

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b> . . . . .	3
<b>Глава I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СВАРКИ</b> . . . . .	4
1. Законы и явления, лежащие в основе процесса высокочастотной сварки . . . . .	—
2. Мощность, поглощаемая проводящей средой при высокочастотном нагреве . . . . .	15
3. Теплопередача при высокочастотном нагреве тела неограниченной толщины с плоской поверхностью . . . . .	20
4. Механизм процесса высокочастотной сварки . . . . .	23
5. Способы передачи энергии к свариваемым кромкам . . . . .	42
<b>Глава II. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОНДУКТОРА И ИНДУКТОРА</b> . . . . .	45
6. Расчет распределения поверхностной плотности тока на свариваемых кромках при ярко выраженном поверхностном эффекте . . . . .	48
7. Расчет распределения плотности тока на кромках с учетом реальной глубины проникновения . . . . .	59
8. Расчет электрических параметров свариваемых кромок . . . . .	60
9. Расчет мощности, необходимой для разогрева кромок до сварочной температуры . . . . .	69
10. Расчет параметров свариваемых кромок при производстве труб из ферромагнитного материала . . . . .	72
11. Расчет электрических параметров системы индуктор—трубная заготовка . . . . .	75
<b>Глава III. УСТАНОВКИ ДЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СВАРКИ</b> . . . . .	82
12. Установки с ламповыми генераторами . . . . .	83
13. Установки с машинными преобразователями частоты . . . . .	104
14. Система автоматического регулирования режима сварки . . . . .	124
<b>Глава IV. ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СВАРКИ</b> . . . . .	126
15. Сварка прямошовных труб малого и среднего диаметров . . . . .	127
16. Сварка металлических оболочек электрических кабелей . . . . .	148
17. Сварка прямошовных труб большого диаметра . . . . .	155
18. Сварка спиральношовных труб большого диаметра . . . . .	168
19. Сварка стальных тонкостенных спиральношовных труб . . . . .	170
20. Сварка оребренных труб . . . . .	178
21. Перспективы применения высокочастотной сварки . . . . .	183
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ</b> . . . . .	188
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> . . . . .	196

6ПЧ.3

Ш10

УДК 621.365.5 : 621.791.77

Рецензент канд. техн. наук В. С. Немков

Шамов А. Н., Лунин И. В., Иванов В. Н.

Ш19

Высокочастотная сварка металлов. Л., «Машиностроение» (Ленингр. отд-ние), 1977.  
200 с. с ил.

В книге изложены физические и технологические основы высокочастотной сварки металлов. Приведена методика выбора частоты тока источника питания и рассмотрены способы подвода тока к свариваемым изделиям. Описано высокочастотное сварочное оборудование, применяемое в отечественной и зарубежной практике. Даны расчеты параметров сварочных устройств и рекомендации по их применению.

Книга предназначена для инженерно-технических работников, занимающихся разработкой технологии и внедрением высокочастотной сварки. Она может быть также полезна студентам вузов соответствующих специальностей.

Ш 31206—102  
038(01)—77 102—77

6ПЧ.3

© Издательство «Машиностроение», 1977 г.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Советский Союз является одной из ведущих стран мира по промышленному применению высокочастотной сварки металлов. За короткий срок в нашей стране созданы оригинальные конструкции сварочных устройств, разработаны методики расчетов электромагнитных систем для контактного и индукционного подвода тока к свариваемым кромкам, технологические процессы сварки изделий широкого сортамента.

Успешному внедрению высокочастотной сварки в промышленное производство способствовало творческое содружество коллективов ВНИИТВЧ им. В. П. Вологодина, ВНИИметмаша, ИЭС им. Е. О. Патона, ВИЛС, ВНИТИ, УралНИТИ, ЛЗВУ, ЭЗТМ, ЧТПЗ, заводов «Москабель», Северского трубного, «Трубосталь», Новомосковского трубного, Московского трубного и др.

Важное значение для развития высокочастотного способа сварки имели работы, выполненные во ВНИИТВЧ докторами техн. наук Н. П. Глухановым и А. Е. Слухоцким, кандидатами технических наук В. Н. Богдановым и В. А. Пейсаховичем, инженерами С. Е. Рыскиным и Ю. Б. Вигдоровичем. Работы в области высокочастотной сварки постоянно пользовались вниманием и поддержкой академиков А. И. Целикова, Б. Е. Патона, А. Ф. Белова.

В свете Основных направлений развития народного хозяйства на 1976—1980 гг. высокочастотная сварка металлов играет особо важную роль как средство повышения эффективности производства труб. Намечается внедрение высокопроизводительных трубосварочных агрегатов для изготовления труб малого и среднего диаметров, спиральношовных труб диаметром до 1000 мм, газопроводных труб диаметром до 1420 мм со скоростью сварки от 20 до 200 м/мин.

В связи с реализацией намеченных планов изучение процессов высокочастотной сварки, особенностей проектирования и условий эксплуатации оборудования широкими кругами специалистов приобрело актуальное значение. Авторы надеются, что настоящая книга принесет пользу народному хозяйству нашей страны.

Авторы глубоко благодарны сотрудникам ВНИИТВЧ, оказавшим помощь в подборе материала книги, и инж. В. М. Бреславцевой за участие в подготовке рукописи к печати.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СВАРКИ

Впервые идея применения токов высокой частоты (т. в. ч.) для сварки металлов была предложена в 1946 г. советскими специалистами во главе с А. В. Улитовским<sup>1</sup>. В 50-е годы в Советском Союзе и за рубежом начались интенсивные исследования по созданию технологии и оборудования для высокочастотной сварки труб, а несколько позже и для оболочек кабеля и профилей. Был создан способ промышленного применения высокочастотной сварки, при котором изделие перед сварочным узлом формируется в виде заготовки с V-образной щелью между свариваемыми кромками. К кромкам посредством скользящих контактов или индуктором подводится т. в. ч. таким образом, чтобы он проходил от одной кромки к другой через место их схождения. Вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости, который по мере сближения кромок усиливается, достигается высокая концентрация тока в месте схождения кромок.

Благоприятное распределение тока, высокая степень концентрации мощности обеспечивают возможность ведения процесса с оплавлением тонкого слоя на поверхности свариваемых кромок и получение прочного качественного сварного соединения. Нагретые кромки изделия обжимаются с помощью валков и свариваются. Качество сварного соединения и расход электроэнергии тесным образом связаны с особенностями протекания т. в. ч. по проводникам.

### 1. Законы и явления, лежащие в основе процесса высокочастотной сварки

Высокочастотная сварка металлов основана на использовании законов электромагнитной индукции и полного тока, а также следующих явлений: поверхностного эффекта, эффекта близости, кольцевого или катушечного эффекта, влияния магнитопроводов и медных экранов на распределение тока в проводнике, изменения свойств металлов при изменении температуры и напряженности магнитного поля, возникновения электромагнитных сил [4, 6, 21, 22, 35, 39].

Эти законы и явления необходимо учитывать при выборе параметров процесса и конструировании устройств для передачи сварочного тока к изделиям.

<sup>1</sup> Авт. свид. № 72290.

**Закон электромагнитной индукции. Закон полного тока.** Известно, если магнитный поток  $\Phi$ , проходящий сквозь поверхность, ограниченную некоторым контуром, изменяется во времени, в этом контуре индуцируется (наводится) э. д. с., мгновенное значение которой  $e$  определяется по формуле

$$e = \oint E_{\text{инд}} dl = -d\Phi/dt, \quad (1)$$

где  $E_{\text{инд}}$  — вектор напряженности электрического поля (наведенного);  $dl$  — вектор, равный длине участка контура  $dl$  и направленный по касательной к контуру в сторону обхода;  $d\Phi$  — изменение магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, за время  $dt$ .

Направление э. д. с. определяется правилом правого винта. Если закручивать винт так, что его острие двигается по направлению магнитных сил при возрастании потока, то положительное направление для наведенной э. д. с. совпадает с направлением вращения головки этого винта. В действительности наведенная э. д. с. в этот момент имеет отрицательное направление, поэтому в формуле (1) поставлен знак минус.

Формула (1) справедлива и для воображаемого контура (не образованного проводником), представляющего собой геометрическое понятие. Этот контур может лежать в проводнике или диэлектрике или частично в проводнике, а частично в диэлектрике. Если контур образован проводником и имеет  $W$  витков, то в формуле (1) значение потока  $\Phi$  должно быть заменено потокоцеплением  $\Psi$ , равным алгебраической сумме потоков, пронизывающих каждый из витков. Если все витки пронизываются одинаковым потоком, то  $\Psi = W\Phi$ .

Полное или результирующее потокоцепление, пронизывающее контур, создается не только внешним по отношению к данному контуру полем, но и собственным потоком, возникающим при протекании по нему электрического тока. При изменении тока в контуре в нем возникает э. д. с. самоиндукции, которая прямо пропорциональна скорости его изменения:  $e_L = -L(dI/dt)$ , где  $L$  — коэффициент самоиндукции (индуктивность), зависящий от геометрических размеров контура и числа витков.

Закон полного тока, выведенный на основании экспериментов, устанавливает количественную связь между линейным интегралом вектора напряженности магнитного поля  $\mathbf{H}$  вдоль любого произвольного замкнутого контура и алгебраической суммой токов, охваченных этим контуром:

$$\oint \mathbf{H} dl = \sum I. \quad (2)$$

При вычислении правой части уравнения (2) необходимо учитывать токи проводимости, переноса и смещения, т. е. определять полный ток через поверхность, ограниченную контуром.

Законы полного тока (2) и электромагнитной индукции (1) были преобразованы Максвеллом в систему уравнений:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \delta + \partial \mathbf{D} / \partial t, \quad (3)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t, \quad (4)$$

где  $\delta$  — плотность тока проводимости, А/м<sup>2</sup>;  $\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon \mathbf{E}$  — электрическая индукция, К/м<sup>2</sup> ( $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$  — диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м;  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость);  $\mathbf{E}$  — напряженность электрического поля, В/м;  $\mathbf{B} = \mu_0 \mu \mathbf{H}$  — магнитная индукция, Т ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  — магнитная проницаемость вакуума, Г/м;  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость).

**Поверхностный эффект.** Глубина проникновения тока. Поверхностный эффект проявляется в неравномерном распределении переменного тока по сечению проводника. Наибольшая плотность тока наблюдается у наружной поверхности проводника. По мере удаления от наружной поверхности плотность тока плавно уменьшается. Чем выше частота, тем быстрее снижается плотность тока. При весьма высокой частоте ток проходит лишь по тонкому поверхностному слою проводника. Поверхностный эффект существенно увеличивает активное сопротивление проводников, что значительно усложняет передачу переменного тока. Однако поверхностный эффект позволяет сконцентрировать выделение энергии в поверхностных слоях нагреваемого изделия, что важно при осуществлении процессов закалки, высокочастотной сварки и т. д.

Рассмотрим влияние поверхностного эффекта на примере протекания переменного тока по шине прямоугольного сечения. При достаточно больших размерах шины ее можно рассматривать как полуограниченное металлическое тело с плоской поверхностью (полубесконечность), на которую падает плоская электромагнитная волна. Падающая волна частью отражается от поверхности проводящей среды, частью проникает в эту среду и поглощается в ней. Примем дополнительно, что магнитная проницаемость  $\mu$  и удельное электрическое сопротивление  $\rho$  проводящей среды постоянны во всем исследуемом объеме. Значения комплексных амплитуд напряженности магнитного  $\dot{H}_m$  и электрического  $\dot{E}_m$  полей для волны, прошедшей через плоскую поверхность полубесконечной среды, получены на основании решения уравнений Максвелла (3) и (4) при условии, что  $H$  и  $E$  — синусоидальные функции времени [22, 35]:

$$\dot{H}_m = \dot{H}_{me} e^{-(1+i)x/\Delta}, \quad (5)$$

$$\dot{E}_m = \rho \dot{\delta}_m = \sqrt{2} (\rho/\Delta) \dot{H}_{me} e^{j\pi/4} e^{-(1+i)x/\Delta}, \quad (6)$$

где  $\dot{H}_{me} = H_{me} e^{j\theta_n}$  — комплексная амплитуда напряженности магнитного поля на поверхности проводящей среды, А/м ( $\theta_n$  — начальная фаза);  $x$  — расстояние точки от поверхности провод-

ника, м;  $\dot{\delta}_m$  — комплексная амплитуда плотности тока в проводящей среде, А/м<sup>2</sup>;

$$\dot{\delta}_m = \dot{E}_m / \rho = \sqrt{2} (\dot{H}_{me} / \Delta) e^{j\pi/4} e^{-(1+i)x/\Delta}, \quad (7)$$

$\Delta$  — глубина проникновения, м;

$$\Delta = \sqrt{2 / (\omega \mu_0 \mu \gamma)}; \quad (8)$$

$\omega = 2\pi f$  — круговая частота ( $f$  — частота тока, Гц);  $\gamma$  — удельная электропроводность, 1/(Ом·м).

Выражения (5)–(7) можно записать в иной форме:

$$H_m = H_{me} e^{-x/\Delta} \sin(\omega t + \theta_n - x/\Delta);$$

$$E_m = \sqrt{2} (\rho/\Delta) H_{me} e^{-x/\Delta} \sin(\omega t + \theta_n - x/\Delta + \pi/4);$$

$$\delta_m = \sqrt{2} (H_{me}/\Delta) e^{-x/\Delta} \sin(\omega t + \theta_n - x/\Delta + \pi/4).$$

Таким образом, по мере проникновения плоской электромагнитной волны в проводящую среду модули амплитуд  $H_m$ ,  $E_m$  и  $\delta_m$  уменьшаются по экспоненциальному закону. Во всех точках среды, в том числе и на ее поверхности, напряженность электрического поля опережает по фазе напряженность магнитного поля на угол  $\pi/4$ . Кроме того, начальная фаза колебаний  $H$ ,  $E$  и  $\delta$  изменяется пропорционально  $x$ . По мере проникновения волны в глубь среды колебания все более запаздывают по фазе по сравнению с колебаниями этих величин на ее поверхности. Расстояние, на котором фаза изменится на  $2\pi$ , называется длиной волны и определяется из условия  $\lambda/\Delta = 2\pi$  или  $\lambda = 2\pi\Delta$ .

Запишем значения  $H_m$ ,  $E_m$  и  $\delta_m$  для точек, лежащих:

1) на поверхности проводящей среды ( $x = 0$ ):

$$H_m = H_{me}; \quad E_m = \sqrt{2} (\rho/\Delta) H_{me};$$

$$\delta_m = \sqrt{2} H_{me} / \Delta;$$

2) на глубине  $x = \Delta$

$$H_m / H_{me} = E_m / E_{me} = \delta_m / \delta_{me} = 1/e = 0,368;$$

3) на глубине  $x = \lambda$

$$H_m / H_{me} = E_m / E_{me} = \delta_m / \delta_{me} = 0,00185.$$

Из этих соотношений видно, что понятие глубины проникновения взято условно. С большим основанием можно сказать, что волна почти полностью затухает на глубине, равной  $\lambda$ . Однако понятие глубины проникновения весьма важно по ряду соображений. В слое толщиной  $\Delta$  протекает примерно 85,89% полного тока и выделяется 86,5% мощности.

