют период  $2\pi$  и равны нулю. Полученное равенство действительно может наблюдаться, если только первичный ток не имеет постоянной слагающей и является переменным током. Эксперименты, проведенные автором<sup>1</sup>, были направлены в сторону сравнения форм кривых токов в первом и во втором контурах схемы при одно- и двухстороннем выпрямлении тока в третьем контуре; они показаны на осциллограммах фиг. 239 и 240.

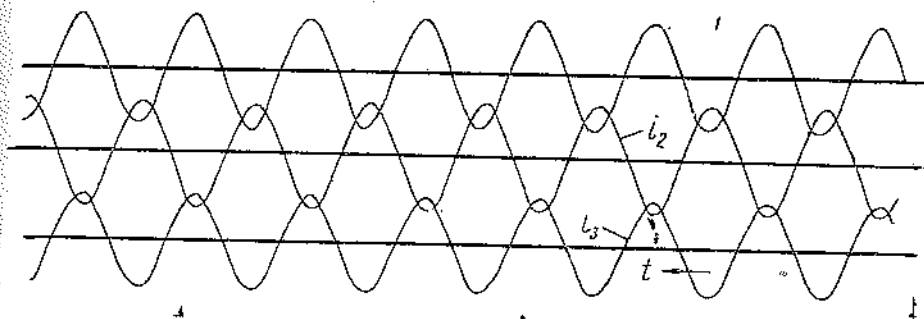
На каждой из этих осциллограмм записаны кривые токов во всех трех контурах.

При сравнении соответствующих кривых на осциллограммах фиг. 239 и 240 нельзя заметить существенной разницы между амплитудами кривых токов в первичной и сварочной цепях, между тем как в третьем контуре кривые токов имеют различные формы и амплитуды. Это подтверждает сделанные выше выводы, что токи в первом и во втором контурах не меняют

<sup>1</sup> См. статью автора в журн. „Электричество“ № 10, 1935 г.

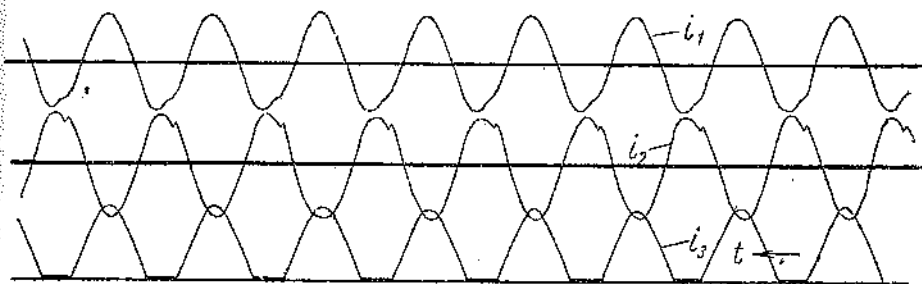


амплитуды и формы при замене двух выпрямителей во вторичной цепи сериес-трансформатора одним. Едва уловимое искажение заметно все же на кривых  $i_1$  и  $i_2$  (фиг. 240) в момент исчезновения анодного тока. Это искажение настолько незначительно, что не влияет на амплитуду тока (на осциллограмме кривая  $i_2$  смещена на  $180^\circ$ ). Таким образом выбранная нами схема с одним тиратроном в третьем контуре вполне рентабельна и чрезвычайно упрощает схему аппарата в эксплуатации. Как видно из



Фиг. 239. Осциллограмма токов трех цепей сварочной установки при двух тиратронах, включенных во вторичной цепи сериес-трансформатора.

$i_1$  — ток первичной цепи сварочной машины;  $i_2$  — ток вторичной (сварочной) цепи машины;  $i_3$  — ток вторичной (высоковольтной) цепи сериес-трансформатора.



Фиг. 240. Осциллограмма токов трех цепей сварочной установки при одном тиратроне, включенном во вторичной цепи сериес-трансформатора.

$i_1$  — ток первичной цепи машины;  $i_2$  — ток вторичной (сварочной) цепи машины;  $i_3$  — ток вторичной цепи сериес-трансформатора.

приведенных осциллограмм, при равных сварочных мощностях амплитуда анодного тока в третьем контуре в схеме с одним выпрямителем получается в два раза больше, чем амплитуда при двух выпрямителях. Увеличение амплитуды анодного тока не вносит каких-либо помех в работу выбранной схемы. Амплитуду анодного тока можно регулировать изменением коэффициента трансформации сериес-трансформатора.

б) Работа схемы. При точечной сварке необходимо, чтобы в месте соединения металла был пропущен только один импульс сварочного тока с заданной продолжительностью. Вслед за тем схема должна работать так, чтобы исключена была возмож-

ность повторного прохождения тока в данной точке соединения при любой длительности сжатия свариваемых листов. После разжатия электродов сварочного контура (для перемещения детали) должна быть обеспечена возможность повторения сварочного процесса. При роликовой сварке каждый импульс тока сопровождается паузой холостого хода, при этом отношение между паузой и продолжительностью сварки должно регулироваться в широких пределах. Указанные требования соблюдены в рассматриваемом аппарате.

Автоматизация управления в этой схеме осуществляется при помощи трех элементов: синхронного коммутатора, магнитного реле и статического фазовращателя. Эта схема предусматривает возможность сварки продолжительностью от нескольких секунд до тысячных долей секунды. Время сварки в пределах одного периода тока регулируется при помощи фазовращателя, состоящего из мостика сопротивления и емкости. Как было указано выше, таким фазовращателем удается точно регулировать фазу зажигания тиратрона в пределах от 0 до 180°. Магнитное реле необходимо только при точечной сварке. Оно обеспечивает прохождение тока в каждой отдельной сварочной точке только один раз.

Аппарат действует (фиг. 241) следующим образом: до начала сварки тиратрон заперт отрицательным потенциалом от системы купроксных выпрямителей 3, поэтому при замыкании электродов сварочной машины на деталь сварка не произойдет.

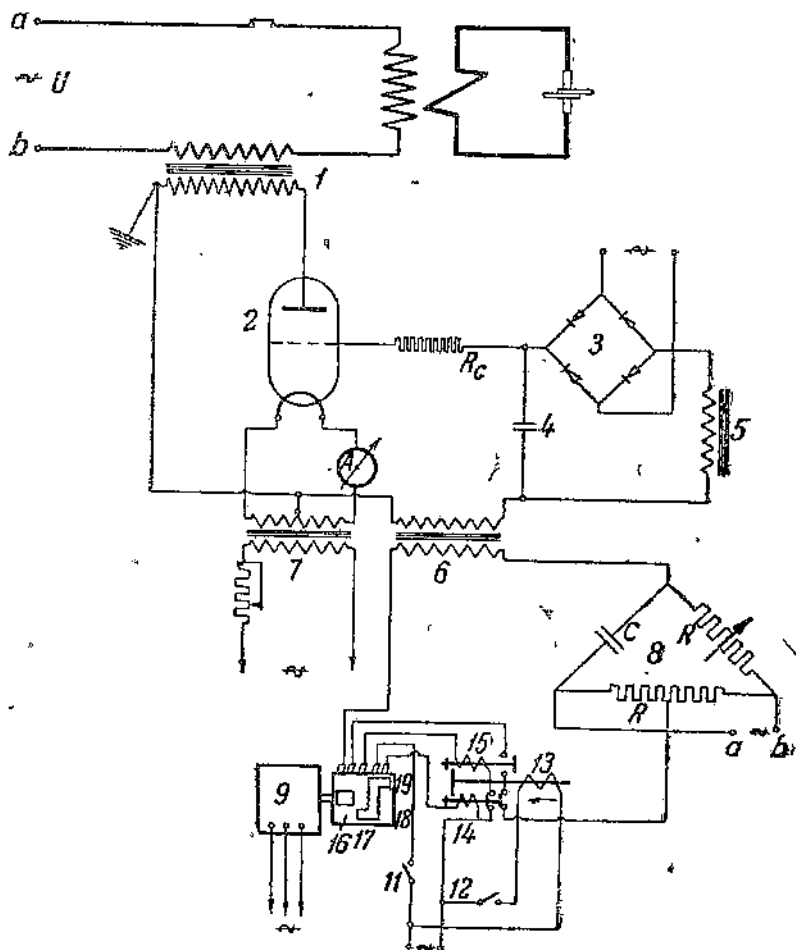
Для дальнейшего выяснения действия этой части схемы прием положение коммутатора 17 на чертеже, соответствующее некоторому моменту времени. Вначале включается на незначительный промежуток времени (доли секунды) скользящий контакт 12 при помощи подвижного механизма машины в момент перемещения верхнего электрода. Катушка электромагнита 13 выталкивает стержень влево, замыкает верхние контакты, а нижние две пары контактов одновременно размыкает, и они остаются в таком положении. При нажатии сварщиком кнопки 11 замыкается на верхней пластинке коммутатора 17 правая пара щеточек, благодаря чему включается катушечка нижнего реле 14, которое замыкает нижние две пары контактов реле.

В следующий момент времени замыкается крайняя левая пара щеточек на отдельном сегменте 16 коммутатора 17, и первичная цепь импульсного (сеточного) трансформатора 6 приключается таким образом к напряжению сети.

Сеточный трансформатор 6 включен таким образом, что в момент положительного напряжения на аноде импульс напряжения его вторичной обмотки также положителен. Величина этого импульса гораздо больше напряжения отрицательного смещения на сетке, поэтому тиратрон зажжется.

Длительность включения сеточного трансформатора регулируется изменением числа оборотов коммутатора 17 при помощи сцепленного с ним редуктора; после того как щеточки сбегают с сегмента 16, размыкается первичная обмотка сеточного транс-

форматора. Чтобы при следующем обороте коммутатора первичная обмотка не оказалась вновь включенной и сварка не повторилась в одном и том же месте, предусмотрена нижняя часть пластинки 18 на коммутаторе, которая тут же замыкает другую



Фиг. 241. Принципиальная схема тиратронного прерывателя для контактной сварки, системы автора.

1 — трансформатор серийный; 2 — тиратрон; 3 — купроксные выпрямители; 4, 5 — дроссель и конденсатор фильтра; 6 — трансформатор импульсный; 7 — трансформатор накали; 8 — статический фазовращатель; 9 — синхронный коммутатор; 11, 12 — контакты; 13 — электромагнит; 14, 15 — реле; 16 — сегмент коммутатора.

пару щеточек, благодаря чему включается верхнее реле 15 и соответствующая пара контактов этого реле размыкается. Тем самым повторно отключается сеточный трансформатор и тиратрон больше не сможет загореться, следовательно на изделии получим сварку только от одного импульса тока.

Повторная сварочная точка на изделии возможна лишь тогда, когда подвижной электрод сварочной машины будет освобожден от силы сжатия и своим обратным движением вновь замкнет скользящий контакт 12 магнитного реле. Тогда внутри реле произойдет переключение контактов, как было указано несколько выше, и аппарат будет снова готов к повторному процессу. Для большей точности фиксации момента зажигания взят сеточный трансформатор с острой (пикообразной) кривой вторичного напряжения.