Использование понятия глубины проникновения тока часто позволяет упростить расчеты. Экспоненциальное распределение тока можно заменить более простым — прямоугольным, т. е.

Материал	Температура, °С	Удельное сопротивление $\rho \cdot 10^8$ , Ом.м	Глубина проникновения $\Delta \cdot 10^2$ (м) при частотах тока (кГц)				
			10	70	440	1760	5280
Сталь	1000—1300	130,00	0,575	0,210	0,086	0,030	0,0200
Медь	20	1,84	0,068	0,026	0,010	0,004	0,0025
Алюминий	20	2,95	0,096	0,030	0,013	0,005	0,0032
Латунь	20	7,00	0,133	0,050	0,020	0,007	0,0046
Молибден	20	5,80	0,121	0,045	0,018	0,006	0,0043
Вольфрам	20	6,90	0,132	0,050	0,020	0,007	0,0046
Серебро	20	1,65	0,064	0,024	0,010	0,003	0,0020
Титан	20	175,00	0,665	0,250	0,100	0,030	0,0200

считать, что ток протекает только в слое глубиной  $\Delta$  с равномерной плотностью  $\delta_{me}/\sqrt{2}$  и за пределами этого слоя отсутствует, следовательно, в слое глубиной  $\Delta$  выделяется вся тепловая энергия. Приняв эти допущения, можно просто рассчитать активное сопротивление проводника и выполнить приближенный тепловой расчет.

В реальных условиях, когда размеры прямоугольного проводника конечны или проводник имеет форму цилиндра или трубы, законы уменьшения модулей  $H$ ,  $E$  и  $\delta$  и изменения фазы по мере проникновения волны в проводящую среду изменяются, однако понятие глубины проникновения не теряет смысла, так как плотность тока и мощность спадают практически до нуля: первая — на расстоянии от поверхности  $(2,5 \div 3)\Delta$ , а вторая — около  $2\Delta$  [35]. Поэтому влиянием толщины проводника можно пренебречь, если она не меньше  $8\Delta$ , а кривизна поверхности не учитывается, если радиус не меньше  $4\Delta$ .

Глубина проникновения является важным параметром при расчете критериев, позволяющих оценить степень проявления поверхностного эффекта, правильно выбрать частоту тока для осуществления заданного технологического процесса. По формуле (8) проведен расчет глубины проникновения тока при различных частотах (табл. 1).

**Эффект близости.** Эффект близости проявляется при протекании переменного тока в системе проводников. При этом каждый из них находится не только в собственном переменном магнитном поле, но и в поле других проводников. На рис. 1 показана при-

близительная картина магнитного поля двух проводников при встречном и одинаковом направлениях токов. Из рисунка видно, что за счет взаимодействия магнитных полей проводников наибольшая напряженность магнитного поля наблюдается у внутренних поверхностей в системе со встречным направлением тока (разность фаз равна  $180^\circ$ ). Основная часть электромагнитной энергии поступает в проводник из зоны с наибольшей напряженностью магнитного поля. В этой зоне плотность тока наибольшая.

Чтобы убедиться в этом, применим закон полного тока к прямоугольному четырехугольному контуру, выделенному в поперечном сечении шины весьма большой толщины и ширины, на которую падает плоская электромагнитная волна, имеющая лишь

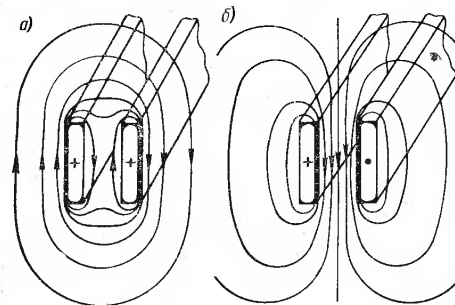


Рис. 1. Картина магнитного поля вокруг проводников, по которым текут одинаково (а) и встречно (б) направленные токи

касательные составляющие  $E$  и  $H$ . Примем дополнительно, что одна сторона контура лежит на поверхности шины и параллельна  $H$ . Учитывая, что для этого случая составляющая электромагнитного поля в направлении, нормальном к поверхности, равна нулю, а одна из сторон контура, параллельная поверхности, удалена на достаточно большое расстояние ( $H = 0$ ), получим

$$\oint H dl = aH_{me} = I_m,$$

где  $a$  — длина стороны контура, лежащей на поверхности шины;  $I_m$  — амплитуда полного тока, проходящего через поверхность, ограниченную контуром.

Из уравнения видно, что полный ток  $I_m$  находится в фазе с напряженностью магнитного поля на поверхности шины. При  $a = 1$  полный ток  $I_m$ , проходящий через поверхность, ограниченную контуром, называют настилом тока  $\delta_{ms}$ . Настил тока численно равен напряженности магнитного поля на поверхности

шины и находится в фазе с ней. Распределение тока по глубине подчиняется закономерностям поверхностного эффекта. Поэтому на участках с наибольшей напряженностью магнитного поля и, следовательно, наибольшим настилом тока получается наибольшая плотность тока.

Анализируя картину магнитного поля двух проводников при одинаковом направлении тока (рис. 1, а), можно заметить, что эффект близости является формой проявления поверхностного эффекта и состоит в концентрации тока в определенных зонах поверхности в результате суммарного взаимодействия электромагнитных полей всех проводников.

При пропускании токов встречного направления по коаксиально расположенным цилиндру и трубе (рис. 2, а) эффект

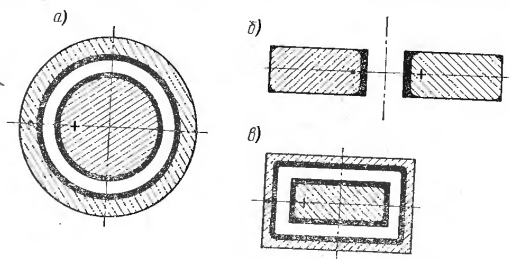


Рис. 2. Концентрация токов в токопроводах при встречном их направлении: а — для цилиндра внутри трубы; б — для прямоугольных шин; в — для прямоугольной шины, расположенной внутри замкнутой коробчатой шины

близости не изменяет активного сопротивления. В системе прямоугольных шин (рис. 2, б) эффект близости существенно увеличивает активное сопротивление, а в системе, показанной на рис. 2, в, уменьшает его.

Эффект близости проявляется тем сильнее, чем меньше расстояние между проводниками и выше частота тока. При индукционном нагреве токи в индукторе и нагреваемой детали находятся почти точно в противофазе. Поэтому, используя эффект близости, можно подбором соответствующей формы индуктора концентрировать ток на участках изделия, которые необходимо нагревать.

**Кольцевой (катушечный) эффект.** При свертывании проводника с переменным током в кольцо наибольшая плотность тока наблюдается на внутренней поверхности спирали. В этом случае магнитное поле становится несимметричным относительно оси проводника (рис. 3). Внутри кольца напряженность магнитного поля увеличивается и ток концентрируется на внутренней поверхности проводника. При нагреве наружной цилиндрической

поверхности охватывающими индукторами кольцевой эффект оказывает полезное влияние, увеличивая концентрацию тока на поверхности детали. При нагреве внутренних поверхностей этот эффект оказывает отрицательное влияние.

**Влияние магнитопроводов на распределение тока в проводнике.** Если проводник, по которому пропускается ток высокой частоты, окружить с трех сторон ферромагнитным материалом (рис. 4), имеющим большое электрическое удельное сопротивление (феррит или расслоенное железо), то распределение тока в проводнике резко изменится. Можно считать с достаточной для практики точностью, что почти весь ток будет стянут к открытой кромке

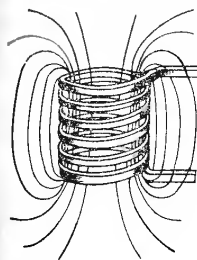


Рис. 3. Картина магнитного поля проводника, свернутого в кольцо (пустого индуктора)

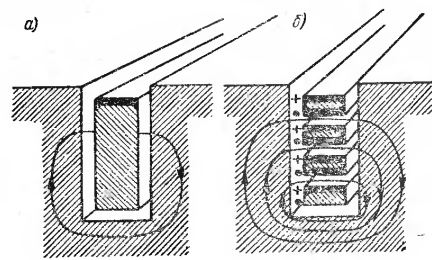


Рис. 4. Расположение проводников в пазу магнитопровода: а — одного проводника; б — четырех проводников

проводника. Вытеснение тока влечет за собой увеличение активного и реактивного сопротивлений. Таким образом, создание вокруг проводника разомкнутой магнитной цепи приводит к перераспределению тока по его сечению и тем сильнее, чем больше глубина паза и частота тока, проходящего по проводнику.

Если проводник свернут в кольцо, достаточно надеть на него П-образный магнитопровод, оставив открытой внешнюю сторону проводника, чтобы заставить ток протекать не по внутренней, а по внешней части проводника. Этим приемом пользуются при конструировании индукторов для нагрева внутренних поверхностей. Если в пазу магнитопровода находится несколько слоев проводников, по которым текут токи в одном направлении (многовитковая многослойная катушка), то потери в медных проводниках значительно возрастают, потому что ток, идущий по нижнему проводнику, наводит на нижней поверхности вышерасположенного проводника ток встречного направления. Этот ток, дойдя до конца магнитопровода, переходит на верхнюю поверхность второго проводника и складывается с током катушки. На наружной поверхности самого верхнего проводника течет ток

значительно больший, чем ток катушки. Поэтому многослойные катушки весьма редко используются при создании индукторов.

Поскольку в магнитопроводе за счет вихревых токов и потерь на гистерезис выделяется значительная мощность, его практически всегда нужно охлаждать водой. Для изготовления магнитопроводов, используемых при частотах звукового диапазона (0,5—10 кГц), применяют пластины толщиной  $(0,1 \div 0,35) \cdot 10^{-3}$  м, выполненные из трансформаторной кремнистой стали и покрытые термостойким слоем изоляции с помощью лакирования, оксидирования или лучше всего фосфатирования. Толщина пластины выбирается в зависимости от частоты, индукции и интенсивности охлаждения. Для частот 0,5—2,5 кГц применяют пластины толщиной  $(0,35 \div 0,2) \cdot 10^{-3}$  м, а для частот 8—10 кГц — толщиной  $(0,2 \div 0,1) \cdot 10^{-3}$  м. Магнитопроводы, применяемые в устройствах с частотой радиодиапазона (70 кГц и выше), изготавливают только из феррита.

Потери в магнитопроводах  $P_c$  при частотах 2,5—8 кГц для стали марки Э44 могут быть определены в зависимости от толщин так [37]:

при толщине  $0,1 \cdot 10^{-3}$  м

$$P_c = 1,12 \cdot 10^{-3} f^{1,5} B_m^2 \text{ Вт/кг}; \quad (9)$$

при толщине  $0,2 \cdot 10^{-3}$  м

$$P_c = 8,5 \cdot 10^{-4} f^{1,6} B_m^2 \text{ Вт/кг}; \quad (10)$$

при толщине  $0,35 \cdot 10^{-3}$  м

$$P_c = 5 \cdot 10^{-4} f^{1,75} B_m^2 \text{ Вт/кг}. \quad (11)$$

В замкнутом магнитном сердечнике, если его поперечное сечение постоянно, с достаточной точностью можно принять максимальное значение магнитной индукции

$$B_m = U_m / (4,44 S f W), \quad (12)$$

где  $U_m$  — амплитуда напряжения на катушке, В;  $S$  — сечение сердечника, м<sup>2</sup>;  $W$  — число витков катушки.

Если же сердечник не замкнут, то не всегда значение магнитной индукции постоянно во всем объеме магнитопровода. В этом случае формулы (9)—(11) могут быть использованы для качественного анализа. Если известно распределение магнитной индукции по сечению в различных элементах магнитопровода, то целесообразно разбить магнитопровод на участки с постоянным  $B_m$ . Тогда полные потери в магнитопроводе определяются как сумма потерь каждого участка.

**Влияние медных экранов на распределение тока в проводниках.** В конструкциях индукторов на средней частоте иногда используются медные экраны. Медь относится к диамагнитным материалам, у которых относительная магнитная проницаемость чуть меньше единицы. Медный экран, будучи помещен на пути магнит-

ного потока индуктора, перераспределяет магнитное поле и ток, наведенные в нагреваемой детали. Под действием магнитного поля в экране наводится ток, фаза которого отличается от первичного тока на  $180^\circ$ . Поэтому внутри экрана поле значительно ослаблено, а между экраном и заготовкой — усилено. На рис. 5 показаны примеры использования медных экранов для повышения или уменьшения плотности тока на шинах прямоугольного сечения.

При симметричном расположении экрана 2 (рис. 5, а) усиливается эффект близости и нагрев внутренних поверхностей шин 1 и 3 увеличивается. Смещение экрана 2 (рис. 5, б) в сторону

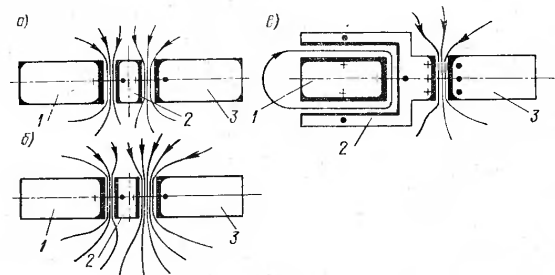


Рис. 5. Примеры перераспределения тока на шинах при симметричном (а) и несимметричном (б и в) расположениях экрана

левой шины 1 вызывает увеличение ее нагрева, а нагрев правой шины 3 ослабевает. Экран, представленный на рис. 5, в, резко уменьшает нагрев левой шины.

**Изменение свойств различных металлов при изменении температуры и напряженности магнитного поля.** Распределение тока в материале токопроводов и нагреваемой детали, а также мощности существенно зависит от свойств материала — магнитной проницаемости и удельного электрического сопротивления. Магнитная проницаемость материала определяется температурой и напряженностью магнитного поля, а удельное электрическое сопротивление — температурой. Абсолютная магнитная проницаемость  $\mu_a$  многих материалов, таких, как медь и ее сплавы, алюминий и его сплавы, титан, стали аустенитного класса и др., близка к значению абсолютной магнитной проницаемости вакуума  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Г/м. Относительная магнитная проницаемость этих материалов  $\mu = \mu_a / \mu_0$  близка к единице (несколько больше единицы для парамагнитных и несколько меньше единицы для диамагнитных материалов) и практически не зависит от напряженности магнитного поля.