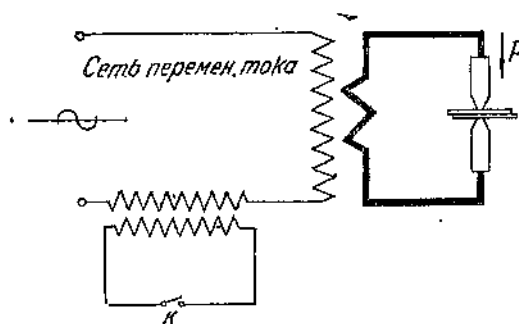
Для роликовой сварки магнитное реле в этой схеме оказывается ненужным и его следует закортить. Сварочный шаг, или цикл, подбирают при этом только с помощью редуктора, имеющего шесть ступеней скорости. Редуктор на этой схеме не указан.

### 91. Коммутация тока

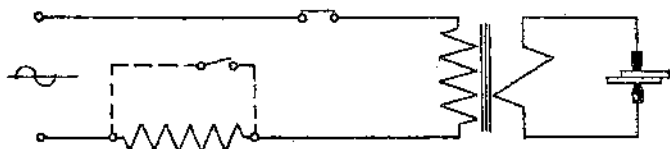
Для некоторого упрощения задачи исследования коммутации тока в схемах, относящихся ко второй группе, и построения теоретических кривых тока заменим выпрямители в схеме

(фиг. 221 и 238) обычным однополюсным рубильником (фиг. 242). Обозначим через  $Z_1$  полное сопротивление первичной цепи при разомкнутом рубильнике, а при включенном —  $Z_2$ .

Если представить себе вместо сериес-трансформатора дроссельную катушку с железом, тогда схема примет вид фиг. 243. Коммутация сварочного тока сводится в данном случае ко включению и выключению рубильника. Этим изменяется ток первичного контура от  $i_0$  (при разомкнутом  $K$ ) до  $i_1$  (при замкнутом  $K$ ).



Фиг. 242. Схема, где для ясности токопрерыватель заменен однополюсным рубильником.



Фиг. 243. Схема замещения токопрерывателя с сериес-трансформатором.

Для подсчета кривой результирующего тока первой цепи  $i_1'$  при параметрах данной схемы напишем уравнение переходного режима с учетом тока холостого хода. Результирующий ток в первой цепи нашей схемы при коммутации будет равен сумме свободного и последующего после коммутации установившегося

тока. Свободный ток в момент изменения индуктивного сопротивления в первой цепи той же схемы будет равен и противоположен разности между последующим и предыдущим установленными токами, взятыми для момента включения ( $t = 0$ ). Номинальный ток первичной цепи при сварке

$$i_1 = \frac{E_m \sin(\omega t - \varphi_2)}{Z_2}. \quad (85)$$

Номинальный ток первичной цепи при разомкнутом  $\kappa_1$

$$i_0 = \frac{E_m \sin(\omega t - \varphi_1)}{Z_1}. \quad (86)$$

Тогда свободный ток согласно определению равен

$$i_1'' = -(i_1 - i_0) e^{-\alpha_1 t} \quad (87)$$

или

$$\begin{aligned} i_1'' &= -E_m \left( -\frac{\sin \varphi_2}{Z_2} + \frac{\sin \varphi_1}{Z_1} \right) e^{-\alpha_1 t} = \\ &= E_m \left( \frac{\sin \varphi_2}{Z_2} - \frac{\sin \varphi_1}{Z_1} \right) e^{-\alpha_1 t}. \end{aligned}$$

Результирующий ток включения получим из суммы свободного и установившегося токов:

$$i_{1 \text{ вк}}' = \frac{E_m \sin(\omega t - \varphi_2)}{Z_2} + E_m \left( \frac{\sin \varphi_2}{Z_2} - \frac{\sin \varphi_1}{Z_1} \right) e^{-\alpha_1 t}. \quad (88)$$

Полный цикл сварочного процесса длится в течение заданного промежутка времени, по истечении которого условный рубильник  $\kappa$  должен быть разомкнут. Результирующий ток при выключении  $\kappa$  выразится по аналогии с равенством (88) следующим уравнением:

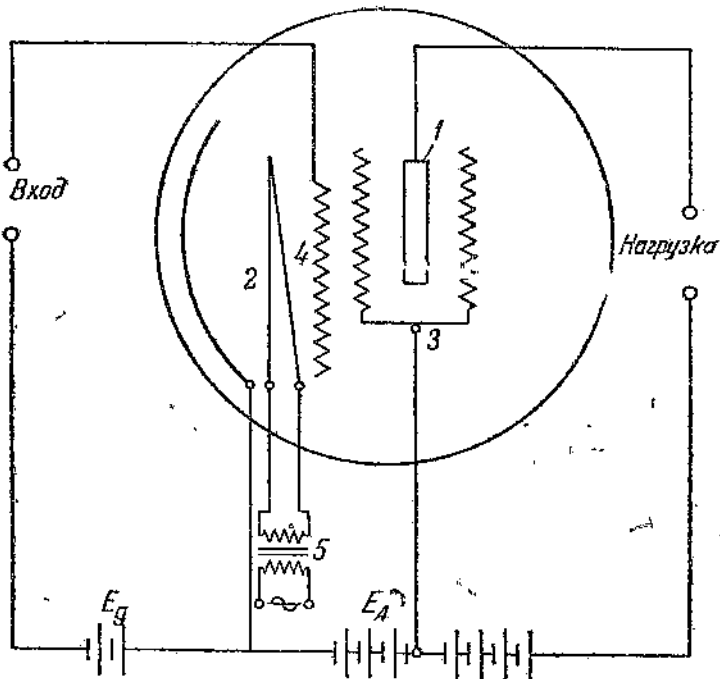
$$i_{1 \text{ вык}} = \frac{E_m \sin(\omega t - \varphi_1)}{Z_1} + E_m \left( \frac{\sin \varphi_1}{Z_1} - \frac{\sin \varphi_2}{Z_2} \right) e^{-\alpha_1 t}. \quad (89)$$

Наложением токов  $i_{1 \text{ вк}}'$  и  $i_{1 \text{ вык}}$  можно вычислить кривые тока сварочного цикла любой продолжительности при двухполупериодном выпрямлении. Остается еще определить коэффициент затухания  $\alpha_1$  заданного контура. Коэффициент затухания получим из решения дифференциальных уравнений свободных токов для всех трех контуров.

## КОНТРОЛЬНАЯ АППАРАТУРА

## 92. Электронный аппарат по контролю качества точечной сварки системы Сияки (Sciaky, Франция)

а) Принцип действия аппарата. Этот аппарат предназначен для контроля качества точечной сварки методом сопротивления. Идея его заключается в контроле сварки по величине падения напряжения в сварочном контакте в момент окончания



Фиг. 244. Схема включения усилительной лампы с экранирующей сеткой.

1 — анод; 2 — катод; 3 — экранирующая сетка; 4 — управляемая сетка; 5 — трансформатор накала.

чания сварки данной точки. Эта разность потенциалов подводится к сеткам тиратронов и реагирует на их включение в цепь сигнальных аппаратов (звонок, лампочка).

Однако разность потенциалов на электродах точечной машины при сварке редко превышает 2—3 В, что, конечно, недостаточно для управления сетками тиратронов. Поэтому необходимо предварительно еще увеличить напряжение до 50—100 В. Для повышения напряжения применяется так называемая схема усиления низкой частоты на сопротивлениях.

Указанное напряжение на электродах в момент сварки под-

водится к сетке усилительной лампы и усиливается в сто с лишним раз. Лампа с экранирующей сеткой используется обычно для усиления напряжения.

Как видно из фиг. 244, усилительная лампа с экранирующей сеткой состоит из анода, нити накала, катода, управляемой сетки, расположенной между анодом и катодом, и экранирующей сетки, находящейся вокруг анода.

Принципиальная схема аппарата по контролю качества сварки показана на фиг. 245.

Анодное напряжение усилительной лампы 1, увеличенное примерно в 100 раз по сравнению с падением напряжения на сварочных электродах, приключено параллельно к сеткам двух маленьких тиратронов 3 и 4.

Питание анодных цепей тиратронов производится постоянным током от купроксных выпрямителей, включаемых при помощи магнитных реле в сеть. Ограничительное сопротивление, включенное в сеточные цепи тиратронов, подобрано таким образом, что при нормальной сварке напряжение, подводимое к сеткам тиратронов от усилительного контура, достаточно для зажигания только одного тиратрона.

С увеличением сварочного тока, когда происходит пережог или даже перегрев металла (при одном и том же давлении на электроды), падение напряжения в сварочном контакте возрастает. Незначительное повышение напряжения на электродах, увеличенное через усилительный контур, оказывается достаточным для одновременного зажигания обоих тиратронов.

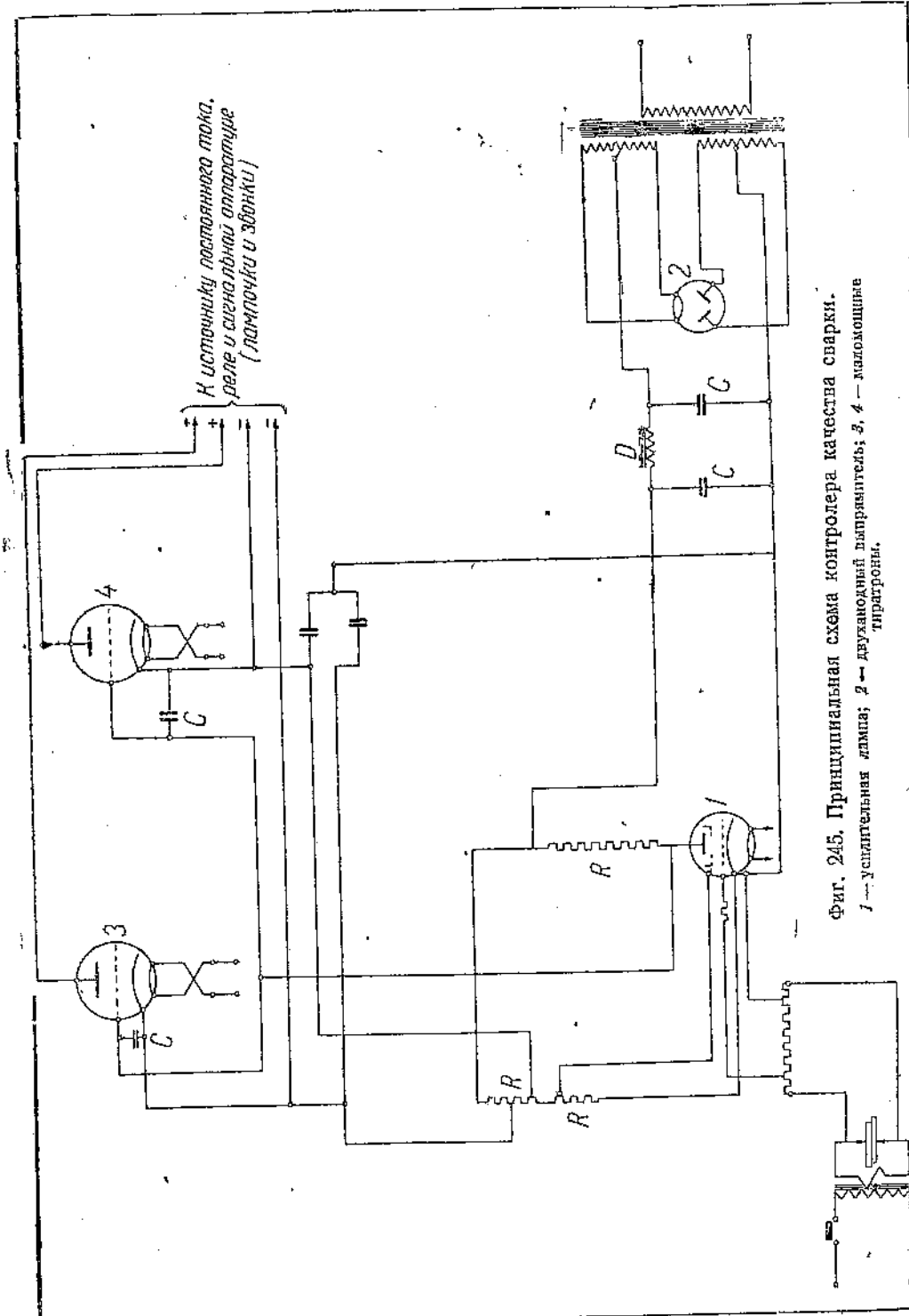
В случае уменьшения значения сварочного тока при одинаковом давлении на электроды (по причине загрязнения места контакта или уменьшения подводимого напряжения) происходит непровар данной точки. При этом падение напряжения в сварочном контакте понижается, и ни один из двух тиратронов не зажигается.

Эти три явления (непровар, нормальная сварка и пережог) фиксируются каждый раз на аппарате световыми и звуковыми сигналами, по которым определяется качество сварки для каждой точки. При нормальной сварке загорается белая сигнальная лампочка. В случае непровара деталей загорается зеленая лампочка и одновременно звенит металлический звонок. При перегреве металла под электродами (пережог) загорается красная сигнальная лампочка и одновременно срабатывает звонок по деревянной чашечке.

Схема указанного аппарата является довольно сложной и состоит из следующих основных элементов:

- 1) выпрямительного контура с двуханодным кенотроном, обеспечивающим питание анода усилительной лампы и отрицательное смещение на сетках тиратронов;
- 2) усилительного контура;
- 3) двух тиратронов;
- 4) системы сигнализации и трех счетчиков, регистрирующих

К источнику постоянного тока,  
реле и сигнальный аппарат  
(лампочки и звонки)



Фиг. 245. Принципиальная схема контролера качества сварки.  
1 — усилительная лампа; 2 — двуэлектродный выпрямитель; 3, 4 — маломощные  
тиратроны.

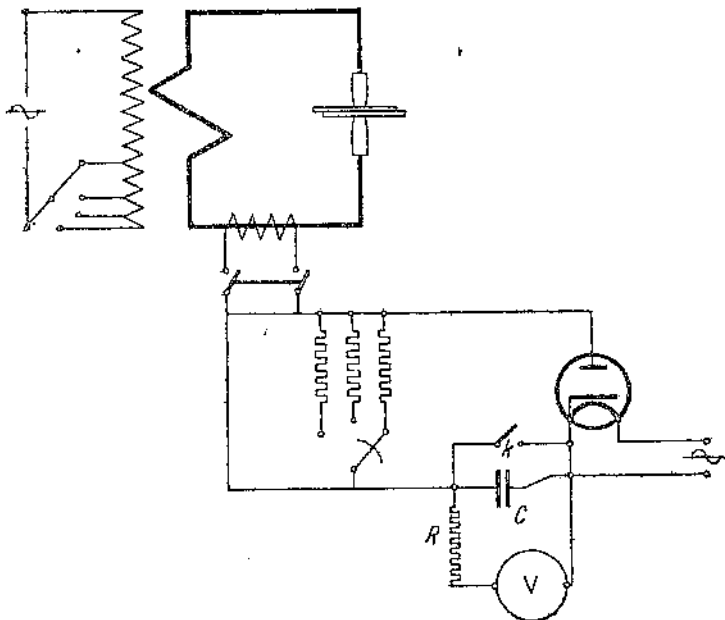


отдельно число точек нормальной сварки, непровара и пережога, имевших место при сварке данной детали;

Б) купроксных выпрямителей, питающих постоянным током анодные цепи тиратронов, реле счетчиков и четыре контактора.

Контроль качества контактной сварки имеет весьма актуальное значение, особенно в тех случаях, когда речь идет о сварке ответственных деталей и конструкций.

Пережог металла является наиболее наглядным и не требует еще особой сигнализации. Наиболее опасным является непровар сварной точки, который по внешнему виду обнаружить весьма трудно. Между тем, метод контроля должен обеспечить надежное отличие нормальной сварки от непровара.



Фиг. 246. Схема электронного амперметра переменного тока для кратковременных импульсов сварочного тока.

Аппарат Сняки контролирует сварочный процесс лишь в отношении отклонения от режима первоначальной настройки сварочной машины на нормальную сварку, что является лишь приближенным методом.

### 93. Прибор для измерения величины сварочного тока при сварке сопротивлением

При малых продолжительностях времени сварки оказывается весьма затруднительным точно измерить величину протекающего тока.

Указанные в фирменных каталогах величины сварочного тока в большинстве случаев вычислены очень приближенно по за-

данному коэффициенту трансформации. Определенные подобным образом значения сварочного тока весьма далеки от действительной силы тока по двум причинам:

1. Изменение сопротивления сварочного контакта или конфигурации внешнего контура, влияющее на величину сварочного тока, не учитывается расчетной величиной тока.

2. В случае асинхронного прерывания тока возникает в сварочной цепи дополнительный свободный ток (неустановившегося режима) в момент включения и выключения, который также не учитывается.

Точное измерение этого тока может быть произведено при помощи осциллографической записи, но этот способ весьма громоздок и возможен только в лабораторных условиях. В связи с этим представляет несомненный интерес измеритель переменного тока, схема которого представлена на фиг. 246.

Принцип его действия заключается в следующем: на шину внешнего контура сварочной машины надета обмотка, присоединенная через шунтирующее сопротивление к конденсатору и выпрямительной лампе. Когда лампа горит и ключ  $K$  разомкнут, происходит заряд конденсатора  $C$ . Как известно, заряд конденсатора прямо пропорционален продолжительности протекания тока и его величине. Напряжение на зажимах конденсатора, которое может служить мерой его заряда, измеряется высокоомным вольтметром. Точность прибора лежит в пределах  $\pm 5\%$ . В момент сварки стрелка вольтметра быстро отклоняется, затем возвращается обратно на несколько делений, останавливается и затем медленно возвращается к нулю. Отсчет производится в момент, когда стрелка неподвижна.

Указанный прибор пригоден для измерения кратковременного импульса тока, начиная от 0,04 сек. и более.

#### 94. Приближенное измерение величины импульса сварочного тока

Определение величины сварочного тока в процессе сварки может быть приближенно произведено при помощи обычного амперметра. Для этого следует снять с амперметра крышку или стекло и при помощи карандаша или тонкой палочки отодвинуть стрелку по циферблату и удержать ее в этом положении во время сварки у наиболее вероятной цифры силы тока. После первого сварочного импульса стрелку осторожно передвигают карандашом до такой точки, при которой стрелка остается уже при каждой сварке неподвижной.

Полученная величина есть действительная величина тока, протекающего через первичную обмотку сварочной машины. Время продолжительности сварки не влияет на точность полученного результата. Величина тока, протекающего по сварочной цепи, может быть приближенно найдена умножением измеренной силы тока в первичной цепи на соответствующий данной ступени коэффициент трансформации.

## МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

## 95. Опытные данные индуктивных и омических сопротивлений сварочных машин

Для определения величин сопротивлений сварочного трансформатора опытным путем необходимо снять характеристику холостого хода, короткого замыкания и измерить также сопротивление обоих контуров постоянным током.

Определение величин холостого хода опытным путем сводится к измерению четырех значений: силы тока первичной обмотки, подводимого напряжения, мощности и вторичного напряжения. По найденным величинам определяют коэффициент трансформации для каждой ступени, а также активное, индуктивное и полное сопротивление первичной обмотки, т. е.

$$Z_0 = \frac{U_0}{I_0}; \quad R_1 = \frac{W_0}{I_0^2},$$

откуда

$$X = \sqrt{Z_0^2 - R_1^2}.$$

При измерении сопротивлений обмоток постоянным током следует отметить наиболее простой и надежный способ — метод амперметра и вольтметра. В особенности для вторичного контура, где сопротивление его получается порядка  $10^{-4}$ — $10^{-5}$  Ом, во избежание ошибок следует проводить измерение методом амперметра и вольтметра током в 100—200 А.

Опыт короткого замыкания производят обычно при пониженном первичном напряжении и замкнутой вторичной цепи. Напряжение, подведенное к первичной обмотке, должно иметь такую величину, при которой токи в обеих обмотках получаются номинального значения. Такое напряжение называется номинальным напряжением короткого замыкания и обозначается через  $E_k$ .

$$e_k = \frac{E_k \cdot 100}{U_{ном}} \%,$$

где  $e_k$  — напряжение короткого замыкания в процентах;

$U_{ном}$  — номинальное напряжение сети.

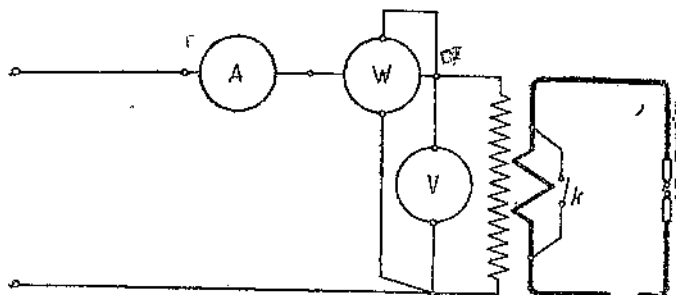
Опыт короткого замыкания сварочной машины производится два раза. Один раз без внешнего контура с короткозамкнутой вторичной обмоткой (фиг. 247), когда рубильник  $K$  замкнут, и второй раз с приключенным внешним контуром, замкнутым на конце медной трубкой, вместо электродов (фиг. 248). Опыт короткого замыкания сводится к измерению трех величин: тока первичной цепи  $I_k$ , напряжения  $E_k$  и мощности  $P_k$ . Здесь мощность тратится на джоулевы потери в первичной и вторичной обмотках, соответствующие номинальному току. Напряжение

короткого замыкания  $E_k$  компенсируется омическим и индуктивным падением напряжения:

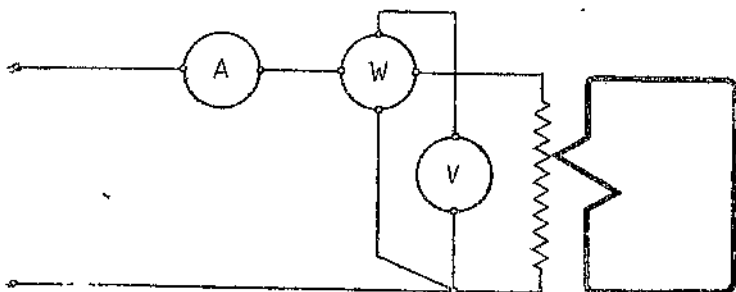
$$E_k = I_k Z_k.$$

Из полученных опытных данных определяем: активное сопротивление

$$R_k = \frac{P_k}{I_k^2},$$



Фиг. 247. Схема опытов короткого замыкания сварочного трансформатора без внешнего контура.