Относительная магнитная проницаемость ферромагнитных материалов (железа, никеля, кобальта и сплавов на их основе,

Таблица 2. Магнитная индукция  $B$  и относительная проницаемость  $\mu$  магнитного поля  $H$  для сталей с различным содержанием углерода [21]

Напряженность магнитного поля $H$ , А/м	Магнитная индукция $B$ , Т		Относительная магнитная проницаемость $\mu$	
	$C = 0,23\%$	$C = 1,78\%$	$C = 0,23\%$	$C = 1,78\%$
79,9	0,100	0,0115	1 000,00	115,00
199,2	0,550	0,0380	2 200,00	152,00
398,5	0,920	0,0940	1 840,00	187,50
797,0	1,200	0,3250	1 200,00	325,00
3 985,0	1,597	1,1860	400,00	239,00
7 970,0	1,720	1,3540	172,50	135,00
23 910,0	1,956	1,5900	66,50	53,20
79 700,0	2,175	1,8400	21,80	18,45
239 100,0	2,392	2,2150	7,99	7,40

большинства сталей) значительно больше единицы и зависит от напряженности магнитного поля (табл. 2 и рис. 6), температуры и предварительного намагничивания. При температурах материала ниже температуры точки Кюри  $\mu$  остается практически постоянной (несколько снижается в сильных полях и возрастает в слабых). При температуре точки Кюри относительная магнитная проницаемость резко падает до единицы и при дальнейшем повышении температуры остается неизменной.

Таблица 3. Удельное электрическое сопротивление металлов при различных температурах

Температура $T$ , °С	Удельное электрическое сопротивление $\rho \cdot 10^8$ , Ом·м	Температура $T$ , °С	Удельное электрическое сопротивление $\rho \cdot 10^8$ , Ом·м
Сталь углеродистая		Медь	
20	20	20	1,68
100	25	30	1,73
200	33	100	2,34
400	52	200	3,00
600	79	400	4,80
800	118	600	5,76
1000	122	900	8,00
1200	126	1000	9,60
1300	130	1083	9,89
Титан		Алюминий	
20	47,8	20	2,66
200	106,0	100	3,86
400	133,0	300	5,96
600	138,0	400	8,00
800	145,0	500	9,60
950	148,0		

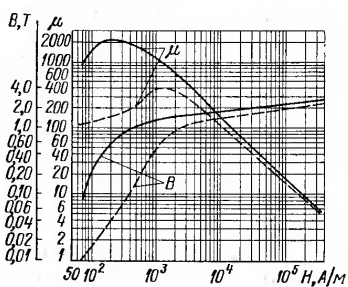


Рис. 6. Зависимость магнитной индукции  $B$  и магнитной проницаемости  $\mu$  от напряженности магнитного поля  $H$  для низкоуглеродистой стали с содержанием углерода 0,23% (—) и 1,78% (---)

Электрическое сопротивление металлов с ростом температуры возрастает (табл. 3). Для ферромагнитных материалов наибольшее изменение электрического сопротивления происходит при температуре точки Кюри.

**Электромагнитная сила.** На проводящие тела в электромагнитном поле действуют электромагнитные силы, которые возникают за счет взаимодействия токов проводимости и токов намагничивания с магнитным полем. Электромагнитная сила, возникающая при взаимодействии токов проводимости с магнитным полем, стремится переместить проводящее тело с током из зоны с большей напряженностью в зону с меньшей, а также сблизить проводники, если разность фаз токов равна нулю, и раздвинуть их при разности фаз  $180^\circ$ . При сварке электромагнитная сила выбрасывает расплавленный металл из V-образной щели, что оказывает влияние на качество сварки. С понижением частоты величина электромагнитных сил возрастает.

При взаимодействии токов намагничивания (ферромагнитный материал) с магнитным полем электромагнитная сила стремится переместить тело в зону с наибольшей напряженностью магнитного поля. При этом мельчайшие частицы окалины, попадающие в воздух цеха с поверхности деформируемого и нагреваемого ферромагнитного материала, а также стружка и заусенцы притягиваются к индуктору, нагреваются в его поле до температуры точки Кюри и могут вывести из строя его изоляцию.

Напряженность магнитного поля на поверхности проводника и его свойства определяют мощность, поглощаемую проводящей средой.

## 2. Мощность, поглощаемая проводящей средой при высокочастотном нагреве

При нагреве изделий из проводящего материала обычно учитывается только электроэнергия, выделяющаяся за счет индуцируемых в изделиях токов. Энергия, выделяемая за счет потерь на гистерезис, весьма мала и ею пренебрегают. При рассмотрении нагрева т. в. ч. стали до температуры, превышающей температуру магнитных превращений, целесообразно выделить три основных периода нагрева.

В начальный период нагрева, называемый холодным режимом, удельное электрическое сопротивление может быть принято постоянным по всему сечению и равным среднему. Обычно расчет ведется для нагрева до температуры поверхности  $T_0 = 600 \div 650^\circ \text{C}$ , при которой в среднем  $\rho = (0,60 \div 0,65) 10^{-6}$  Ом·м. Магнитная проницаемость в любой точке сечения определяется по кривой намагничивания в зависимости от действующего значения первой гармоники напряженности магнитного поля.

В следующий период (промежуточный режим) на поверхности нагреваемой детали имеется слой толщиной  $x_k$ , который прогрет



до температуры выше температуры точки Кюри. Температура остального сечения ниже этой температуры и постепенно падает при удалении от поверхности. В слое  $x_k$  относительная магнитная проницаемость постоянна и равна единице. На границе зон, нагретой до температуры точки Кюри и холодной,  $\mu$  изменяется скачком. В холодной зоне  $\mu$  определяется по кривой намагничивания. Удельное электрическое сопротивление переменено во всем исследуемом объеме.

Третий период нагрева называется горячим режимом. При этом считается, что все сечение детали нагрето до температуры выше температуры точки Кюри,  $\rho$  и  $\mu$  постоянны. Практически это можно принять, если  $x_k \geq 2\Delta_k$  [35], где  $\Delta_k$  — горячая глубина проникновения.

При рассмотрении нагрева ферромагнитных материалов, имеющих постоянную относительную магнитную проницаемость, учитывают только один период нагрева, характеризующийся постоянными значениями  $\rho$  и  $\mu$ . Значение  $\rho$  выбирается средним для всего периода нагрева.

Рассмотрим перечисленные периоды нагрева, начиная с наиболее простого случая, когда  $\rho = \text{const}$ ,  $\mu = \text{const}$ .

**Режим, характеризующийся постоянными  $\rho$  и  $\mu$ .** Исследуем электромагнитное поле в полубесконечной среде с постоянными магнитной проницаемостью и удельным электрическим сопротивлением. Проводящая среда с одной стороны ограничена плоской поверхностью, через которую проникает плоская электромагнитная волна. Векторы электрического и магнитного полей перпендикулярны друг другу и параллельны поверхности, ограничивающей среду. Линии электрического тока нормальны к вектору напряженности магнитного поля и совпадают с направлением вектора электрического поля. Электромагнитное поле распространяется из воздуха в полубесконечную среду в направлении, нормальном к поверхности среды.

Активная удельная мощность, поглощаемая средой [6, 35], равна

$$P_a = (H_{me}/\sqrt{2})^2 (\rho/\Delta_k). \quad (13)$$

Реактивная мощность, обусловленная наличием магнитного потока в металле и связанная с отставанием магнитного поля от электрического, равна активной мощности. Поэтому при зазоре между проводниками, равном нулю, коэффициент мощности

$$\cos \varphi = P_a / \sqrt{P_a^2 + P_r^2} = 1/\sqrt{2} = 0,707.$$

Полная мощность в этом случае выражается формулой

$$P = \sqrt{P_a^2 + P_r^2} = \sqrt{2}P_a.$$

**Холодный режим.** При нагреве изделия т. в. ч. напряженность магнитного поля на поверхности значительно превосходит крити-

ческую, при которой магнитная проницаемость достигает максимума. Поэтому поверхностные слои изделия находятся в состоянии магнитного насыщения. С увеличением глубины амплитуда напряженности магнитного поля уменьшается. Это вызывает увеличение магнитной проницаемости  $\mu$ , и при  $H_{me} = H_{кр}$  она достигает максимума, а затем падает. Поэтому плотность тока в ферромагнитной среде падает по закону, близкому к линейному.

Л. Р. Нейман [21] и А. Е. Слухоцкий [35] в своих работах показали, что для полубесконечной ферромагнитной среды ( $\mu = \text{var}$ ,  $\rho = \text{const}$ ) активная мощность равна

$$P_a = 1,37 (H_{me}/\sqrt{2})^2 (\rho/\Delta_e), \quad (14)$$

где  $\Delta_e$  — глубина проникновения поля, определенная по формуле (8) в зависимости от  $\mu_e$ , соответствующей значению напряженности магнитного поля  $H_{me}/\sqrt{2}$  на поверхности среды, м. Реактивная мощность равна

$$P_r = 0,972 (H_{me}/\sqrt{2})^2 (\rho/\Delta_e). \quad (15)$$

Коэффициент мощности, определяемый по активной мощности, выделяющейся в детали, и реактивной, соответствующей потоку магнитного поля внутри детали, составляет

$$\cos \varphi = 1,37/\sqrt{1,37^2 + 0,972^2} = 0,83.$$

Значения  $\Delta_e$ ,  $\mu_e$  и  $P_a$  для углеродистой стали в зависимости от  $H_{me}/\sqrt{2}$  приведены в табл. 4 и 5.

**Промежуточный режим.** При этом режиме в нагреваемом изделии имеются два резко разграниченных слоя. На границе слоев магнитная проницаемость изменяется скачком от  $\mu = 1$  в поверхностном слое толщиной  $x_k < 1,5\Delta_k$  до  $\mu = \mu_2$  во втором слое, в пределах которого она изменяется с падением напряженности магнитного поля.

Мощность в поверхностном слое можно определить по формуле (13). Формулы (14) и (15) могут быть использованы для определения мощности во втором слое. Активная и реактивная мощности для двухслойной среды находятся по формулам [6]:

$$P_a = (H_{me}/\sqrt{2})^2 (\rho_r/\Delta_k) \varphi; \quad (16)$$

$$P_r = (H_{me}/\sqrt{2})^2 (\rho_r/\Delta_k) \psi, \quad (17)$$

где  $\rho_r$  — удельное электрическое сопротивление поверхностного слоя, нагретого до температуры выше температуры магнитных превращений, Ом·м;  $\varphi$  и  $\psi$  — коэффициенты, учитывающие наличие второго слоя, определяются как функции от значения напряженности магнитного поля  $H_{me}$  на границе магнитного и немагнитного слоев.

Таблица 4. Значения магнитной проницаемости  $\mu_e$ , глубины проникновения  $\Delta_e$  в зависимости от напряженности магнитного поля на поверхности среды  $H_e$  для углеродистой стали при  $\rho = 18 \cdot 10^{-8}$  Ом·м

Напряженность магнитного поля $H_e \cdot 10^{-4}$ , А/м	Магнитная проницаемость $\mu_e$	Глубина проникновения $\Delta_e \cdot 10^{-4}$ (м) при частоте, кГц					
		2,5	4	8	10	70	440
1	128,00	3,7	2,96	2,1	1,89	0,71	0,286
2	67,00	5,2	4,10	2,9	2,61	0,99	0,394
4	35,20	7,2	5,65	4,0	3,60	1,40	0,544
6	24,20	8,7	6,80	4,9	4,35	1,63	0,655
8	18,40	10,0	7,80	5,6	5,00	1,87	0,753
10	15,00	11,0	8,65	6,2	5,50	2,10	0,833
12	12,70	12,0	9,40	6,7	6,00	2,26	0,906
14	11,00	12,8	10,10	7,2	6,45	2,40	0,975
16	9,67	13,7	10,70	7,7	6,87	2,60	1,040
18	8,65	14,4	11,40	8,1	7,27	2,72	1,100
20	7,90	15,1	11,90	8,5	7,60	2,87	1,150
24	6,63	16,5	12,90	9,2	8,30	3,14	1,250
28	5,75	17,7	13,90	9,9	8,93	3,35	1,350
32	5,08	19,0	14,80	10,6	9,50	3,60	1,430
36	4,55	20,0	15,60	11,2	10,00	3,78	1,510
40	4,53	20,5	15,70	11,5	10,00	3,80	1,520

Соотношение между  $H_{me}$  и  $H_{m0}$  определяется по формуле [6]

$$H_{me}^2 = H_{m0}^2 \{ [ (q^2 + p^2) k_{\pi}^2 + 1 ]^{1/2} \operatorname{ch} (2x_k / \Delta_k) - [ (q^2 + p^2) k_{\pi} - 1 ]^{1/2} \cos (2x_k / \Delta_k) + k_{\pi} q \operatorname{sh} (2x_k / \Delta_k) - k_{\pi} p \sin (2x_k / \Delta_k) \}, \quad (18)$$

где

$$q = (\sqrt{m(m-1)} + m) / (2 \sqrt{(m-1/2)\sqrt{m(m-1)}});$$

$$p = (\sqrt{m(m-1)} - m) / (2 \sqrt{(m-1/2)\sqrt{m(m-1)}}) -$$

коэффициенты, зависящие от формы кривой намагничивания материала;  $m = 2n/(n-1)$  — безразмерная величина, зависящая от коэффициента параболы  $n$ , представляющей кривую намагничивания;  $k_{\pi} = \rho_r \Delta_k / (\rho_x \Delta_{2e})$  — безразмерный коэффициент, характеризующий изменение свойств материала при нагреве;  $\Delta_{2e} = \sqrt{2\rho_x / (\omega \mu_0 \mu_e)}$  — глубина проникновения во втором слое, по-

лучаемая по значению  $\mu_e$  на границе между слоями. По формуле (18) в работе [6] произведен расчет значений  $H_{m0}/\sqrt{2}$  при различных соотношениях  $H_{me}/\sqrt{2}$  и  $x_k/\Delta_k$ , результаты которого приведены в табл. 6. Значения функций  $\varphi$  и  $\psi$  для формул (16) и (17) при различных напряженностях магнитного поля  $H_{m0}/\sqrt{2}$  на границе раздела двух слоев даны в табл. 7 и 8.

Если слой, прогретый до температуры выше температуры магнитных превращений, имеет толщину  $x_k \geq 1,5\Delta_k$ , влияние второго (ферромагнитного) слоя мало (коэффициенты  $\varphi \approx 1$  и  $\psi \approx 1$ ) и промежуточный режим может рассматриваться как горячий.

При высокочастотном нагреве мощность в нагреваемом изделии выделяется неравномерно, поэтому теплопередача играет важную роль.

Таблица 5. Значения мощности  $P_a$  в зависимости от напряженности магнитного поля на поверхности среды  $H_e$  в холодном режиме для углеродистой стали с  $\rho = 18 \cdot 10^{-8}$  Ом·м

Напряженность магнитного поля $H_e \cdot 10^{-4}$ , А/м	Активная мощность $P_a$ (Вт/м <sup>2</sup> ) при частоте, кГц		
	8	70	440
1	9	34	87
2	33	95	248
4	96	280	713
6	178	530	1340
8	276	840	2060
10	392	1150	2930
12	520	1530	3900
14	660	1950	4930
16	802	2370	6000
18	970	2960	7250
20	1140	3370	8500
24	1500	4530	11200
28	1900	5600	14200
32	2310	6850	17400
36	3000	8500	22400

Таблица 6. Значения действующих напряженностей магнитного поля  $H_{me}/\sqrt{2}$  на поверхности среды при различных  $H_{m0}/\sqrt{2}$  [6]

$(H_{m0}/\sqrt{2}) \cdot 10^{-4}$ , А/м	$(H_{me}/\sqrt{2}) \cdot 10^{-4}$ (А/м) при $x_k/\Delta_k$										
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1	1	—	—	—	6,18	7,54	8,92	10,33	11,77	13,26	14,80
2	2	—	5,59	7,5	9,44	11,44	13,46	15,53	17,65	19,85	22,13
4	4	6,43	9,14	11,0	14,72	17,62	20,60	23,65	26,80	30,06	33,50
8	8	11,5	15,30	19,3	23,20	27,60	32,00	36,50	41,10	46,10	51,30
12	12	16,32	21,00	26,4	32,10	38,10	44,30	50,80	57,50	64,40	71,50
16	16	21,00	26,40	32,1	38,10	44,30	50,80	57,50	64,40	—	—
20	20	25,6	31,70	38,2	44,90	51,95	59,20	—	—	—	—
24	24	30,18	36,80	43,9	51,35	—	—	—	—	—	—
28	28	34,65	41,80	49,9	—	—	—	—	—	—	—
32	32	39,15	46,90	—	—	—	—	—	—	—	—
36	36	43,55	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Т а б л и ц а 7. Значения функции  $\varphi$  [6]

$(H_{\text{пр}}/V^2) \cdot 10^{-4}$ А/м	$\varphi$ при $x_k/\Delta_k$									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	4,060	3,405	2,575	2,185	1,815	1,560	1,386	1,242	1,140	1,067
8	3,210	2,980	2,355	2,080	1,750	1,516	1,345	1,225	1,130	1,060
12	2,783	2,546	2,100	1,810	1,662	1,458	1,310	1,199	1,115	1,052
16	2,505	2,300	1,974	1,680	1,557	1,386	1,260	1,170	1,083	1,040
20	2,300	2,115	1,819	1,600	1,530	1,298	1,201	1,130	—	—
24	2,140	1,980	1,727	1,535	1,385	1,272	—	—	—	—
28	2,010	1,870	1,650	1,480	—	—	—	—	—	—
32	1,910	1,777	1,585	—	—	—	—	—	—	—
36	1,820	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Т а б л и ц а 8. Значения функции  $\psi$  [6]

$(H_{\text{пр}}/V^2) \cdot 10^{-4}$ А/м	$\psi$ при $x_k/\Delta_k$									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	1,117	0,917	0,660	0,513	0,511	0,535	0,566	0,618	0,665	0,730
8	1,578	0,996	0,745	0,650	0,563	0,575	0,607	0,648	0,690	0,735
12	1,444	1,042	0,819	0,734	0,623	0,628	0,652	0,685	0,724	0,763
16	1,399	1,047	0,868	0,764	0,690	0,688	0,705	0,733	0,761	0,797
20	1,340	1,038	0,885	0,764	0,730	0,724	0,737	0,760	0,788	0,819
24	1,288	1,029	0,892	0,810	0,759	0,753	0,763	0,785	—	—
28	1,240	1,019	0,898	—	—	—	—	—	—	—
32	1,202	1,008	—	—	—	—	—	—	—	—
36	1,172	—	—	—	—	—	—	—	—	—

### 3. Теплопередача при высокочастотном нагреве тела неограниченной толщины с плоской поверхностью

При протекании тока в поверхностном слое нагреваемого изделия выделяется тепловая энергия и его температура растет. В слой металла, лежащие ближе к поверхности, поступает большая энергия и температура растет быстрее. Поэтому появляется разность температур и начинается передача энергии от поверхностных слоев к слоям, расположенным в глубине тела. Процесс теплопередачи снижает температуру поверхностных и повышает температуру глубинных слоев. Влияние теплопередачи тем силь-

нее, чем больше время нагрева, выше коэффициент теплопроводности. Для случая нагрева токами высокой частоты полуограниченного пространства (полубесконечности), если пренебречь потерями с поверхности среды, температура является функцией безразмерного параметра  $u$  [6]:

$$u = x/[2\sqrt{\lambda t/(c\gamma)}], \quad (19)$$

где  $x$  — координата точки, измеренная от поверхности тела, м;  $t$  — время, с;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С);  $c$  — удельная теплоемкость, Вт/кг·°С;  $\gamma$  — плотность, кг/м³.

При расчетах теплопередачи различают следующие случаи:

1) ярко выраженный поверхностный нагрев, при котором характер распределения мощности мало влияет на распределение температуры;

2) глубинный нагрев среды с постоянными характеристиками ( $\mu = \text{const}$ ,  $\rho = \text{const}$ );

3) глубинный нагрев ферромагнитной среды, когда на поверхности имеется слой с постоянными характеристиками ( $\mu = 1$ ,  $\rho = \text{const}$ ).

**Ярко выраженный поверхностный нагрев среды с постоянными параметрами.** Этот тип нагрева возможен при весьма больших значениях  $f$ ,  $\mu$  и  $\gamma$ . Решение уравнения теплопроводности для этого случая при постоянной удельной мощности имеет вид [6]

$$T_0 = 2\rho_0\sqrt{t/(\lambda c\gamma)}/V\pi, \quad (20)$$

где  $T_0$  — температура на поверхности среды, °С;  $\rho_0$  — удельная мощность, Вт/м².

Распределение температуры в проводящей среде выражается формулой

$$T_\infty = T_0\Psi(u), \quad (21)$$

где  $u$  — параметр, определяемый по формуле (19).

Значения функции  $\Psi(u)$  для различных параметров приведены в табл. 9.

**Глубинный нагрев среды с постоянными параметрами.** Известно решение дифференциального уравнения теплопроводности при экспоненциальном распределении источников тока [6]. Температура  $T_f$  точки, лежащей на расстоянии  $x$  от поверхности среды, через время  $t$ , прошедшее с начала нагрева, при экспоненциальном распределении источников тепла будет

Т а б л и ц а 9. Значения функции  $\Psi(u)$  [6]

$u$	$\Psi(u)$	$u$	$\Psi(u)$
0	1,000	0,7	0,213
0,1	0,833	0,8	0,162
0,2	0,685	0,9	0,121
0,3	0,557	1,0	0,089
0,4	0,447	1,1	0,065
0,5	0,354	1,2	0,046
0,6	0,276	—	—

$$T_f = T_\infty - \Delta T, \quad (22)$$

где  $T_\infty$  — температура в этой точке и в тот же момент времени при ярко выраженном поверхностном нагреве, определяемая по формуле (21), °C;  $\Delta T$  — температурная поправка, учитывающая толщину слоя, в котором выделяется тепло, и зависящая от параметров  $u$  и  $v$ .

Параметр  $v$  определяется по формуле  $v = 2\sqrt{\lambda l / (c\gamma)} / \Delta$ .

В табл. 10 приведены значения  $\Delta T/T_0$  и  $T_f/T_0$  при различных значениях  $u$  и  $v$  [6].

Таблица 10. Значения отношений  $T_f/T_0$  и  $\Delta T/T_0$  при различных  $u$  и  $v$  [6]

$v$	$\Delta T/T_0$	$T_f/T_0$	$\Delta T/T_0$	$T_f/T_0$	$\Delta T/T_0$	$T_f/T_0$
	$u = 0$		$u = 0,2$		$u = 0,4$	
$\infty$	—	1,0000	—	0,685	—	0,447
10	0,0836	0,9164	-0,00316	0,686	—	—
6	0,1340	0,8660	0,00020	0,685	—	—
4	0,1911	0,8090	0,01550	0,670	-0,0171	0,464
3	0,2424	0,7576	0,03790	0,647	-0,0190	0,466
2	0,3300	0,6700	0,08960	0,595	-0,0097	0,457
	$u = 0,1$		$u = 0,3$		$u = 0,6$	
$\infty$	—	0,833	—	0,557	—	0,276
10	0,0071	0,826	—	—	—	—
6	0,0309	0,802	-0,0085	0,565	—	—
4	0,0684	0,765	—	—	—	—
3	0,1097	0,723	—	—	-0,0300	0,306
2	0,1930	0,640	—	—	-0,0441	0,320

Примечание. При  $v = \infty$   $T_f/T_0 = T_\infty/T_0$ .

**Нагрев ферромагнитной среды с поверхностным слоем, нагретым до температуры выше температуры магнитных превращений.** При нагреве изделия из ферромагнитного материала в слое, прогревом выше точки магнитных превращений, плотность тока, а значит, и мощность спадают медленно. В слоях же с температурой ниже температуры магнитных превращений плотность тока и мощность снижаются значительно быстрее. Поэтому для приближенного теплового расчета можно заменить реальное распределение плотности тока более простым, считая ее постоянной в пределах слоя толщиной  $\xi$  (активный слой) и равной нулю — за пределами этого слоя. Принимается также, что  $\xi$  неизменна во времени и равна своему значению в конце нагрева. При расчетах мощности, необходимой для высокочастотной сварки, рекомендуется брать  $\xi = \Delta_k$ .

Решение дифференциального уравнения теплопроводности для случая, когда источники питания распределены равномерно в слое толщиной  $\xi$  [35]:

$$T = \frac{p_0}{4\lambda\xi} \left\{ (x + \xi)^2 \left[ F\left(\frac{x + \xi}{2\sqrt{at}}\right) - 1 \right] - (x - \xi)^2 \left[ F\left(\frac{x - \xi}{2\sqrt{at}}\right) - \varepsilon \right] \right\}, \quad (23)$$

где  $p_0$  — удельная мощность, Вт/м<sup>2</sup>;  $a$  — коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $\varepsilon$  — безразмерная величина (при  $x > \xi$   $\varepsilon = +1$ ,  $x < \xi$   $\varepsilon = -1$ ). Значения функции  $F [ (x \pm \xi) / (2\sqrt{at}) ]$  приведены в приложении 1. Если аргумент  $(x - \xi) / (2\sqrt{at}) < 0$ , то функция  $F$  является отрицательной величиной. При  $x = 0$ ,  $T = T_0$  формула (23) принимает вид [35]

$$T_0 = \frac{p_0\xi}{2\lambda} \left[ F\left(\frac{\xi}{2\sqrt{at}}\right) - 1 \right],$$

функция  $F [ \xi / (2\sqrt{at}) ]$  находится по таблице приложения 1.

Рассмотрев законы и явления, которые используются при высокочастотной сварке, перейдем к описанию механизма процесса сварки.

#### 4. Механизм процесса высокочастотной сварки

Исходя из современных представлений о сварке металлов, процессы высокочастотной сварки можно разделить на три группы.

1. Сварка давлением с оплавлением. Осуществляется при предварительном нагреве и местном расплавлении свариваемых поверхностей. Расплавленный металл удаляется из зоны соединения при осадке; сварное соединение образуется между поверхностями, находящимися в твердом состоянии. Скорость нагрева достигает  $150 \cdot 10^3$  °C/с; осадка — 0,15—1,5 мм; скорость осадки — 2000 мм/с.

2. Сварка давлением без оплавления. Осуществляется с предварительным нагревом свариваемых поверхностей до температуры ниже точки плавления свариваемого металла. Скорость нагрева не превышает 400 °C/с; осадка — 2,5—6,0 мм; скорость осадки — 20 мм/с.

3. Сварка плавлением без давления. Осуществляется при нагреве свариваемых элементов до оплавления. Ванна расплавленного металла застывает, образуя сварной шов без приложения давления. Скорость нагрева доходит до 8000 °C/с.

**Сварка давлением с оплавлением.** Этот процесс наиболее широко распространен при производстве сварных изделий и полуфабрикатов с непрерывным швом из черных и цветных металлов. Схема

свариваемых элементов представлена на рис. 7 и 8. Свариваемые элементы, показанные на рис. 8, *a*, имеют одинаковые геометрические размеры и материал и расположены симметрично относительно вертикальной плоскости. При симметричном подводе тока к свариваемым элементам обеспечивается симметричная плотность нагрева. Такую схему будем называть полной идентичностью нагрева. Такую схему будем называть симметричной. Когда свариваемые элементы имеют неодинаковую геометрию (рис. 8, *b*), даже при симметричном подводе тока к элементам плотность тока на них неодинакова. Различны и условия теплоотвода. Обеспечить одинаковый нагрев обоих элементов без принятия специальных мер невозможно. Такую схему будем называть несимметричной. При сварке элементов с различными теплофизическими свойствами схема, приведенная на рис. 8, *a*, будет также несимметричной.

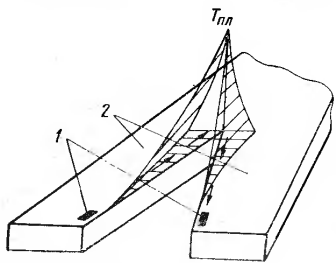


Рис. 7. Схема процесса сварки давлением с оплавлением:  
1 — место подвода тока; 2 — свариваемые элементы

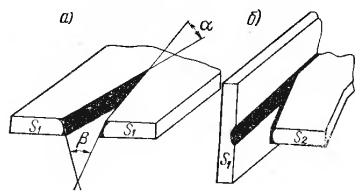


Рис. 8. Схемы свариваемых элементов: *a* — симметричная; *b* — несимметричная

В рассматриваемых схемах оба элемента сходятся под углом  $\alpha$ , на некотором расстоянии от места схождения к элементам подается ток с помощью контактной или индукционной систем, кромки разогреваются и оплавляются, в месте их схождения происходит последовательный нагрев и деформация свариваемых элементов происходит последовательно. Для осуществления сварки необходимы физический контакт между поверхностями, создание на них активных центров и предупреждение возможности разрушения образовавшихся узлов схватывания после снятия давления осадки [5]. Нагрев активно влияет на все стадии процесса, и поэтому целесообразно рассмотреть его подробно.

Расстояние от места токоподвода до места схождения кромок обычно лежит в пределах от 25 до 300 мм. На этом отрезке осуществляется нагрев свариваемых элементов до заданной температуры. Возможны три варианта нагрева.