Фиг. 248. Схема опытов короткого замыкания всей сварочной установки.

кажущееся сопротивление

$$Z_k = \frac{E_k}{I_k}.$$

Индуктивность рассеяния  $X_s$  трансформатора выразится:

$$X_s = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2},$$

где

$$R_k = r_1 + r_2'; \quad r_2' = r_2 \left( \frac{w_1}{w_2} \right)^2;$$

$$X_s = X_{s_1} + X_{s_2} \left( \frac{w_1}{w_2} \right)^2,$$

где  $X_{s_1}$  — индуктивность рассеяния первичной обмотки;  
 $X_{s_2}$  — индуктивность рассеяния вторичной обмотки;  
 $X_{s_3}$  — индуктивность рассеяния внешнего контура.

Из первого опыта короткого замыкания (схема фиг. 247) получаем все необходимые данные для исследования самого трансформатора. Данные, полученные из второго опыта, являются суммарными данными и характеризуют одновременно параметры трансформатора с внешним контуром. Найденные значения из второго опыта определяют неизбежные потери аппарата при нормальной его работе. По указанным двум опытам короткого замыкания легко отделить вычитанием соответствующие потери во внешнем контуре от потерь в самом сварочном трансформаторе. Для второго опыта получим

$$R_{\kappa} = r_1 + r_2' + r_3',$$

где  $r_3'$  — приведенное сопротивление внешнего контура или

$$R_{\kappa} = r_1 + (r_2 + r_3) \left( \frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2;$$

соответственно

$$X_s = X_{s1} + (X_{s2} + X_{s3}) \left( \frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2.$$

По измеренным постоянным током значениям омического сопротивления и приведенным здесь формулам можно также определить значение коэффициента, представляющего отношение активного сопротивления при переменном токе к сопротивлению, измеренному постоянным током (коэффициент поверхностного эффекта):

$$m = \frac{R_{пер}}{R_{пост}} = \frac{R_{\kappa}}{r_1 + u^2 r_2},$$

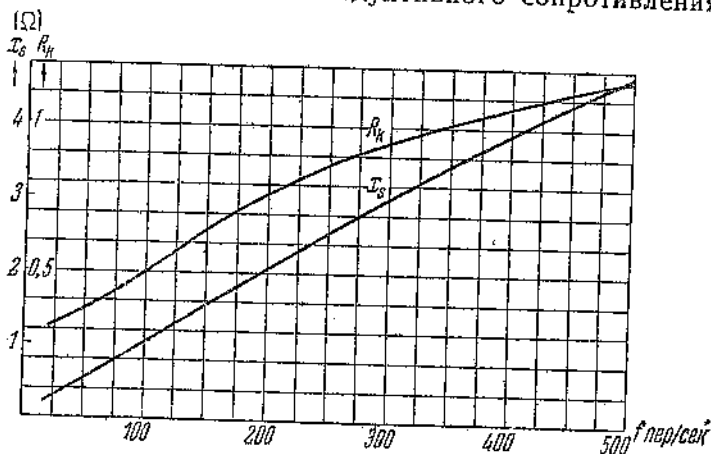
где  $r_1$  и  $r_2$  — омические сопротивления первичной и вторичной обмоток,  $u$  — коэффициент трансформации.

Ниже будут приведены опытные и расчетные данные для некоторых сварочных машин. Эти данные являются весьма необходимыми не только для вычисления значений токов, но также для выяснения влияния внешнего контура и сравнения при проектировании и эксплуатации новых машин. Кроме того, эти данные представляют еще интерес с точки зрения количественной оценки отдельных параметров, входящих в уравнения тока, и с точки зрения возможности регулирования сварочного тока при помощи изменения размеров внешнего контура машины.

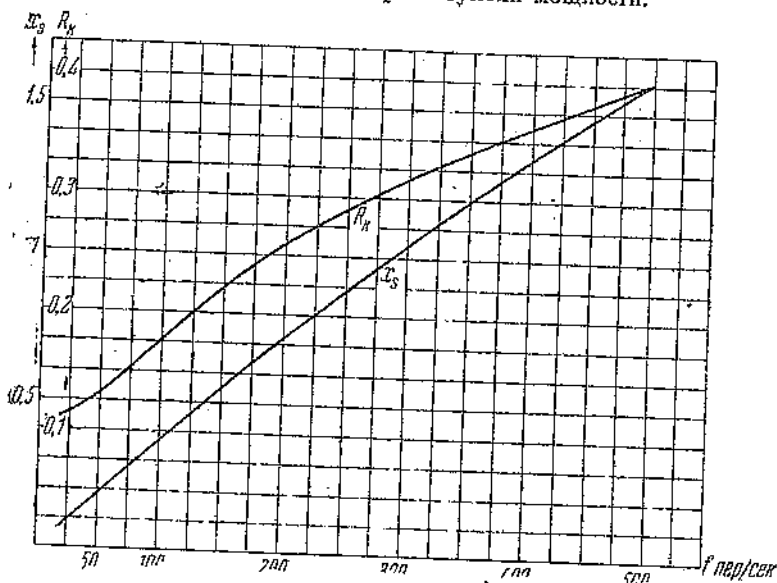
Напряжение короткого замыкания  $e_{\kappa}$  имеет определенное постоянное значение в нормальных силовых трансформаторах. В трансформаторах сварочных машин  $e_{\kappa}$  меняется по двум причинам: 1) от изменения числа витков первичной обмотки трансформатора, связанного с изменением ступени мощности, и 2) от конфигурации внешнего контура аппарата.

Представляет еще интерес влияние частоты тока на изменение коэффициента поверхностного эффекта и величину индуктивного сопротивления аппарата. Экспериментальные данные по

этим вопросам приведены на графиках для различных ступеней мощности АСН-25. На диаграммах фиг. 249 и 250 даны кривые изменения активного и индуктивного сопротивления в зави-



Фиг. 249. Кривые изменения активного и индуктивного сопротивлений сварочной машины АСН-25 в зависимости от применяемой частоты тока для второй ступени мощности.



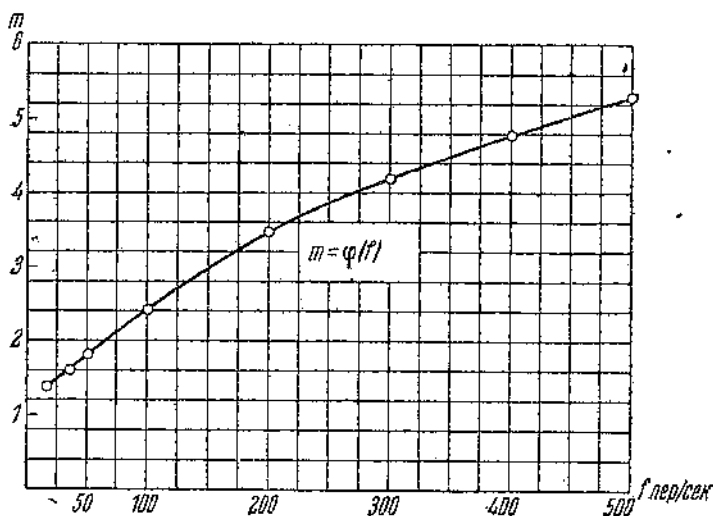
Фиг. 250. Кривые изменения сопротивлений от частоты сети для седьмой ступени мощности машины АСН-25.

симости от частоты тока, снятые для двух ступеней мощности АСН-25 при частотах, начиная от 16 до 500 Hz.

На фиг. 251 дана диаграмма изменения коэффициента поверхностного эффекта вторичного контура АСН-25, как функция частоты тока.

Коэффициент поверхностного эффекта для вторичной цепи АСН-25 весьма значителен и равен в среднем 1,8. Этот фактор должен быть учтен при проектировании.

В табл. 57—59 приведены данные электрического исследования роликовой машины АИШ-40 завода „Электрик“. Трансформатор этой машины рассчитан на продолжительную мощность 20 kVA. Омическое сопротивление всей вторичной цепи измерено постоянным током  $R_2 = 0,00017 \Omega$ . Сопротивление вторичного витка до внешнего контура  $r_2 = 0,000026 \Omega$ . Сопротивление внешнего контура АИШ-40  $R_{вн} = 0,000144 \Omega$ . Последнее



Фиг. 251. Кривая изменения коэффициента поверхностного эффекта вторичного контура сварочной машины в зависимости от частоты применяемого тока.

сопротивление является весьма значительным и объясняется частично окисленным состоянием постоянных контактов. Для этой машины опыт короткого замыкания производился два раза: без внешнего контура, для одной вторичной обмотки, при длине вылета  $l = 0$  и при полном внешнем контуре, замкнутом в конце, т. е. при  $l = l_{норм.}$

Здесь  $l = 900$  мм, расстояние между электрододержателями  $a = 200$  мм.

По данным опытов короткого замыкания без внешнего контура и с ним удастся определить также индуктивное сопротивление внешнего контура  $X_{S_{вн}}$ :

$$X_{S_{вн}} = \frac{X_s - X_{S_0}}{u^2}. \quad (69)$$

Данные машины АШ-40 при холостом ходе

№ ступени	Опытные данные					Расчетные данные						
	$U_1$	$I_0$	$W_0$	$U_2$	$r_1$	$u$	$Z_1$	$R_1$	$X_1$	$L_1$	$L_2$	$B$ гаусс
	V	A	W	V	Ω		Ω	Ω	Ω	H		
1	218	4	480	3,15	0,0200	70	55,5	30	46,5	0,1476	0,000030	8 100
2	218	5	550	3,4	0,0150	65	43,6	22	37,6	0,120	0,000028	8 700
3	218	7	650	3,7	0,0140	59,5	31,0	13,3	28,0	0,089	0,000025	9 500
4	218	9	770	4,2	0,013	52,5	24,2	9,5	22,3	0,071	0,000026	10 750
5	218	12	850	4,5	0,0125	49	18,1	5,9	17,1	0,0545	0,0000227	11 500
6	218	16	960	4,9	0,0120	45	13,6	3,75	13,1	0,0417	0,0000205	12 500
7	218	22	1130	5,35	0,0110	41	9,9	2,34	9,4	0,03	0,0000178	13 800

Таблица 58

Данные короткого замыкания (приведенные к первичной цепи) сварочной машины АШ-40 при отключенном внешнем контуре,  $l = 0^1$ 

№ ступени	Опытные данные			Расчетные данные				
	$U_k$	$I_k$	$W_k$	$e_k$	$Z_k$	$R_k$	$X_{so}$	$m$
	V	A	W	%	Ω	Ω	Ω	
1	59	138	3600	26,8	0,427	0,189	0,382	1,29
2	58	152	4100	26,3	0,380	0,177	0,336	1,41
3	57	180	4800	25,9	0,317	0,148	0,280	1,40
4	56	207	5400	25,5	0,270	0,126	0,239	1,49
5	55	226	5500	25,0	0,243	0,108	0,218	1,44
6	55	260	6300	25,0	0,211	0,093	0,189	1,44
7	54	285	6900	24,5	0,190	0,085	0,170	1,55

Среднее значение 1,43

<sup>1</sup> Величина вторичного тока определяется произведением первичного тока на соответствующий коэффициент трансформации.