1. Участки свариваемых элементов до места схождения нагреваются до температуры ниже  $T_{пл}$ , а вследствие электромагнитных явлений, описанных в гл. I, наибольшая концентрация тока достигается в месте схождения свариваемых элементов, где они оплавляются. Температура в этом месте может достигать  $(1,1 \div 1,2) T_{пл}$ .

2. Участки свариваемых элементов оплавляются до места схождения. Воздействием механических сил электромагнитного поля расплавленный металл удаляется с поверхности нагреваемых элементов. На расстоянии от места выброса расплавленного металла до места схождения элементов происходит дальнейший их нагрев, а в месте перехода с одного элемента на другой — повторное оплавление. Как и в первом варианте, температура в месте перехода может достигать  $(1,1 \div 1,2) T_{пл}$ .

3. Свариваемые элементы нагреваются на всем протяжении ниже  $T_{пл}$ , включая и место схождения.

В рассматриваемом процессе нагрев снижает сопротивление пластической деформации, повышает пластичность металла и облегчает удаление окислов со свариваемых поверхностей. Сопротивление пластической деформации

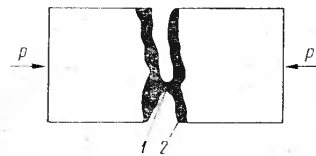


Рис. 9. Оплавление свариваемых поверхностей при стыковой сварке:  
1 — перемычка; 2 — оплавленные поверхности

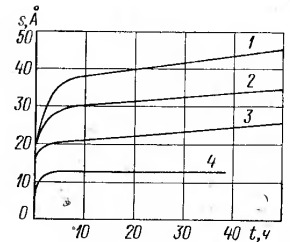


Рис. 10. Рост окисных пленок на металлах:  
1 — медь; 2 — железо; 3 — алюминий; 4 — серебро

растет с увеличением ее скорости при всех температурах и зависит от ее абсолютной величины. При определенных условиях это оказывает существенное влияние на усилия осадки.

Как было показано выше, при высоких градиентах температурного поля нагрев носит чисто поверхностный характер, однако он осуществляется за счет пропускания тока по свариваемым элементам. Плотность тока равномерна по сечению, а глубина прогрева регулируется частотой тока источника питания, расстоянием между свариваемыми элементами (эффект близости) и временем нагрева. В этом отношении условия высокочастотного нагрева значительно отличаются от условий нагрева при стыковой сварке оплавлением, которая по существующей классификации относится к виду сварки давлением с оплавлением [5]. При стыковой сварке оплавлением нагреваются свариваемые поверхности за счет тепловыделения в контактных перемычках (85—90% тепла), в результате чего получается неравномерный нагрев свариваемых поверхностей. Выравнивание температуры происходит во времени при росте количества перемычек, пока свариваемые поверхности не покроются слоем расплавленного металла (рис. 9).

Весьма существенную роль в рассматриваемых схемах нагрева играет удаление со свариваемых поверхностей окислов, образова-

шихся за время, предшествующее сварке (при хранении, транспортировке), и появляющихся в ходе нагрева. Все металлы за исключением золота на воздухе окисляются, создавая на поверхности тонкие окисные пленки. Толщина пленки зависит от времени окисления. Как видно из рис. 10, толщина окисленного слоя при комнатной температуре через несколько минут достигает определенной величины и в дальнейшем ее рост практически прекращается. Более сложный характер имеет образование окисных пленок с ростом температуры. Для меди, например, скорость окисления при 1000° С на четыре порядка выше, чем при 600° С. Известны случаи, когда скорость окисления снижается с ростом температуры, например у кадмия, ниобия [15].

Иногда образуются многослойные пленки. При этом на поверхности металла появляется слой окисла, богатого металлом [5, 15]. Например, окисление железа при температуре выше 600° С сопровождается образованием трехслойного окисла FeO-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Соотношение окислов (в массовых долях) при T = 700÷900° С составляет: 0,66—1,0% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 4,1—5,0% Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и около 95% FeO.

Еще более сложную картину представляет образование с ростом температуры окисных пленок на сплавах. Так, сплав, состоящий из 23% Cr, 7,5% Al и 69,5% Fe, после окисления на воздухе при T = 1200° С имел окисную пленку, состоящую из 94,5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3,4% Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и 2% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. На чисто хромистых сталях (20% Cr) при нагреве в слабо окислительной атмосфере окисная пленка состояла из 80% Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. С точки зрения возможности разрушения окисных пленок важно иметь представление об их теплофизических и механических свойствах. В табл. 11 приведены свойства металлов и окислов.

Представим себе механизм разрушения окисных пленок при рассматриваемых вариантах нагрева. В первом варианте, когда оплавление происходит в месте схождения свариваемых элементов при достижении температуры, равной (1,1÷1,2) T<sub>пл</sub>, невозможно расплавление окислов. Исключением являются FeO и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Можно представить, что тонкие пленки окислов быстро разогреваются за счет теплопроводности от сравнительно большого объема контактируемого металла (стартовый нагрев). Далее электрическое сопротивление пленок окислов быстро падает и они начинают разогреваться прямым пропусканием тока. В таком случае можно ожидать расплавления пленок окислов, например Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, имеющих большую температуру плавления, нежели основной металл. Окислы, имеющие высокую температуру плавления, лишь подогреваются, но не расплавляются. Изучением этого явления никто не занимался, и поэтому сказанное следует рассматривать как гипотезу.

При втором варианте нагрева, когда оплавление свариваемых элементов происходит до места их схождения и расплавленный металл удаляется со свариваемых поверхностей механическими

Таблица 11. Теплофизические свойства наиболее распространенных металлов и окислов [5, 45]

Металл или окисел	Плотность, γ кг/м <sup>3</sup>	Температура плавления, T <sub>пл</sub> , °С	Теплоемкость, c [Дж/(моль·К)] при T, К			Коэффициент температурного α [1/°С] при T, °С			Удельное электрическое сопротивление ρ, ·10 <sup>-8</sup> (Ом·см) при T, °С			Отношение удельных электрических сопротивлений в жидком и твердом состоянии R <sub>ж</sub> /R <sub>т</sub>			
			20	600	1000	1500	20	600	1000	1500	20		600	1000	1500
			Al	2,7	660	0,23	28,12	29,3	—	—	—		—	—	—
Fe	7,87	1535	0,22	31,55	57,74	43,29	—	—	—	—	—	—	—	1,09	
Cu	8,93	1083	0,48	26,40	28,91	31,4	—	—	—	—	—	—	—	2,07	
Cr	7,1	1903	0,45	29,37	33,93	39,07	—	—	—	—	—	—	—	—	
Ti	4,5	1668	0,33	28,82	31,55	35	—	—	—	—	—	—	—	—	
W	19,3	3380	0,33	25,8	27,2	26,9	—	—	—	—	—	—	—	—	
Сталь 20	7,85—8,0	1410—1500	0,2	28,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Дюралюминий	2,79	638—648	0,25	29,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Латунь	8,4—8,7	950—1070	0,41	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,8	2045	0,076	12,5	124,74	131,8	—	—	—	—	—	—	—	—	
FeO	5,87	1368	1,0	53,0	57,7	61,2	—	—	—	—	—	—	—	—	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,24	1565	3,29	140,8	150,6	143,7	—	—	—	—	—	—	—	—	
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	5,16	1538	3,55	212,5	200,8	200,8	—	—	—	—	—	—	—	—	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,21	2440	0,58	120,5	127,0	132,5	—	—	—	—	—	—	—	—	
SiO <sub>2</sub>	2,65	1710	0,72	76,65	86,19	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
SiO <sub>2</sub>	4,2	1855	13,26	70,12	74,35	77,19	—	—	—	—	—	—	—	—	

Примечание. Для Fe, Ti, W, Cr и всех окислов приведена плотность в твердом состоянии, для остальных металлов — в твердом (числитель) и жидком (знаменатель) состоянии.

силами электромагнитного поля, вероятно разрушение окисных пленок при выбросе металла. В результате повторного нагрева участков свариваемых элементов до места схождения они вновь окисляются, но из-за малого времени подогрева (не более 0,01 с) толщина вновь образовавшейся окисной пленки мала и она может быть разрушена или удалена вместе с жидким металлом в процессе осадки.

При третьем варианте нагрева, когда свариваемые поверхности на всем протяжении, включая место схождения, нагреваются ниже  $T_{пл}$ , очевидно нельзя ожидать разрушения окисных пленок. Исключение может составлять только FeO. Из сказанного следует, что наиболее универсальным является второй вариант нагрева, так как при нем обеспечивается разогрев свариваемых элементов до необходимой температуры и очистка их от окислов, в том числе тугоплавких. Первый вариант нагрева целесообразно применять при сварке малоуглеродистых и малолегированных сталей, на которых окисные пленки состоят из FeO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Третий вариант нагрева применяется редко.

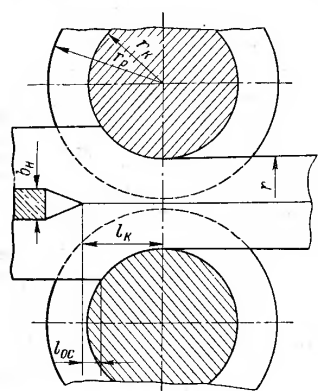


Рис. 11.3. Схема осадки кромок при сварке трубной заготовки радиусом  $r$ :  $l_k$  — полная длина контакта;  $l_{ос}$  — зона осадки;  $b_n$  — толщина ножа;  $r_k$  и  $r_p$  — радиусы швов обжимного вала по катающему диаметру и реберде;  $r$  — радиус трубы на выходе из сварочного калибра

Вслед за подготовительной фазой образования сварного соединения нагревом происходит осадка и формирование сварного шва. Для рассмотрения первого основного параметра осадки — скорости ( $v_{ос}$ ) обратимся к схеме, изображенной на рис. 11. На схеме показана полная длина контакта свариваемых элементов  $l_k$ , состоящая из зон осадки  $l_{ос}$ , редуцирования  $l_p$  (в случае сварки прямошовных труб и оболочек) и термомеханического упрочнения. Установлено, что при сварке наиболее распространенных изделий и материалов полная длина контакта  $l_k$  в 1,5—4 раза превышает  $l_{ос}$ , величина которой колеблется в пределах 1,5—2,5 мм [20]. Эта зона увеличивается с ростом толщины свариваемых элементов и увеличением абсолютной величины скорости осадки  $v_{ос}$ . При наиболее распространенных скоростях сварки (0,5—2 м/с) скорость осадки находится в пределах 20—2000 мм/с. Для получения качественного сварного соединения необходимо, чтобы весь оплавленный металл, имеющийся в месте схождения свариваемых элементов, был удален при осадке. Этого можно

добиться при условии, что скорость осадки будет достаточной и расплавленный металл не потеряет свойства жидкотекучести. Интервал времени  $\Delta t_0$ , достаточный для охлаждения металла от температуры  $T_1$  (в месте схождения элементов) до температуры потери жидкотекучести  $T_2$ , при стыковой сварке с непрерывным оплавлением можно определить по данным работы [5]. При сварке алюминиевого сплава

$$\Delta t_0 = \delta_p \gamma [c (T_1 - T_2) + m_0] / [\lambda (dT/dx)] \quad (24)$$

где  $\delta_p$  — толщина жидкого металла в месте схождения свариваемых элементов;  $\gamma$ ,  $c$  и  $m_0$  — плотность, теплоемкость и скрытая теплота плавления свариваемого металла;  $dT/dx$  — градиент температуры на единицу длины в поперечном сечении свариваемых элементов.

Очевидно, для гарантированного удаления при осадке жидкого металла, а следовательно, и окислов нужно, чтобы время осадки  $\Delta t$  было меньше  $\Delta t_0$  (а оно тем меньше, чем меньше  $\delta_p$  и  $T_1 - T_2$  и больше  $dT/dx$ ). Примем для расчета  $\delta_p = 0,14$  мм, т. е. равную глубине проникновения тока в алюминий при  $T = 600^\circ \text{C}$  и  $I = 440$  кГц,  $T_1 = 1,1 T_{пл} = 700^\circ \text{C}$ . Определим  $\Delta t_0$ , исходя из интервала кристаллизации сплавов, который может быть разделен на две части:

1) интервал, где выросшие дендриты твердого раствора разделены сплошной прослойкой жидкой фазы (жидко-твердое состояние);

2) интервал (ниже температурной границы жидко-твердого состояния), где происходит частичное срастание дендритов и образование из них жесткого скелета с дальнейшим затвердеванием всей жидкой фазы. Сплав при температуре выше температуры образования кристаллического каркаса, находящийся в жидкотвердом состоянии, обладает повышенной жидкотекучестью. Следовательно, можно принять  $T_2 = T_{кр}$  за температуру, при которой происходит переход от жидко-твердого в твердо-жидкое состояние. Эти интервалы температур для некоторых сплавов приведены в табл. 12.

Градиент  $dT/dx$  может быть определен при расчете температурного поля в зоне охлаждения шва, т. е. на участке от места схождения свариваемых элементов и далее при следующих допущениях [20]: 1) источник тепла постоянный и действует в течение времени нагрева; 2) принят экспоненциальный закон распределения плотностей источников тепла; 3) теплофизические характеристики сплава постоянны во времени; 4) теплоотдача с поверхности свариваемых кромок за счет излучения и конвекции пренебрежимо мала.

В табл. 13 приведены результаты расчета градиента  $dT/dx$  и интервала  $\Delta t_0$  при различных значениях времени нагрева свариваемых элементов  $t_n$ .

Используя полученные данные, определяем скорость осадки:  $v_{ос} \geq l_{ос}/\Delta t_0 = 100 \div 500$  мм/с. Другими словами, нижние пределы скоростей осадки, применяемые при высокочастотной сварке с оплавлением, могут быть недостаточны при сварке металлов и сплавов, температура плавления окислов которых выше  $T_{пл}$ , и для удаления их в процессе осадки нужно значительно повысить скорость сварки. Таким образом, имеется минимальная критическая скорость сварки  $v_{св,кр}$ , ниже которой нельзя получить качественное сварное соединение. Значения  $v_{св,кр}$  для различных практических случаев приведены в табл. 34 и 36 (гл. IV).

Таблица 12. Температурные характеристики алюминиевых сплавов

Сплав	Интервал плавления, °С		Температура границы жидко-твердого состояния $T_{кр}$ , °С
	Солидус	Ликвидус	
АМГ1	627	652	645
АМГ3	627	652	636
АМГ6	550	620	593
Д16	502	633	—
АМЦ	643	657	—
В95	477	633	582

Таблица 13. Результаты расчета градиента температур  $dT/dx$  и времени осадки  $\Delta t_0$  в зависимости от  $t_n$

$t_n$ , с	$dT/dx$ , °С/мм	$\Delta t_0 \cdot 10^{-3}$ , с
0,03	316	1,54
0,05	248	1,96
0,10	173	2,82

При расчете  $\Delta t_0$  по формуле (24) для сплава Д16 было принято, что  $\delta_p$  равна глубине проникновения в алюминий при 600° С. Примем эти же допущения и при расчете  $dT/dx$ . Предположим теперь, что мы взяли источник питания частотой не 440 кГц, как это сделано в расчете, а 8 кГц. Как следует из формулы (8), глубина проникновения при этом должна увеличиваться в 7,5 раз, соответственно уменьшится  $dT/dx$ , и в конечном итоге существенно увеличится  $\Delta t_0$ . Следовательно, применение частоты звукового диапазона или во всяком случае понижение частоты источника питания должно ощутимо расширить возможности способа. Однако при сварке изделий из ферромагнитного материала толщина оплавленного на свариваемых поверхностях слоя  $\delta_p$  зависит не только от частоты тока, но в значительной степени от времени нагрева и теплопроводности материала. При малых временах  $t_n$  при  $f = 440$  кГц и  $f = 8$  кГц  $\delta_p$  отличаются незначительно. Аналогично при этих частотах будут близки  $dT/dx$ .

На основании сказанного можно сделать второй важный вывод: скорость осадки и критическая скорость при высокочастотной сварке с оплавлением слабо зависят от частоты тока источника питания, т. е. сварка может быть осуществлена в широком диапазоне частот. При сварке на частотах радиодиапазона величины  $v_{св,кр}$  и  $\Delta t_0$  имеют более экстремальный характер, чем при сварке

на частотах звукового диапазона. Как будет показано в гл. III, во всех устройствах для высокочастотной сварки предусмотрено плавное бесконтактное регулирование режима нагрева и оплавления свариваемых элементов. Регулируя величину оплавления свариваемых элементов, одновременно увеличивают или уменьшают  $\delta_p$  и меняют градиент  $dT/dx$ .

Следует обратить внимание на картину распределения тока при осадке свариваемых элементов. Так как измерение тока в реальных условиях представляет значительные технические трудности, во ВНИИТВЧ проводились измерения тока на моделях.<sup>1</sup> В качестве модели использовалась пластина из немагнитной стали, имеющая продольную щель с параллельными кромками ( $\alpha = 0$ ). Толщина пластины была 6 мм, длина нагреваемых кромок — 100 мм.

Пропуская по кромкам пластины ток высокой частоты (440 кГц), получают замыкание тока на участке, находящемся за местом схождения. Этот процесс аналогичен процессу замыкания сварочного тока через участок, нагретый выше температуры магнитных превращений и находящийся в зоне осадки. Контактным сопротивлением между кромками пренебрегали. Такая модель позволяет непосредственно измерять величину токов, замыкающихся через тело пластины. Для этого на участке, по которому должен замыкаться ток, сделаны узкие прямоугольные отверстия с шагом 10 мм. Через эти отверстия вокруг образовавшихся «мостиков» продевается пояска Роговского, с помощью которого определяют ток. Наличие отверстий не изменяет характера распределения тока  $I_{кр}$ . Измеряя ток  $I$  последовательно в каждом «мостике», получают кривую распределения плотности тока вдоль сварного шва (рис. 12).

Из графика видно, что на участке пластины, находящемся между местом схождения кромок и осью сварочных валков, распределение тока крайне неравномерно, причем от 10 до 15% полного тока в свариваемых кромках проходит за местом схождения. Картина моделировалась для симметричной системы. Аналогичная картина распределения тока получена в работе [34]. Для несимметричной системы следует ожидать увеличения процента полного тока за местом схождения кромок по сравнению с симметричной системой.

Исходя из картины распределения тока, можно утверждать, что при высокочастотной сварке с оплавлением осадка происходит под током. Следовательно, условия формирования сварного соединения и удаление расплавленного металла из зоны шва еще более облегчаются и улучшаются. Осадка под током благоприятствует процессам рекристаллизации и образования общих зерен, что повышает пластичность сварного соединения [5]. Это хорошо видно на микроструктуре сварного соединения из малоуглероди-

<sup>1</sup> Работа выполнена инж. В. И. Червинским.



стой стали, приведенной на рис. 13. Ток при осадке достаточен для практически полной перекристаллизации зоны шва. Место сварки выделяется только гратом. Микроструктуры шва, переходной зоны и основного металла идентичны. Стандартные методы испытания не выявили каких-либо различий в пластичности сварного шва и исходного металла.

Рассмотрим второй основной параметр — осадку  $\Delta_{oc}$ . Для симметричной системы она определяется по методу, приведенному в работе [20],

$$\Delta_{oc} = (F_v + F_n)/2d, \quad (25)$$



Рис. 13. Микроструктура сварного соединения из стали 08 ( $\times 300$ ). Толщина свариваемых кромок 0,4 мм,  $v_{св} = 40$  м/мин,  $v_{oc} \approx 700$  мм/с,  $f = 1760$  кГц

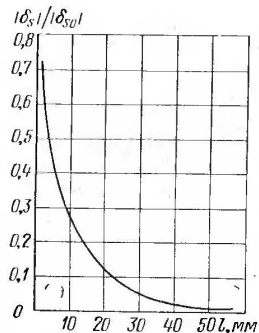


Рис. 12. Изменение тока вдоль сварного шва

где  $F_v$  и  $F_n$  — площади внутреннего и наружного гратов. На рис. 14 показана схема осадки. Измерения величин  $F_v$  и  $F_n$  производились при сварке с нагревом током частотой 440 кГц прямшовных труб из различных материалов с последующим изготовлением микрошлифов. Результаты измерений приведены в табл. 14.

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что значения осадки малы для всех материалов, включая алюминий, его сплавы и медь. Для сравнения на рис. 15 приведена зависимость осадки  $\Delta_{oc}$  от толщины  $2d$  для стальных полос при непрерывной сварке оплавлением [5]. Кривая свидетельствует о том, что при высокочастотной сварке оплавлением осадка на порядок меньше, чем при обычной стыковой сварке оплавлением. Аналогичные данные получены и для цветных сплавов. При стыковой сварке металлов

Таблица 14. Измеренные величины осадки кромок

Размер труб (диаметр $\times$ толщина стенки), мм	Марка материала	Скорость сварки, м/мин	$F_n$	$F_v$	$H_k$	$\Delta_{oc}$
32 $\times$ 2,5	Д16	60	0,56	0,85	1,09	0,57
35 $\times$ 1,0	АМГ2	60	0,15	0,18	0,45	0,36
16 $\times$ 1,0	Д16	60	0,09	0,13	0,38	0,20
22 $\times$ 1,5	Д1	60	0,19	0,26	0,43	0,32
19,5 $\times$ 1,0	АД1	60	0,18	0,20	0,49	0,38
19,5 $\times$ 1,0	М1	60	0,26	0,30	0,52	0,56
16 $\times$ 1,5	Сталь 10	60	0,12	0,14	0,33	0,18
25 $\times$ 1,5	1Х18Н9Т	60	0,32	0,40	0,78	0,48

и сплавов с высокой теплопроводностью оплавление ведется с очень большой скоростью, вследствие чего образуются на свариваемых поверхностях глубокие кратеры [5]. Кроме того, предполагается, что при этом трудно получить на торцах равномерный

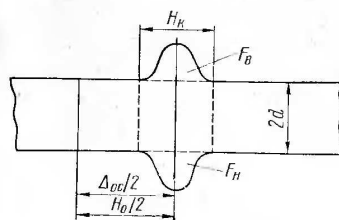


Рис. 14. Схема определения осадки  $\Delta_{oc}$

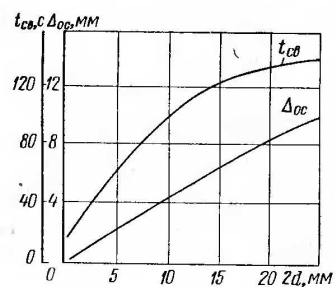


Рис. 15. Зависимость осадки  $\Delta_{oc}$  и времени сварки  $t_{св}$  от толщины свариваемых полос  $2d$

слой жидкого металла, и поэтому необходимо механически разрушить твердые пленки на твердом металле. Все это ведет к большим деформациям, по существу таким же, как при сварке сопротивлением.

Если эту гипотезу применить к рассматриваемому нами процессу и считать, что в результате протекания тока вдоль кромок происходит равномерный монотонный их нагрев и оплавление, то образование кратеров исключено. Это и может служить причиной малой величины  $\Delta_{oc}$ . Однако при высокочастотной сварке с оплавлением возможен неравномерный нагрев свариваемых элементов вследствие возмущений. При исследованиях характера возмущений и их влияния на температурный режим нагреваемых элементов и  $\Delta_{oc}$  установлено, что возмущения связаны с нестабильностью

[13] энергетического режима источника питания, работы механизмов подготовки и осадки свариваемых элементов и качества заготовки.

Наиболее типичными и существенными являются возмущения, обусловленные наличием переменной составляющей на выходе выпрямителя, питающего ламповый генератор, и связанные с этим периодические изменения активной мощности, выделяемой в свариваемых элементах (случай сварки на частотах радиодиапазона).

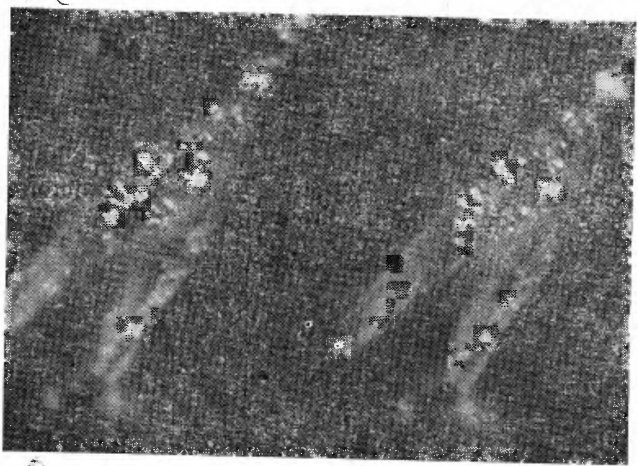


Рис. 16. Кадры скоростной съемки процесса сварки труб из алюминия АД1 (скорость сварки 12 м/мин; скорость съемки 3000 кадров в секунду)

На рис. 16 представлены кадры скоростной съемки процесса сварки труб из технического алюминия АД1 толщиной 1 мм при модуляции мощности с  $f = 150$  Гц. На рис. 17 показан сварной шов, полученный в результате оплавления и осадки при наличии этого возмущения. Отчетливо виден процесс избыточного оплавления с образованием кратера и явно недостаточным оплавлением. Осадка мала для сечения, в котором образовался кратер, но увеличить  $\Delta_{ос}$  нельзя, так как при этом нарушается устойчивость осаживаемых кромок.

Как и при стыковой сварке оплавлением, в рассматриваемом случае зависимости пластических и динамических свойств сварного соединения от осадки имеют экстремальный характер. При недостаточной осадке  $\Delta_{ос}$  в шве могут остаться окислы и даже строчечные непровары (рис. 18). Чрезмерная осадка приводит к искривлению волокон и, как правило, к ухудшению пластич-

ности и снижению ударной вязкости (рис. 19). При сварке несимметричных систем излишне большая осадка приводит к обра-

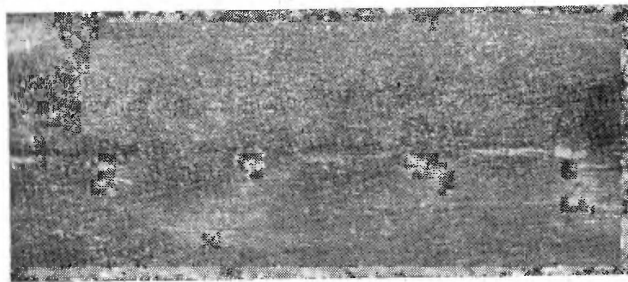


Рис. 17. Сварной шов трубы из алюминия АД1, полученный при пульсации сварочного тока с частотой  $f = 150$  Гц

зованию «подрезов», что резко снижает прочностные и коррозионные характеристики сварного соединения.

Третий параметр, зависящий от предыдущих двух, — давление осадки  $P_{ос}$ . Как известно, с увеличением скорости осадки растет сопротивление деформированию и, как следствие, повышается  $P_{ос}$ . Это явление при высокочастотной сварке с оплавлением алюминиевых сплавов проанализировано в работе [20], в которой предлагается производить оценку средней скорости деформации  $\omega_{ср}$  свариваемых кромок по формуле

$$\omega_{ср} = (1/t_{ос}^*) \ln(H_0/H_k), \quad (26)$$

где  $t_{ос}^*$  — время осадки;  $H_0$ ,  $H_k$  — начальная и конечная ширина зоны деформации кромок (рис. 14).

Рассчитанные по формуле (26) скорости деформации кромок при сварке прямошовных труб из алюминиевых сплавов составляют 100—150 1/с, что превышает

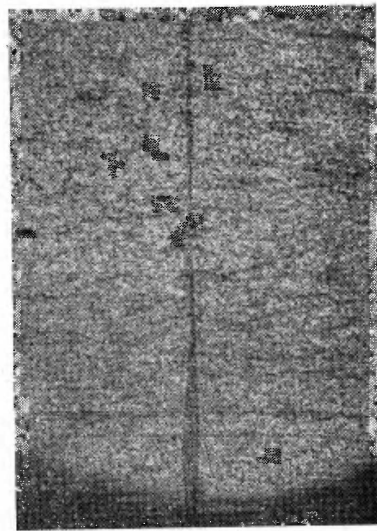


Рис. 18. Микроструктура непровара в сварном шве АД1 ( $\times 100$ )

скорости деформации большинства процессов горячей прокатки. С учетом скоростного фактора предлагается для расчета  $P_{ос}$  при сварке алюминиевых сплавов принимать двукратное его увеличение. В работе [20] также приводятся экспериментальные данные оценки величины  $P_{ос}$ , полученные при сварке прямошовных труб из сплавов алюминия для Д16 — до 25 кгс/мм<sup>2</sup>; для АМГ2 — 15,5 кгс/мм<sup>2</sup>. Средние удельные давления в зоне образования соединения превышают условный предел текучести свариваемого металла в 1,5—2,2 раза.