Данные короткого замыкания (приведенные к первичной цепи) машины АИ-40 при включенном внешнем контуре,  $l=300$  мм,  $a=200$  мм

Опытные данные				Расчетные данные					
№ ступени	$U_k$	$I_k$	$W_k$	$\epsilon_k$ %	$\cos \varphi_k$	$Z_k$	$R_k$	$X_s$	$X_{s\text{ вн}}$
	V	A	W			$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$
1	215	180	28 600	98,0	0,60	1,19	0,73	0,943	0,00012
2	210	205	25 200	95,5	0,58	1,02	0,60	0,800	0,000114
3	210	235	28 400	95,5	0,57	0,895	0,515	0,73	0,000130
4	205	270	30 800	93,0	0,543	0,76	0,422	0,63	0,00014
5	203	295	32 500	92,0	0,54	0,69	0,373	0,58	0,00015
6	200	330	35 000	91,0	0,53	0,606	0,321	0,513	0,00016
7	195	360	37 000	89,0	0,51	0,54	0,285	0,458	0,00017

Сравнивая данные табл. 58 и 59, мы видим, что величины рассеяния  $X_s$  (приведенные к первичной цепи) при включенном внешнем контуре примерно в три раза более, чем при отключенном внешнем контуре,

где  $X_{s_0}$  обозначает индуктивное сопротивление рассеяния сварочного трансформатора без внешнего контура;

$X_s$  — индуктивное сопротивление машины при включенном внешнем контуре;

$k$  — коэффициент трансформации.

Как видно из табл. 59, значение  $X_{s\text{ вн}}$  претерпевает некоторое закономерное изменение по мере увеличения номера ступени мощности. Здесь, повидимому, сказывается влияние насыщения железа по мере увеличения индукции.

Данные испытания установки с переносными клещами для точечной сварки мощностью 200 kVA помещены в табл. 60—64. Более подробные данные относительно работы и устройства этой установки были разобраны в гл. VII.

Сопротивление вторичного витка трансформатора 200 kVA без внешнего контура, измеренное, как в предыдущих случаях, постоянным током, равно

$$r_2 = 0,000039 \Omega.$$

Сопротивление всего вторичного контура, куда входят: вторичный виток, внешний контур длиной  $l=4$  м, а также сварочные клещи, будет

$$R_2 = 0,00087 \Omega.$$

Данные холостого хода сварочного трансформатора в 200 kVA

№ ступени	Опытные данные					Расчетные данные						
	$U_1$	$I_1$	$W_1$	$U_2$	$r_1$	$\mu$	$Z_1$	$R_1$	$X_1$	$L_1$	$L_2$	$B$ гаусс
	V	A	W	V	$\Omega$		$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	H		
1	200	3,88	520	12,2	0,0048	18	56,7	34,5	45,0	0,143	0,00044	9 200
2	220	5,2	650	12,9	0,00415	17	42,3	24,0	35,0	0,111	0,000385	9 700
3	220	8,6	900	14,6	0,00377	15	25,6	12,2	22,5	0,0716	0,00032	11 000
4	220	16,3	1220	16,9	0,00310	13	13,5	4,6	12,2	0,039	0,00023	12 700
5	220	46,2	1820	20,0	0,00286	11	4,77	0,85	11,0	0,035	0,00029	15 000

Таблица 61

Данные короткого замыкания вторичного витка (приведенные к первичной цепи) трансформатора 200 kVA без внешнего контура,  $l = 0$

№ ступени	Опытные данные			Расчетные данные					
	$U_{\kappa}$	$I_{\kappa}$	$W_{\kappa}$	$\cos \varphi_{\kappa}$	$e_{\kappa}$ %	$Z_{\kappa}$	$R_{\kappa}$	$X_{s0}$	$K$
	V	A	W			$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	
1	14,0	210	2100	0,715	6,4	0,067	0,0477	0,0472	2,74
2	14,0	256	2400	0,67	6,4	0,055	0,0366	0,0410	2,37
3	13,5	300	2800	0,715	6,15	0,045	0,0320	0,0316	2,54
4	13,5	380	4200	0,82	6,15	0,0355	0,0290	0,0205	3,0
5	13,0	462	4850	0,81	5,9	0,0282	0,0227	0,0167	3,0
Среднее значение									2,73

По данным табл. 61 и 62 легко определить значения сопротивлений внешнего контура. Совершенно очевидно, что величина сопротивления внешнего контура будет равна сопротивлению вторичной цепи (при данной ступени мощности) со включенным внешним контуром минус соответствующее сопротивление при отключенном внешнем контуре. Эти сопротивления должны быть приведены при этом ко вторичной цепи:  $Z_{вк} = \frac{Z_{\kappa} - Z_{\kappa_0}}{u^2}$ .

Поверхностный эффект  $m$  вторичного витка, состоящего из литой меди, составляет в среднем 2,73. Во внешнем контуре, состоящем из нескольких гибких кабелей, коэффициент поверхностного эффекта едва достигает 3—5% (т. е.  $m = 1,03 \div 1,05$ ).

В качестве дополнительного способа регулирования внешней характеристики подобных сварочных машин является видоизменение конфигурации гибкого внешнего контура, что дости-

Таблица 62

Данные короткого замыкания (приведенные к первичной цепи) трансформатора 200 kVA при включенном внешнем контуре нормальной длины  $l = 4 \text{ м}^1$

№ ступени	Опытные данные			Расчетные данные			
	$U_k$ V	$I_k$ A	$W_k$ W	$\cos \varphi_k$	$Z_k$ $\Omega$	$R_k$ $\Omega$	$X_s$ $\Omega$
1	195	295	33 500	0,58	0,661	0,385	0,537
2	190	355	36 700	0,545	0,535	0,291	0,446
3	180	430	40 500	0,52	0,418	0,219	0,357
4	170	525	44 200	0,49	0,323	0,160	0,281
5	160	660	51 000	0,48	0,243	0,117	0,213

Таблица 63

Величины сопротивлений внешнего контура точечной машины 200 kVA с переносными клещами

№ ступени	$Z_{вн}$	$R_{вн}$	$X_{s вн}$	$m$
	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	
1	0,00183	0,00104	0,00150	1,035
2	0,00166	0,00088	0,00140	
3	0,00165	0,00083	0,00144	
4	0,00170	0,000775	0,00154	
5	0,00177	0,00078	0,00162	
Среднее значение	0,00172	0,00086	0,0015	1,035

гается изменением расстояния между токоведущими кабелями противоположной полярности. Такой способ регулировки называется весьма ценным, например, при необходимости сварки тонкого материала аппаратом большой мощности. Для рассматриваемой сварочной машины мощность уменьшается примерно на 50%, если довести расстояние между кабелями внешнего контура до 1 м. В этом легко убедиться, если сравнить данные табл. 62 с таковыми табл. 64.

<sup>1</sup> Рукава внешнего контура были связаны между собой.

Данные короткого замыкания (приведенные к первичной цепи) точечной машины 200 kVA с переносными клещами со специально разведенными сторонами внешнего контура на расстояние 1 м друг от друга

Опытные данные				Расчетные данные				
№ ступени	$U_k$	$I_k$	$W_k$	$\cos \varphi_k$	$Z_k$	$R_k$	$X_s$	$X_{s\text{ вк}}$
	V	A	W		$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$
1	200	216	15 500	0,36	0,926	0,332	0,865	0,00253
2	195	264	18 600	0,36	0,740	0,267	0,692	0,00225
3	192	335	22 000	0,34	0,573	0,196	0,540	0,00226
4	190	420	27 500	0,34	0,452	0,155	0,424	0,00239
5	180	575	31 500	0,30	0,315	0,0955	0,300	0,00234
Среднее значение . .								0,00235

## 96. Влияние индуктивности внешнего контура машины на величину сварочного тока

а) Внешний контур без железа. Выше были даны уравнения для вычисления индуктивности внешнего контура машины для случая, когда внутри контура нет магнитных масс. Согласно этим уравнениям индуктивность внешнего контура зависит от его геометрических параметров.

Ниже приводим ряд опытных данных, характеризующих изменение тока в сварочной цепи при различных величинах индуктивности во внешнем контуре.

Проверка влияния размеров внешнего контура на величину сварочного тока опытным путем затрудняется тем, что процесс сварки обычно ведется кратковременно, благодаря чему невозможно точно замерять необходимые электрические величины. Более удобным оказалось исследовать это влияние указанными выше опытами короткого замыкания установки (см. предыдущий параграф), а величину тока в сварочной цепи определять по первичному току и коэффициенту трансформации.

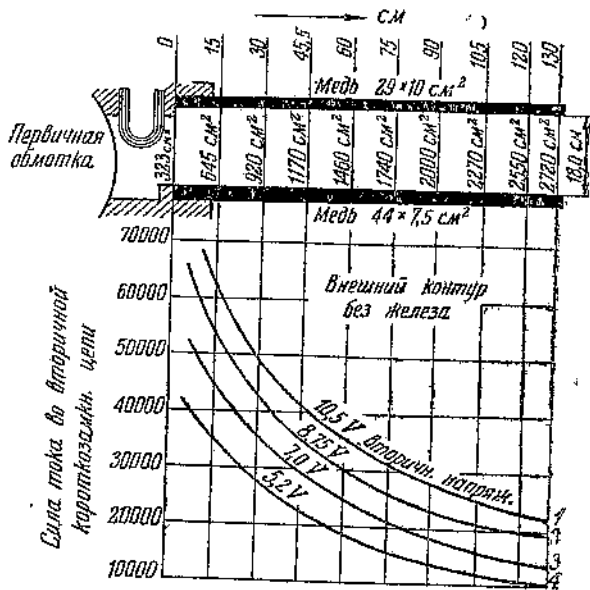
На фиг. 252 представлены опытные кривые, характеризующие изменение величины тока в короткозамкнутой сварочной цепи в зависимости от длины внешнего контура (от 150 до 1300 мм). Расстояние между рукавами оставалось постоянным и равным 180 мм. Указанные длины рукавов являются размерами полезного вылета сварочной машины.