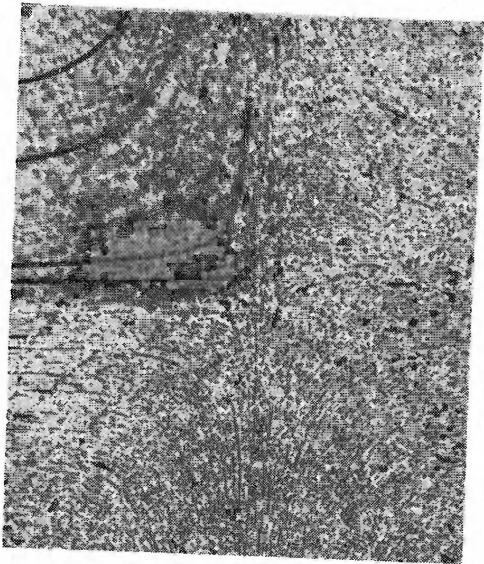


Рис. 19. Искривления волокон при чрезмерной осадке

**Сварка давлением без оплавления.** Известно, что процессы сварки давлением без оплавления при отсутствии восстановительной среды могут обеспечить удовлетворительное качество соединения только в узком интервале температур и при деформациях, достаточных для разрушения окисных пленок. Для малоуглеродистых сталей это условие соответствует интервалу 150—200°С и  $\Delta_{ос} = 1,5 \div 2,0$  мм, а для алюминиевых сплавов — 40—50°С и  $\Delta_{ос} = 1,2 \div 1,4$  мм.

Представим себе два металлических прутка 2, расположенных плотно встык и помещенных в магнитное поле индуктора 1

(рис. 20). Если ширина индуктирующего провода достаточно мала ( $b=10$  мм), то градиент температуры вдоль оси прутков достаточно большой. При этом ширина зоны нагрева и крутизна фронта температурной кривой слабо зависят от частоты тока источника питания. Для процесса формирования шва при осадке такое распределение температурного поля следует считать благоприятным, так как происходит концентрация пластической деформации в узкой зоне и образуется минимальный грат.

Как следует из п. 1, распределение температурного поля по радиусу прутка всегда резко неравномерно. Приемлемый для условий свариваемости температурный перепад может быть достигнут только при достаточно малых сечениях свариваемого изделия, времени нагрева, исчисляемом секундами или десятками секунд, и низкой частоте тока источника питания (рис. 21). Такие условия распределения температурного поля по сечению

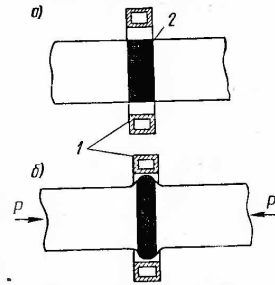


Рис. 20. Схема сварки без оплавления: а — нагрев; б — осадка

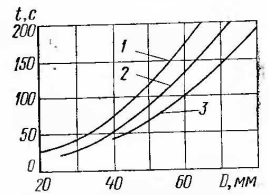


Рис. 21. Время нагрева стали при различных частотах тока источника питания [41]: 1 — 1000 Гц; 2 — 2500 Гц; 3 — 10 000 Гц

свариваемого прутка и условия нагрева в целом следует считать неблагоприятными для процесса сварки. Из рассмотрения схемы нагрева нетрудно сделать вывод, что с наименьшим температурным перепадом по сечению и по образующей может быть нагрето цилиндрическое полое тело с толщиной стенки  $2d \leq \Delta_k$ . Поэтому этот способ имеет ограниченное применение — для стыковой сварки тонкостенных труб.

Очевидно, для достижения узкой зоны нагрева индуктор может быть только одновитковым, но в таком индукторе симметричное поле и, следовательно, симметричное распределение температуры по периметру нагреваемого изделия получить трудно. Кроме того, дополнительную неравномерность температурного поля по периметру вносит разностенность трубной заготовки. Это затрудняет нагрев свариваемых труб в узком температурном интервале. Поэтому указанный способ применяется при стыковой сварке труб из малоуглеродистых сталей. Скорость нагрева не превышает 400 °С/с [6].

Значительные трудности связаны с разрушением и удалением окислов при осадке. Как было сказано ранее, для полного их разрушения необходимо выполнение условия  $\Delta_{oc} = 1,5 \div 2,0$  мм. Оно выполнимо только при больших зазорах в системе индуктор—труба, но при этом уменьшается градиент температурного поля вдоль оси трубы и требуются еще большие деформации. Делались попытки преодолеть эту трудность следующими способами.

1. Повышением температуры нагрева выше температуры плавления FeO (для ее расплавления). При этом хотя и удается полностью удалить расплавленные окислы из зоны сварного соединения, однако происходит рост зерна и образуется видманштеттова структура. Кроме того, происходит частичное оплавление границ зерен, а при кристаллизации появляются осадочные рыхлоты.

2. Применением газовой защиты или флюсов. Удастся при нагреве до  $T = 1200 \div 1250^\circ\text{C}$  получить качественное сварное соединение и удовлетворительную микроструктуру околошовной зоны. Защитная среда должна быть восстановительной. Жесткие пределы температурного режима сварки и необходимость применения защитной среды ограничивают применение этого способа.

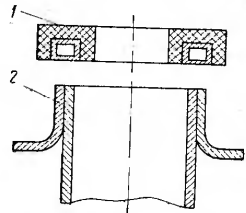


Рис. 22. Схема сварки плавлением

**Сварка плавлением.** Изделия, подлежащие сварке, плотно прилегают друг к другу отбортованными кромками 2, которые разогреваются и оплавляются с помощью индуктора 1, выполненного по контуру свариваемых кромок (рис. 22). По всему периметру изделия создается ванна расплавленного металла, кристаллизация которой происходит без приложения давления<sup>1</sup>.

Этот процесс применим для сварки изделий с толщиной стенки от 0,3 до 1,5 мм из малоуглеродистых сталей, сталей аустенитного класса, сплавов титана, а также комбинаций из разнородных металлов и сплавов. Частота тока источника питания выбрана 70 и 440 кГц. Скорость нагрева 250—8000 °C/с. Во всех случаях рекомендуется применение защитных сред. Возможна сварка изделий цилиндрической, овальной и прямоугольной форм с максимальной длиной сварного шва 500 мм. Наиболее целесообразно применение процесса в случаях, когда в непосредственной близости от шва находятся элементы из нетеплостойких материалов, а также для массового, автоматизированного производства однотипных деталей.

Важное значение для рассмотренных вариантов имеют условия свариваемости. Наиболее актуальны они при сварке углеродистых и легированных сталей.

**Свариваемость сталей.** Как следует из сказанного, общим и характерным для процессов является ярко выраженная локальность нагрева в сочетании с высокими скоростями сварки. Ширина зоны термического влияния в области сварного соединения, как правило, колеблется в пределах 1,0—5,0 мм. Температурные градиенты в зоне шва достигают 1000 °C/мм, что обуславливает мощный тепловой поток от нагретых участков к холодным и, следовательно, высокие скорости охлаждения шва и околошовной зоны. Проведенные расчеты и эксперименты показывают, что при сварке малоуглеродистой стали средняя скорость охлаждения в интервале температур 1000—500 °C на границе слоя, нагретого на глубину 1 мм, составляет около 1500 °C/с, на 2 мм — 400 °C/с и на 3 мм — порядка 170 °C/с.

Очевидно, для многих марок сталей, в том числе и малоуглеродистых, эти скорости будут выше критических и, как следствие этого, в зоне сварного соединения будут образовываться хрупкие структурные составляющие (мартенсит, троостит). Напомним, что мартенситное превращение происходит лишь тогда, когда сталь охлаждается со скоростью не ниже некоторой критической, величина которой зависит от химического состава стали. Если скорость охлаждения ниже критической, происходит превращение, при котором образуется двухфазная смесь феррита с карбидом железа—игольчатый троостит или феррито-перлитная смесь. Температура, при которой в процессе охлаждения начинается мартенситное превращение, считается мартенситной точкой, положение которой изменяется в зависимости от содержания в стали углерода и не зависит от скорости охлаждения.

На положение мартенситной точки существенное влияние оказывает содержание кремния, марганца и других растворимых в аустените примесей. У сталей обычного приготовления критическая скорость значительно ниже, чем у сталей повышенной чистоты. Считается, что при охлаждении в принятых средах в сталях с содержанием углерода до 0,1% мартенсит вообще не может быть получен, так как критическая скорость закалки велика. При сварке давлением, когда скорости охлаждения соответствуют приведенным выше, в сталях с содержанием углерода 0,1—0,2% в околошовной зоне всегда образуются участки мартенсита или троосто-мартенсита (рис. 23, а), а в среднеуглеродистых сталях — игольчатый феррит и мартенсит (рис. 23, б). Шов — хрупкий, при этом всегда возможно образование холодных трещин непосредственно после осадки. Поэтому сортамент свариваемых сталей ограничен верхним пределом содержания углерода (оно колеблется от 0,18 до 0,27% С). Если наличие хрупких составляющих в сварном соединении недопустимо, проводится последующая закалка (локальная или объемная), обеспечивающая распад закалочных структур на феррито-перлитную смесь.

В процессе сварки сталей с большим содержанием углерода необходимо замедлить теплоотвод из зоны шва. В табл. 15

<sup>1</sup> Процесс разработан во ВНИИЭСО под руководством Б. В. Журавлева и В. А. Пейсаховича.

Таблица 15. Структурные составляющие стали марок 45 и 40X при различных скоростях охлаждения

Сталь	Скорость охлаждения в интервале 500—700° С, °С/с	Структурные составляющие, %					
		Феррит		Перлит и промежуточные структуры		Мартенсит	
45	4	5	10	95	90	0	0
	18	1	3	9	70	90	27
	30	1	1	7	30	92	69
	60	0	0	2	2	98	98
40X	4	1	0	24	5	75	95
	14	0	0	10	2	90	98
	22	0	0	5	0	95	100

Примечание. Структурные составляющие приведены по результатам работ различных авторов.

приведены скорости охлаждения для сталей марок 45 и 40X в температурном интервале 500—700° С. Из таблицы видно, что в стали 45 при скорости охлаждения 4 °С/с мартенсит не обнаруживается.

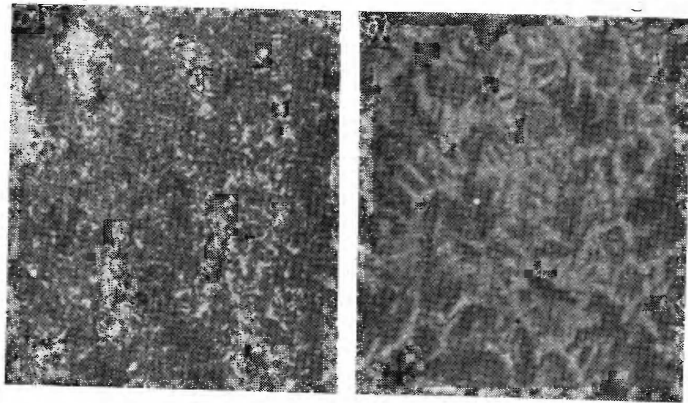


Рис. 23. Микроструктура околошовной зоны сварного соединения (× 150): а — из стали с С = 0,12%; б — из стали 45 с С = 0,48%

Посмотрим далее, как наиболее рационально обеспечить нужную скорость охлаждения. Для исследуемого случая расчетным путем определены скорости охлаждения зоны сварного соединения при частотах тока источника питания 440, 10 и 440 кГц

с предварительным локальным подогревом свариваемых элементов током частотой 10 кГц до 900° С. Из табл. 16 видно, что во всех трех вариантах скорость охлаждения зоны сварного шва

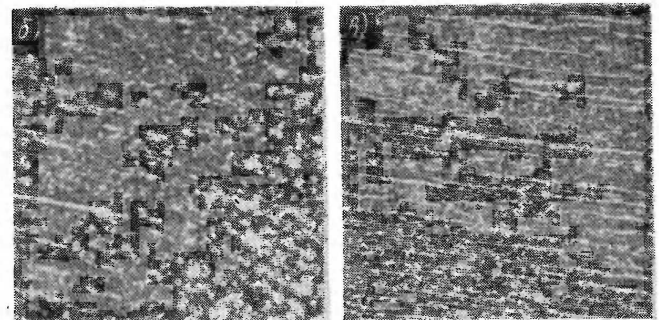
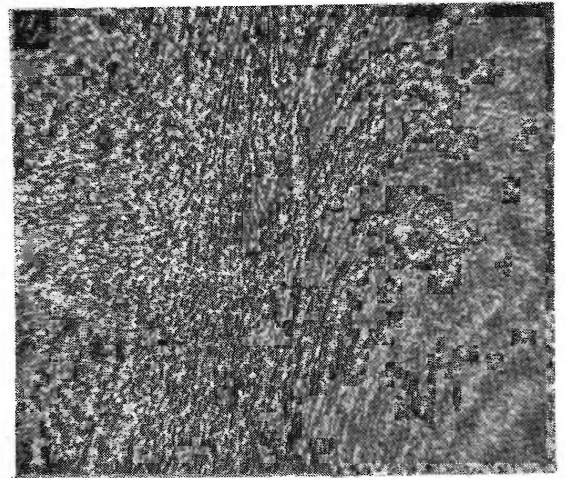


Рис. 24. Микроструктуры шва (а), околошовной зоны (б) и исходного металла (в) стали 45 после сварки с предварительным подогревом (× 100)

намного превышает критическую. При увеличении времени нагрева (снижении скорости сварки до пределов ниже  $v_{св.кр}$ ) скорость охлаждения остается выше критической. Поэтому для сварки среднеуглеродистых сталей может быть рекомендован

предварительный подогрев<sup>1</sup> свариваемой заготовки до температуры ниже  $A_{c1}$ .

В зависимости от марки стали, геометрии свариваемых изделий и скорости сварки расчетным путем может быть определена оптимальная температура подогрева стали [31, 42]. Например, при сварке прямошовных труб малого диаметра из наиболее распространенных марок среднеуглеродистых сталей температура предварительного подогрева должна быть  $420-680^\circ\text{C}$  [31]. Этот диапазон подтверждается экспериментальными данными. На рис. 24 приведены микроструктуры исходной заготовки и сварного соединения, полученного при сварке прямошовной трубы диаметром 89 мм с толщиной стенки 3 мм на частоте 440 кГц с предварительным подогревом до  $T = 630^\circ\text{C}$ . При этом не только получена равновесная феррито-перлитная смесь в сварном соединении, но и достигнуто вы-

Таблица 16. Скорость охлаждения стали в интервале  $500-700^\circ\text{C}$  при различных вариантах нагрева

Частота тока источника питания, кГц	Время нагрева, с	Скорость охлаждения в интервале $500-700^\circ\text{C}$ , $^\circ\text{C}/\text{с}$
440	0,1	1500—1800
	1,0	160—200
10	0,1	200—250
	1,0	55—60
440 и 10 (предварительный подогрев до $900^\circ\text{C}$ )	0,1	300—350
	1,0	250—300

равнивание твердости по его ширине до уровня твердости исходной заготовки.

С учетом особенностей протекания токов высокой частоты, а также механизма процесса сварки разработаны способы передачи энергии к свариваемым кромкам. Они в значительной степени определяют работоспособность и надежность высокочастотного оборудования и расход электроэнергии, затрачиваемой для осуществления процесса сварки.