Размеры контура, охватываемого от вторичного витка до рукавов, были постоянны и на испытуемой машине в 350 kVA были равны 323 см<sup>2</sup>. Опытные кривые даны здесь для четырех ступеней мощности (от 5,2 до 10,5 V) вторичного напряжения

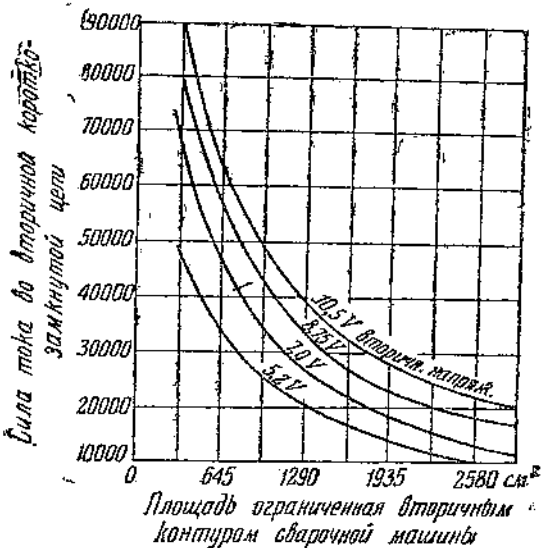
холостого хода. Из кривой 1 видно, что при ступени мощности, соответствующей 10,5 V вторичного напряжения, сила тока достигает 64 000 А при глубине вылета в 150 мм и спадает до 22 000 А при вылете, равном 1300 мм. Для кривой 4 сила тока изменяется с 35 000 А при глубине вылета 150 мм до 10 000 А при 1300 мм.

Изменение силы тока в сварочной цепи, обусловленное переменной величиной площади окна внешнего контура, представлено на фиг. 253. На оси абсцисс даны различные размеры окна внешнего контура, выраженные в  $см^2$ , а на оси ординат — сила тока в короткозамкнутой вторичной цепи точечной машины в 350 kVA. На этом графике даны кривые для четырех ступеней мощностей.

б) Внешний контур с железом. Индуктивное сопротивление внешнего контура возрастает по мере заполнения внешнего контура магнитным материалом. На фиг. 254 представлены кривые изменения тока в сварочной цепи машины (на 350 kVA) в зависимости от длины рукавов машины и при условии, когда во внешний контур помещены железные пластины.

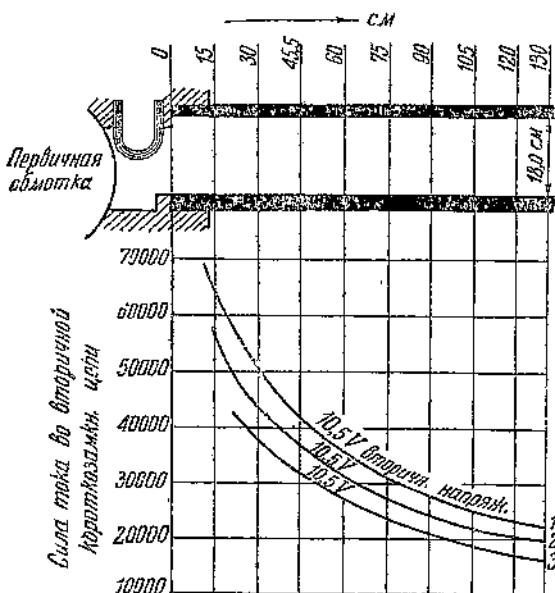


Фиг. 252. Изменение силы тока в сварочной цепи в зависимости от длины рукавов внешнего контура при постоянном расстоянии между верхним и нижним рукавами.

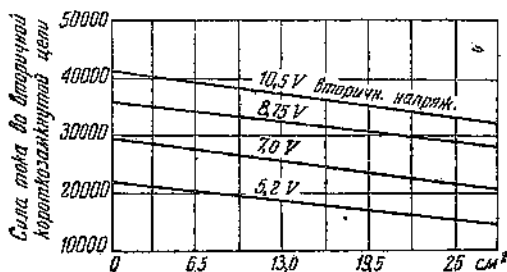


Фиг. 253. Изменение силы тока в сварочной цепи в зависимости от размеров площади (длины и ширины) окна вторичной цепи.

Кривая 1 соответствует изменению тока при отсутствии магнитного материала во внешнем контуре.



Фиг. 254. Влияние магнитного материала, расположенного во внешнем контуре машины, на величину сварочного тока.



Фиг. 255. Изменение величины сварочного тока в зависимости от сечения магнитного материала, расположенного во внешнем контуре, и ступени мощности сварочной машины для одного и того же размера окна контура.

Кривая 2 характеризует изменение тока при наличии во внешнем контуре листового железа сечением 1950 мм<sup>2</sup>. Кривая 3 соответствует изменению тока при наличии между рукавами внешнего контура листового железа общим сечением 3600 мм<sup>2</sup>. Все три характеристики были сняты для одних и тех же режимов машины, и кривая 1 служит здесь для сравнения с ней кривых 2 и 3.

Сопоставляя кривые 1 и 3, легко заметить, что при глубине вылета 300 мм и расположении между рукавами железных пластин сечением 3600 мм<sup>2</sup> сила тока уменьшается с 50 000 до 37 000 А.

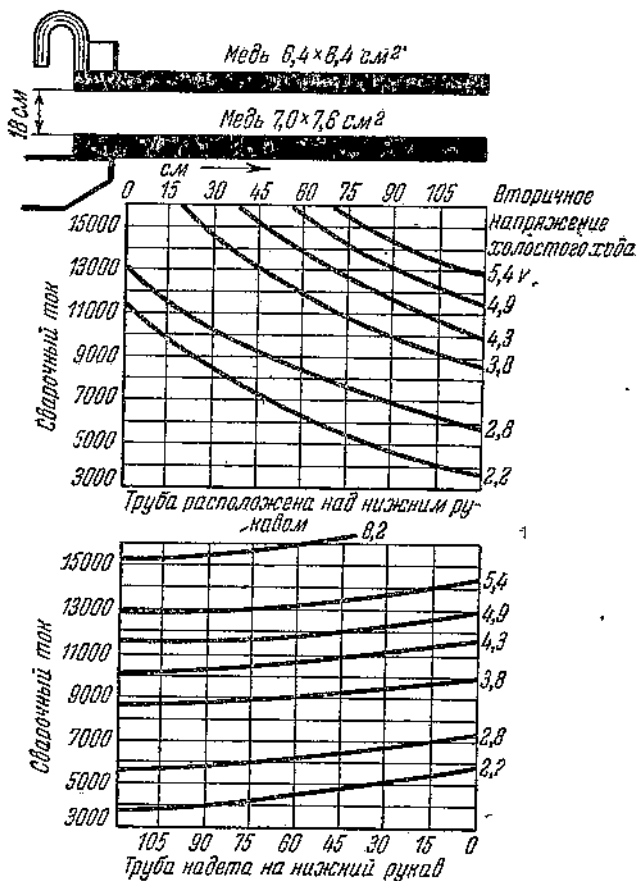
На фиг. 255 показано уменьшение тока в сварочной цепи точечной машины 350 kVA с глубиной вылета 460 мм в зависимости от толщины листовой стали, расположенной между рукавами. На этой фигуре даны кривые для четырех ступеней мощности. Внутреннее расстояние между рукавами равня-

лось при этом 180 мм; листы взяты размером 460 × 540 мм<sup>2</sup>. Желаемое сечение стали получалось путем наложения нескольких листов друг на друга.

в) Влияние трубчатых изделий из магнитных материалов. При сварке изделий из замкнутых контуров и магнитного материала, надетых на один из рукавов, магнитные силовые линии, образованные вокруг проводника, замыкаются

в этом изделии. Чем ближе изделие расположено к токоведущему рукаву, тем больше магнитных силовых линий замыкается в контуре изделия.

Таким образом индуктивное сопротивление и связанное с ним уменьшение величины тока в сварочной цепи будет обратно пропорционально диаметру трубчатого изделия.



Фиг. 256. Влияние на величину сварочного тока трубчатых изделий, из магнитного материала, расположенных во внешнем контуре.

На фиг. 256 дана диаграмма, характеризующая влияние стальных трубчатых или прямоугольных сечений деталей, расположенных между рукавами сварочной машины или вокруг одного из рукавов. Диаметр испытуемой трубы был равен 128 мм. Сварочная точечная машина на 75 kVA имела постоянное расстояние между рукавами 180 мм.

На верхней диаграмме даны изменения величины тока в сварочной цепи в зависимости от длины трубы, расположенной над

нижним рукавом. Кривые даны для шести ступеней мощности. Длина трубы здесь менялась вместе с переменной длины рукавов.

На нижней диаграмме даны кривые, характеризующие изменение тока во вторичной цепи для разных ступеней мощности в зависимости от длины трубы, надетой на нижний рукав.

Приведенные опытные данные показывают, что режим сварки зависит не только от мощности машины, времени сварки, давления на электроды и т. д., но и от размеров окна внешнего контура и степени его заполнения магнитным металлом изделия. Следовательно, выбор режима сварки должен быть произведен с учетом всех переменных параметров в каждом отдельном случае.

#### Глава XIV

### ПИТАНИЕ КОНТАКТНЫХ МАШИН ОТ ИСТОЧНИКА ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### 97. Физический процесс контактной сварки постоянным током и схемы включения

а) Сущность вопроса. При электрической сварке соприкосновением переменным током имеет место большой расход мощности на непроизводительные потери во вторичной цепи сварочной машины. К таким потерям относятся все ваттные потери в постоянных контактах и в самом материале витка, а также индуктивные потери во внешней цепи. Потери здесь тем больше, чем больше размеры внешнего контура сварочной цепи. Мощность сварочной машины складывается из расхода мощности в сварочном контакте и перечисленных потерь мощности во всей внешней цепи.

Вследствие необходимости вести сварочный процесс ряда металлов в весьма короткое промежуток времени, требуемая мощность сварочного трансформатора еще больше от этого возрастает и достигает сотен kVA. Кроме того, сварочные машины строятся обычно с однофазными трансформаторами, поэтому здесь имеет место неравномерная нагрузка фаз электрической сети.

Однако со всеми этими недостатками работы на переменном токе приходится мириться благодаря большим технико-экономическим преимуществам контактной сварки металлов по сравнению с другими методами соединения.

Между тем существует возможность производить контактную сварку и постоянным током, имеющим ряд преимуществ перед контактной сваркой переменным током. Как показывают опыты, некоторые виды контактной сварки с успехом могут быть выполнены, если питать эти машины от сети постоянного тока. Преимущества питания контактных машин постоянным током следующие:



1. При длинных рукавах машины индуктивное сопротивление ее довольно велико и характеризуется при переменном токе низким коэффициентом мощности:  $\cos \varphi \approx 0,4 \div 0,6$ . При питании машины постоянным током индуктивные потери во внешнем контуре отсутствуют.

2. Активные потери в массивных частях вторичной цепи машины, связанные еще с явлением поверхностного эффекта, понижаются для постоянного тока в два с лишним раза, т. е. до величины омического сопротивления этих проводников.

3. Вместо однофазной нагрузки мы имеем в этом случае возможность равномерно нагружать все три фазы.

4. Приведенная выше теория сварки кратковременным током (§ 16), а также решение примеров для различных случаев сварки показывают, что необходимая мощность в сварочном контакте в несколько раз меньше остальных потерь мощности в сварочной цепи. Поэтому при питании сварочной машины постоянным током значительно понижается необходимая мощность машины по сравнению со сваркой на переменном токе. Например, опытом установлено, что точечная машина с рукавами внешнего контура, равными 800 мм, при сварке листов дуралюмина 1+1 мм в течение сотых долей секунды переменным током потребляет мощность порядка 175 kVA, а при питании той же машины постоянным током потребляемая мощность ее при тех же временах сварки достигает 35—40 kVA.

б) Физический процесс сварки постоянным током. Каким током питается сварочный контакт, постоянным или переменным для развития тепла в сварочной точке, — безразлично.

Когда трансформатор приключен к источнику постоянного тока, то сила тока во вторичной цепи равна нулю, так как электродвижущая сила во вторичной цепи трансформатора индуктируется только при переменном магнитном потоке в момент включения или выключения, т. е.

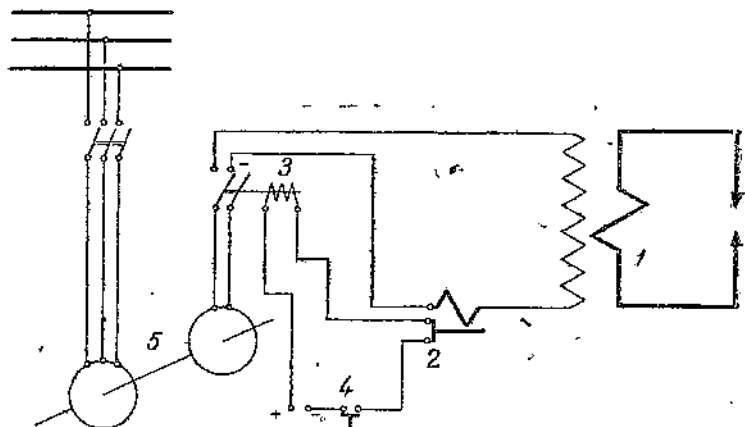
$$e_2 = - \frac{d\Phi}{dt},$$

благодаря чему в замкнутой вторичной цепи сварочной машины возникает сила тока, величина которой обусловлена коэффициентом трансформации между первичной и вторичной обмотками.

Этот ток является свободным током неустановившегося режима. Он зависит от величин индуктивности и сопротивления вторичной цепи. Естественно, продолжительность протекания этого тока в сварочной цепи ограничена временем выключения и длится не более одного периода.

Сила сварочного тока будет иметь всегда один знак. Несмотря на кратковременное протекание тока во вторичной цепи, выделяемая им энергия в сварочном контакте является достаточной для сварки различных деталей. Одновременно с этим отпадает необходимость в специальном токопрерывателе, стоимость которого весьма высока.

в) Область применения контактной сварки постоянным током. Сварочные машины, питающиеся от сети постоянного тока, могут принципиально применяться для точечной, многоточечной, рельефной и стыковой сварок. Исключением является, повидимому, роликовая сварка, при которой скорость зарядки трансформатора постоянным током окажется меньше необходимой скорости сварки. Установки для сварки постоянным током должны в первую очередь применяться для металлов, требующих точной дозировки времени, вместо применяемых в практике ионных прерывателей. К этим металлам относятся в первую очередь цветные металлы, нержавеющая сталь и др.



Фиг. 257. Схема питания контактных машин постоянным током от мотор-генератора.

1 — сварочная машина; 2 — реле максимального тока; 3 — контактор; 4 — кнопка; 5 — мотор-генератор.

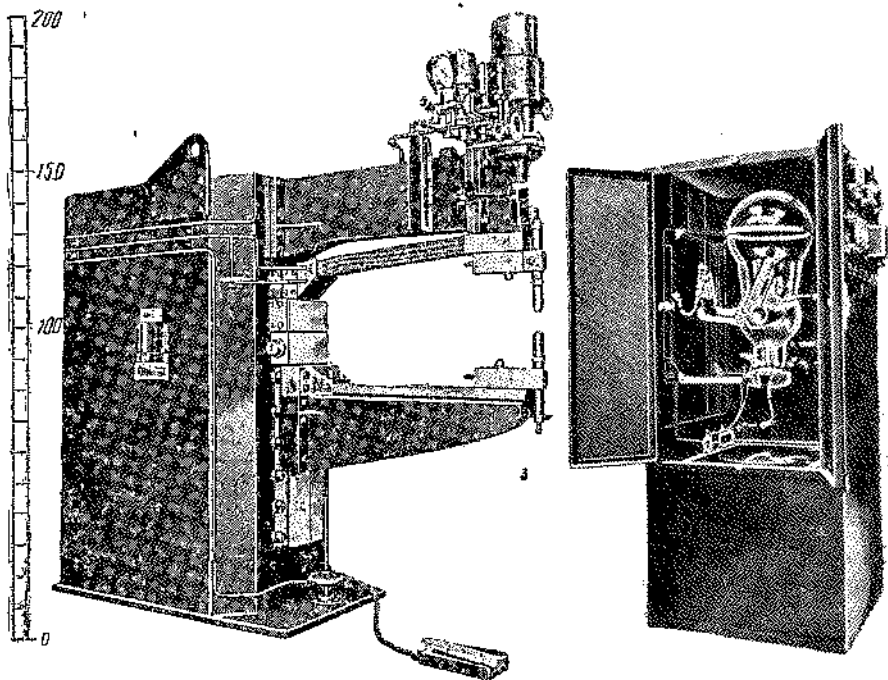
г) Схема включения. Наиболее простая схема включения сварочной машины к цепи постоянного тока представлена на фиг. 257. Трехфазный мотор переменного тока вращает генератор постоянного тока. Шины постоянного тока соединены с первичной обмоткой сварочного трансформатора через контактор. Управление контактором производится через реле. Действие схемы происходит следующим образом. Вначале включают контактор к шинам постоянного тока, затем сдавливают изделие между электродами и нажимают кнопку. Как только сила тока в первичной цепи трансформатора достигнет необходимой величины, срабатывает реле и выключает контактор. В момент выключения первичной обмотки трансформатора от источника постоянного тока происходит сварка. Для следующей точки необходимо вновь включить контактор и повторить последовательно все операции.

Вместо мотор-генератора может быть применен также ртутный выпрямитель.

Во Франции на некоторых авиационных заводах применяются подобные установки для сварки узлов самолета. Агрегат для точечной сварки от постоянного тока в изготовлении фирмы Sciaky показан на фиг. 258.

Этот агрегат состоит из сварочной точечной машины и выпрямительной установки. Точечная машина имеет два цилиндра, позволяющие производить давление на электроды по седлообразной кривой (фиг. 116).

Разрешение задачи питания сварочных машин постоянным током позволит освободиться от необходимости применения



Фиг. 258. Общий вид установки питания сварочной точечной машины постоянным током от ртутного выпрямителя.

дорогостоящих ионных прерывателей для точечной сварки. Внедрение контактной сварки постоянным током облегчается еще тем обстоятельством, что имеется возможность централизованного питания нескольких сварочных машин от одного генератора, например, от СМГ-4 на 1200 А (в изготовлении завода „Электрик“), при условии повышения напряжения этого генератора.

Мы полагаем, что установки контактных машин с питанием от сети постоянного тока должны получить в ближайшее время большое распространение, особенно в тех областях, где применение сварки связано с необходимостью приобретения ионных токопрерывателей.

## БИБЛИОГРАФИЯ

1. Проф. Круг К. А., Основы электротехники, Энергоиздат, 1932.
2. Shaeichlin W., Contact Resistance of Electric Switching Apparatus, „El. Journ.“, VIII, 1928.
3. Holm R., Ueber metallische Kontaktwiderstande, WVS, 1928, 1929.
4. Романовский В. Б. и Машкилейсон Л. Е., О контактах аппаратов распределительных устройств, „ТЭ“ № 5 и 6, 1932.
5. Проф. Третьяк Г. Т. и инж. Лысов Н. Е., Основы тепловых расчетов электрической аппаратуры, ОНТИ, 1935.
6. Pfeiffer, „El. Eng.“, № 8, Vol. 55, 1936.
7. Инж. Кислюк Ф. И., Исследование сопротивлений сварочных контактов, „Автогенное дело“, № 8, 1937.
8. Инж. Кислюк Ф. И., Исследование сопротивлений сварочного контакта и его составляющих, „Техника воздушного флота“, № 8, 1938.
9. Инж. Кислюк Ф. И., Энергетический баланс сварки методом сопротивления и физический процесс, „Автогенное дело“, № 9, 1937.
10. Проф. Пиотровский Л. М., Трансформаторы, Энергоиздат, 1936.
11. Док. Трамбицкий А. В., Трансформаторы, ОНТИ, 1938.
12. Latsen E. J., Fundamentals of spot Welding with particular Reference to Electrode Life, „Journ. of Am. Weld. Soc.“, № 4, 1936.
13. „Сварка в автостроении“, под общей редакцией Штерлинга С. З. Изд. Сварочного комбината Оргаметалла, 1936.
14. Инж. Соколов Е. В. и Клементов В. И., Сварка стали хромансиль, Сборник Сварочного комбината Оргаметалла, 1938.
15. Проф. Гевелинг Н. В., Поверхностная электротермообработка, ОНТИ, 1936.
16. Инж. Якубович А. И., Опыт точечной сварки хромомолибдена, „Техника и организация самолетостроения“, сборник № 5.
17. Инж. Алексеев А. А. и инж. Ахун А. И., Электрическая контактная сварка, КХБУЧ, 1935.
18. Инж. Кислюк Ф. И., Теория электрической сварки методом оплавления, „Автогенное дело“, № 11, 1937.
19. Проф. Николаев Г. А. и доц. Гельман, Сварные конструкции, Машгиз, 1937.
20. Weston Steward C., „Aviation“, sept. 1936.
21. Hubert N., La soudure électrique par points et à la molette de l'aluminium et de ses allages, „Revue de l'Aluminium et de ses Applications“, № 98, 1938,
22. Hilbert C., Spot welding of aircraft materials, „The Weld. Journ.“, № 6, 1938.
23. Høglung J. O. and Bernard J. S., The Welding Journal, 1938, vol. 17 № 11, p. 45—54.
24. Hartmann E. V., Spot and Seam-welded Aluminium-Tanks for aircraft, „Mechanical Eng.“, Dec., 1937.
25. Steward J., Resistance welding in now standard practice for non-ferrous metals, „Sheet Met. Ind.“, № 30, Vol. 12, 1938.
26. Resistance Welding, Spot and seam welding „The Weld. Journ.“, № 2, 1938.
27. Portier H., The resistance Welding of light alloys, „Aluminium and the non-ferrous Revien“, Apr. № 6, Vol. 3, 1938.

28. Welding-Handbook, USA, 1938.
29. Инж. Недзвецкий, Машины для точечной электросварки типа АТА-175, „Вестник электропромышленности“, № 8, 1936.
30. Инж. Ласкин С. З., Новый износостойчивый сплав ЭВ для электродов контактной сварки, „Авиапромышленность“, № 6, 1938.
31. „Контактная сварка за границей“, под общей редакцией проф. К. К. Хренова, ОНТИ, 1936.
32. Инж. Каганов И. Л., Электронные и новые преобразователи тока, ОНТИ, 1937.
33. Хенней, Электронные приборы в промышленности, Энергониздат, 1936.
34. Инж. Кислюк Ф. И., Тиратронные прерыватели для контактной сварки, „Электричество“, № 10, 1935.
35. Инж. Бабат Г. И., „Электричество“, № 16, 1934.
36. Доц. Рабинович И. Я., Основы теории контакта и теплопередачи при стыковой сварке сопротивлением. Труды МММИ им. Н. Э. Баумана.
37. Weiller P., „Electronics“, № 5, p. 77, 1937.
38. „Soudure bulletin technique“, Edité par la société Sciaky, Nov., 1936.
39. Dawson T. W., New developments in ignitron Welding Control, „El. Eng.“, № 12, 1936.
40. Heitzen F. H., „Luftwissen“, № 3, p. 2—7, 1936.

#### Каталоги

1. Машины для контактной сварки, Главэлектропром, 1938.
2. The Federal Machine Welder Co. Warren Ohio, USA.
3. Thomson Gibb Electric Welding Co, USA.
4. Eister Electric, USA.
5. Taylor-Winfield, Welder Co, USA.
6. Instructions GBI, № 7225, Général Electric.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие . . . . .	3
Введение . . . . .	4
<i>Раздел первый</i>	
<b>Теория и физический процесс сварки сопротивлением</b>	
<b>Глава I. Основные виды сварки сопротивлением . . . . .</b>	<b>5</b>
1. Понятие о сварке сопротивлением . . . . .	5
2. Стыковая сварка . . . . .	6
3. Точечная сварка . . . . .	7
4. Односторонняя точечная сварка . . . . .	9
5. Многоточечная и рельефная сварка . . . . .	10
6. Роликовая сварка . . . . .	18
<b>Глава II. Сопротивления агрегата сварочного контакта и его составляющих . . . . .</b>	<b>15</b>
7. Теория сварочного контакта . . . . .	15
8. Опытные коэффициенты единичного сопротивления сварочного контакта . . . . .	19
9. Определение коэффициента $\alpha$ . . . . .	24
10. Изменение сопротивления контакта от температуры . . . . .	25
<b>Глава III. Теория и физический процесс электрической сварки методом сопротивления . . . . .</b>	<b>26</b>
11. Физические свойства некоторых металлов, влияющие на свариваемость . . . . .	26
12. Факторы, влияющие на теплопроводность металла . . . . .	26
13. Теплоемкость металлов . . . . .	27
14. Удельное сопротивление металлов . . . . .	27
15. Общее уравнение нагрева металла при сварке методом сопротивления . . . . .	28
16. Сварка металлов кратковременным нагревом . . . . .	31
17. Физический процесс точечной, роликовой и рельефной сварки и образование сварочной точки . . . . .	36
18. Расчет баланса мощности и напряжения внешнего контура сварочной машины . . . . .	45
<b>Глава IV. Электрическая сварка методом оплавления . . . . .</b>	<b>52</b>
19. Технико-экономические преимущества . . . . .	52
20. Физический процесс сварки оплавлением . . . . .	52
21. Расход мощности при сварке оплавлением . . . . .	58
22. Метод расчета . . . . .	60

	Стр.
Глава V. Сварочные трансформаторы . . . . .	64
23. Особенности сварочных трансформаторов . . . . .	64
24. Конструкции сварочных трансформаторов . . . . .	66
25. Расположение обмоток в сварочных трансформаторах . . . . .	69
26. Элементы расчета сварочного трансформатора . . . . .	70
27. Схемы регулирования мощности сварочных машин . . . . .	72
28. Эквивалентная схема и диаграммы сварочной машины при нагрузке . . . . .	75
29. Индуктивность рассеяния обмоток сварочного трансформатора . . . . .	77
30. Индуктивность рассеяния внешнего контура сварочной машины . . . . .	79
31. Формулы для приближенного вычисления индуктивного сопротивления внешнего контура сварочных машин . . . . .	81
32. Уравнения токов для сварочной машины при установившемся режиме . . . . .	84
33. Уравнения токов для сварочной машины при неустановившемся режиме . . . . .	87
34. Осциллограммы сварочных токов . . . . .	91
35. Влияние поверхностного эффекта на сварочный процесс . . . . .	94
36. Порядок расчета сварочных контактных машин . . . . .	100

*Раздел второй -*

**Технология сварки**

Глава VI. Технология контактной сварки . . . . .	102
--	-----

I. Сварка сталей

37. Подготовка изделий из черных металлов к сварке . . . . .	102
--	-----

А. Стыковая сварка

38. Установочная длина деталей при стыковой сварке . . . . .	103
39. Сварка методом оплавления инструмента из быстрорежущей и углеродистой стали . . . . .	107
40. Шунтирование тока в замкнутом контуре при стыковой сварке . . . . .	108

Б. Точечная сварка

41. Техничко-экономические преимущества точечной сварки перед клепкой . . . . .	109
42. Размеры поверхности электродов для точечной сварки . . . . .	110
43. Шунтирование тока в соседних точках при точечной сварке . . . . .	111
44. Элементарный расчет прочности соединения при точечной сварке . . . . .	112

В. Роликовая сварка

45. Способы роликовой сварки . . . . .	113
46. Связь между количеством сварочных точек и скоростью роликовой сварки . . . . .	115
47. Шунтирование тока при роликовой сварке . . . . .	116

Г. Точечная сварка специальных сталей

48. Сварка хроманганиевой стали . . . . .	117
49. Сварка хромомолибденовой стали . . . . .	119
50. Сварка нержавеющей стали . . . . .	122
51. Сварка конструкционной стали . . . . .	124

## II. Сварка легких сплавов

	Стр.
52. Легкие сплавы. Необходимые условия сварки . . . . .	125
53. Подготовка алюминиевых сплавов к сварке . . . . .	127
54. Энергетические режимы сварки легких сплавов . . . . .	128
55. Структура швов легких сплавов, полученных точечной и роликовой сваркой . . . . .	132
56. Прочность швов алюминиевых сплавов при точечной и роликовой сварке (сравнение с клепкой) . . . . .	134
57. Сопротивление усталости узлов самолета из дуралюмина . . . . .	139

### Раздел третий

#### Машины и аппараты для контактной сварки

Глава VII. Сварочные машины . . . . .	142
58. Механизмы давления сварочных машин . . . . .	142
59. Градуировка давления электродов в сварочных машинах . . . . .	145
А. Точечные машины	
60. Точечная машина АТА-40 . . . . .	145
61. Точечная машина АТА-175 . . . . .	149
62. Сварочная установка с переносными клещами на 200 kVA . . . . .	153
Б. Роликовые машины	
63. Роликовая машина АШ-20 . . . . .	158
64. Роликовая машина АШ-50 . . . . .	159
65. Роликовая машина фирмы Тейлор-Винфельд на 300 kVA . . . . .	163
В. Стыковые машины	
66. Стыковая машина АСА-100 . . . . .	169
Г. Специальные сварочные машины	
67. Сварочный пресс АРС-250 . . . . .	173
68. Многоточечная машина последовательного действия . . . . .	176
Глава VIII. Рукава, электрододержатели и электроды . . . . .	180
69. Виды рукавов и электрододержателей . . . . .	180
70. Материал для электродов . . . . .	184
Глава IX. Асинхронные токопрерыватели . . . . .	190
71. Основные виды токопрерывателей . . . . .	190
72. Прерыватель фирмы Катлер-Гаммер . . . . .	191
73. Кулачковые прерыватели . . . . .	194
74. Точность работы механических токопрерывателей . . . . .	194
75. Механический прерыватель с синхронным моторчиком . . . . .	196
Глава X. Ионные выпрямители . . . . .	197
76. Принцип действия ионных выпрямителей . . . . .	198
77. Газотрон . . . . .	199
78. Тиратрон . . . . .	200
79. Роль сетки в тиратроне . . . . .	201
80. Схемы управления сеточной цепи тиратрона . . . . .	206
81. Ртутный выпрямитель . . . . .	210
82. Зажигание ртутного выпрямителя с независимым возбуждением . . . . .	213
83. Игнайтрон . . . . .	214
84. Выбор игнайтронов по силе тока . . . . .	217
85. Терминология, употребляемая в схеме с управляемыми ионными выпрямителями . . . . .	219



	Стр.
Глава XI. Ионные (синхронные) токопрерыватели . . . . .	220
86. Основные виды ионных токопрерывателей . . . . .	220
87. Игнайтроный прерыватель для контактной сварки системы Вестингауз . . . . .	223
88. Тиратроный прерыватель системы Дженерал Электрик К <sup>0</sup> (США) . . . . .	230
89. Элементы расчета сериес-трансформатора . . . . .	236
90. Тиратроный прерыватель системы инж. Ф. И. Кислюка . . . . .	237
91. Коммутация тока . . . . .	242
Глава XII. Контрольная аппаратура . . . . .	244
92. Электронный аппарат по контролю качества точечной сварки системы Сянки (Франция) . . . . .	244
93. Прибор для измерения величины сварочного тока при сварке сопротивлением . . . . .	247
94. Приближенное измерение величины импульса сварочного тока . . . . .	248
Глава XIII. Материалы для проектирования . . . . .	249
95. Опытные данные индуктивных и омических сопротивлений сварочных машин . . . . .	249
96. Влияние индуктивности внешнего контура машины на величину сварочного тока . . . . .	258
Глава XIV. Питание контактных машин от источника постоянного тока . . . . .	262
97. Физический процесс контактной сварки постоянным током и схемы включения . . . . .	262
Библиография . . . . .	266

Редактор В. Г. Нѣуман. Техн. редактор Е. Н.  
Симкина. Изд. № 102. Сдано в набор 2/VIII  
1939 г. Подп. к печати 16/III 1940 г. Индекс  
МС-20-42. Тираж 2.000. Печ. листов 17. Бум.  
листов 8<sup>1</sup>/<sub>2</sub>. Формат бумаги 60 × 92<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Уполном.  
Мособлгорлита Б-3464. Учетн. авт. л. 19,61. Учетн.  
№ 2620. Зак. № 2488.

---

1-я типография Машгиза НКТП, Ленинград,  
ул. Моисеенко, 10.