### Б. Способы передачи энергии к свариваемым кромкам

Известны два способа передачи энергии к свариваемым кромкам: контактный и индукционный. Каждый способ имеет ряд особенностей, которые необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации сварочных устройств.

**Контактный способ.** При этом способе (рис. 25, а) на расстоянии 30—200 мм от места схождения свариваемых кромок

<sup>1</sup> Технология процесса и устройства для сварки труб разработаны коллективами ВНИИТВЧ, ВНИИметмаша, УралНИТИ и ленинградского завода «Трубо-сталь».

на них накладываются контакты, которые при движении трубной заготовки скользят по ее поверхности. Контакты могут касаться кромок сверху или снизу. В случаях, когда требования к равномерности нагрева кромок по высоте особенно высоки, контакты могут накладываться непосредственно на свариваемые поверхности в зазоре между кромками. Наиболее простой и надежной получается конструкция сварочного устройства, если контакты накладываются на кромки сверху. Этот вариант и получил наибольшее распространение.

Контакты могут быть установлены на разных расстояниях от места схождения кромок. Это важно при сварке изделий из несимметричных элементов. К контактам подводится ток высокой

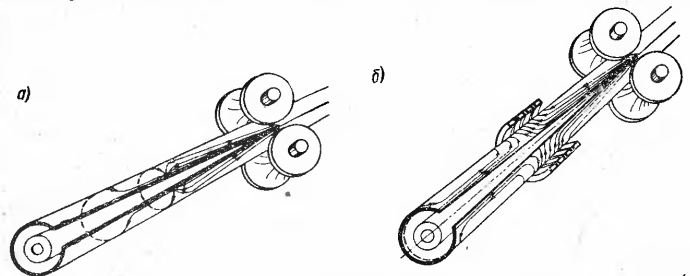


Рис. 25. Принципиальная схема высокочастотной сварки труб с контактными (а) и индукционными (б) способами подвода тока

частоты. Вследствие поверхностного эффекта ток течет в тонком слое по поверхности заготовки. Линии тока при контактном подводе к кромкам трубной заготовки показаны на рис. 25, а. Вследствие эффекта близости наибольшая часть тока течет вдоль кромок и замыкается в месте их схождения. Кроме того, часть тока течет вдоль кромок в сторону, противоположную от места их схождения, и замыкается по периметру внутри трубной заготовки. Этот ток можно уменьшить, если внутри трубной заготовки расположить магнитопровод из материала с большой магнитной проницаемостью [2, 6, 7, 11]. Кроме внутреннего магнитопровода, целесообразно устанавливать наружный магнитопровод вблизи свариваемых кромок. Длина внутреннего и наружного магнитопроводов определяется расстоянием от контактов до места схождения кромок и должна быть примерно в три—шесть раз больше этого расстояния.

К недостаткам этого способа следует отнести наличие контактов. Контактные наконечники, участвующие в передаче тока к кромкам, работают в весьма напряженных условиях. Средняя плотность тока на контактных наконечниках равна  $20-70\text{ A}/\text{мм}^2$ . Однако учитывая, что наконечники могут касаться кромок трубной заготовки в одной точке, которая под действием усилия

поджатия контактов к кромкам, равного 20—100 кгс, превращается в контактное пятно площадью 1—4 мм<sup>2</sup>, плотность тока в контактном пятне достигает 150—1500 А/мм<sup>2</sup>. В процессе сварки под контактами может образоваться расплавленный металл. В этом случае наряду с контактным пятном, образуемым твердым металлом, между контактом и кромкой имеется несколько перемычек из жидкого металла. Как только ток устремляется в эти перемычки, они взрываются. Вместо исчезнувших могут образовываться новые перемычки. Не исключена возможность, что в отдельные моменты электроэнергии к кромкам передается через электрическую дугу.

Контакты должны быть изготовлены из материала, обладающего высокими электро- и теплопроводностью, значительной температурой плавления, достаточной механической прочностью и хорошей стойкостью при возникновении дуги. Контактные наконечники изготавливают, как правило, из вольфрама, его сплавов и бронзы. Обычно контакты выдерживают сварку на длине 20—50 км сварного шва при использовании холоднокатаных заготовок и 1—7 км при использовании горячекатаных.

Вместо скользящих контактов могут быть использованы контактные ролики, катящиеся по кромкам. Усилие поджатия контактных роликов к кромкам может быть значительным (1—3 тс) и переходное сопротивление при использовании роликов уменьшается. Кроме того, ролики можно использовать с помощью резцов. Срок службы контактных роликов в установке мощностью 400 кВт при частоте 440 кГц и токе до 3500 А достигает одного месяца. Заточка контактных поверхностей производится один раз в смену.

Контактный подвод тока применяется при частотах радиодиапазона (более 60 кГц). Однако он применим и при частоте 8—10 кГц, но первые попытки использования контактных роликов показали, что основным препятствием является наличие разогретой окислы на контактные поверхности роликов. Это приводит к ухудшению электрического контакта между роликами и кромками, разогреву контактных поверхностей и даже вырыву металла кромки.

**Индукционный способ.** При индукционном способе на расстоянии 30—300 мм от места схождения кромок устанавливается кольцевой индуктор, охватывающий трубную заготовку (рис. 25, б). Под действием поля индуктора в поверхностном слое заготовки наводится ток. Вследствие эффекта близости наибольшая часть индуктируемого тока течет вдоль кромок и замыкается в месте их схождения (полезный ток). Другая часть тока замыкается по периметру внутри трубной заготовки (бесполезный ток). Как и при контактном способе подвода тока, для уменьшения бесполезного тока применяют внутренние и наружные магнитопроводы. Длина магнитопроводов при индукционном способе должна быть на длину индуктора больше, чем при контактном.

Расход электроэнергии, необходимой для сварки, существенно зависит от расстояния между индуктором или контактами и местом схождения кромок. При увеличении этого расстояния увеличиваются время нагрева и, следовательно, потери мощности за счет теплопередачи от нагретых кромок в соседние слои металла. Это приводит к снижению скорости сварки. При индукционном способе подвода тока расход электроэнергии несколько выше, чем при контактном, так как наряду с кромками нагревается тело трубной заготовки под индуктором.

Коэффициент использования энергии — отношение энергии, затрачиваемой на разогрев только свариваемых кромок, ко всей энергии, поглощаемой заготовкой, — уменьшается с увеличением ее диаметра, поскольку увеличиваются потери в теле заготовки, в то время как мощность для разогрева кромок остается практически постоянной.

При сварке труб из ферромагнитного материала коэффициент использования энергии ниже, так как под индуктором находится материал при температуре ниже температуры магнитных превращений, и потери в теле трубной заготовки возрастают, а мощность, выделяющаяся в разогретые кромки, возрастает незначительно.

Достоинством индукционного способа является исключительная простота и надежность индукторов.

## Глава II.

### РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОНДУКТОРА И ИНДУКТОРА

Для выбора мощности высокочастотного оборудования и элементов сварочного устройства нужно производить расчет активного и индуктивного сопротивлений кондуктора и индуктора, а также мощности, требуемой для разогрева кромок до сварочной температуры. Необходим также расчет параметров свариваемых кромок.

Методика расчета параметров кромок для идеализированного случая, когда зазор между кромками или магнитопроводами и кромками весьма мал по сравнению с толщиной кромок, приведена в работе [6]. Рассчитанные по этой методике активное и индуктивное сопротивления значительно выше экспериментальных, а мощность, необходимая для сварки, значительно ниже, чем на практике.

В другой работе [33] для расчетов электрических параметров кромок предлагается метод расчета сопротивлений проводников в прямоугольном пазу магнитопровода [22]. Этот метод основан на том, что все пространство между двумя магнитопроводами, за исключением зазора между кромками, заполняется условным материалом с удельной электропроводностью  $\gamma_{\phi} = \gamma d / (2d + 2b)$ ,

где  $2d$  — толщина кромок;  $b$  — зазор между магнитопроводом и кромками. При этом допущении для расчетов используются формулы, предложенные в работе [6]. Данный метод применим, если глубина проникновения тока весьма велика, а зазор между магнитопроводами и кромками очень мал по сравнению с толщиной кромок.

Несколько позже предложена третья методика, основанная на экспериментальных данных [34]. На моделях кромок по методике [21] исследовано распределение плотности тока на поверхностях кромок. Используя метод зеркального отражения, определили также распределение плотности тока в середине кромок. Было получено примерно одинаковое распределение тока на поверхности и в середине кромок, на основании чего авторы [34] сделали вывод о равномерном распределении тока по толщине кромок. По мнению авторов настоящей книги, результаты эксперимента могут быть объяснены не равномерным по толщине кромок распределением тока, а наличием зазора между магнитопроводом и кромками, в котором размещались датчики плотности тока.

Если же предположить, что допущение о равномерном распределении тока по толщине кромок не приводит к большим ошибкам для  $0,5\Delta \leq 2d \leq 2\Delta$ , то предложенная методика может быть использована для расчета параметров кромок из немагнитного материала толщиной 3—12 мм при частоте тока 8—10 кГц и 0,4—1,5 мм — при частоте 440 кГц. При производстве труб из ферромагнитного материала даже для частот, определяемых соотношением  $0,5\Delta \leq 2d \leq 2\Delta$ , эта методика неприменима, так как составлена на основании экспериментов с моделями из немагнитного материала.

По нашему мнению, более универсален метод расчета параметров свариваемых кромок, приведенный в п. 6 данной книги, основанный на расчете распределения поверхностной плотности тока методом конформных отображений. Изучалось распределение тока на кромках при следующих допущениях:

- 1) длина кромок весьма велика по сравнению с толщиной кромок и зазором между ними;
- 2) расчетный зазор между кромками  $2h$  постоянен по всей их длине;
- 3) свойства материала постоянны во всем исследуемом объеме;
- 4) магнитная проницаемость  $\mu$  магнитопроводов весьма велика;
- 5) диаметр трубной заготовки весьма велик по сравнению с толщиной кромок и зазором между ними ( $D \gg 2d$ ,  $D \gg 2h$ );
- 6) глубина проникновения тока  $\Delta$  в материал весьма мала по сравнению с толщиной кромок  $2d$  и поверхностный эффект ярко выражен.

Принятые допущения не должны приводить к большим ошибкам, потому что, во-первых, при расчете электрических парамет-

ров длина сходящихся под углом кромок разбивается на участки, которые настолько малы, что зазор по всему участку можно считать постоянным (второе допущение). Во-вторых, как показали эксперименты, полученные при третьем допущении распределения поверхностной плотности тока идентичны распределениям тока на кромках из ферромагнитных материалов, у которых свариваемые поверхности на глубину  $\Delta_k$  нагреты до температуры выше температуры магнитных превращений.

Пятое допущение ( $D \gg \gg 2d$ ,  $D \gg 2h$ ) позволяет пренебречь кривизной кромок. Если мысленно разрезать трубную заготовку по линии, диаметрально противоположной свариваемому шву, и развернуть ее, можно получить две шины шириной  $\pi D/2$ . Затем, увеличивая ширину шин до бесконечности, можно для этого случая провести расчет распределения тока. По распределению тока рассчитываются электрические параметры кромок при допущении, что ток течет по полосе шириной  $\pi D/2$  и за пределами этой полосы равен нулю. Плоские системы, к которым в результате допущений приводятся свариваемые кромки, представлены на рис. 26.

Шестое допущение ( $2d \gg \Delta$ ), как показывают эксперименты [10, 11], при отношении толщины кромок к глубине проникновения тока  $2d/\Delta \geq 5$  также не приводит к погрешностям, превышающим 20%.

При принятых допущениях расчет распределения тока на кромках можно провести методом конформных отображений, так как при ярко выраженном поверхностном эффекте отсутствует нормальная к поверхности проводника составляющая магнитного поля и контур проводника сливается с силовой линией. При этом весь ток распределен по его наружной поверхности и внутри проводника поля нет. В магнитопроводах магнитное поле также равно нулю из-за бесконечно большой магнитной проницаемости. Следовательно, поле существует только во внешнем пространстве,

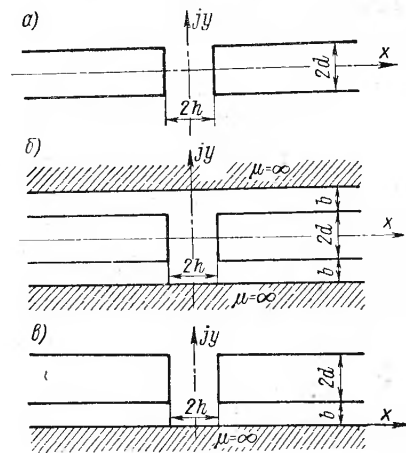


Рис. 26. Плоские системы, к которым приводятся свариваемые кромки: а — без магнитопроводов; б — с двумя магнитопроводами, расположенными внутри и снаружи трубной заготовки; в — с одним магнитопроводом, расположенным внутри трубной заготовки



т. е. существует только «внешняя» задача. Таким образом, задача электродинамики сведена к краевой задаче.  
 Численный метод расчета распределения тока для плоских кромок  $[D/(2d) > 30]$  без магнитопроводов с учетом реальной глубины проникновения тока в материал кромок рассмотрен в п. 7. При этом реальные кромки заменены системой изолированных электрически и связанных магнитным полем контуров.

**6. Расчет распределения поверхностной плотности тока на свариваемых кромках при ярко выраженном поверхностном эффекте**

Расчет проводился для реального случая, когда кромки имеют скругления, и для идеализированного случая при допущении, что радиус скругления равен нулю. Радиус скругления кромок определяется толщиной свариваемых кромок, механическими свойствами материала, а также конструкцией механизмов стана и лежит, как показывают измерения [16], в пределах 0,05—2,5 мм.

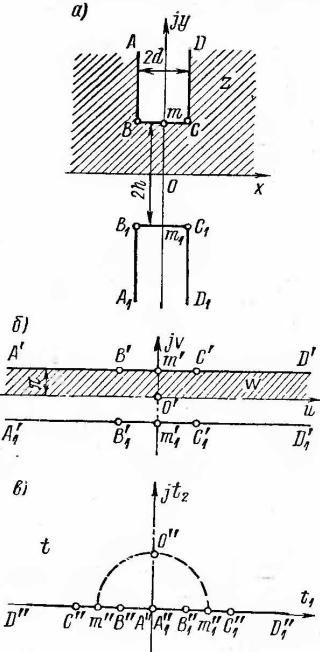


Рис. 27. Конформное отображение плоской системы, показанной на рис. 26, а, в областях z, w и t

Произведем расчет для трех вариантов сварки (рис. 26): без магнитопроводов, с двумя магнитопроводами и одним магнитопроводом. Для реальных кромок, имеющих конечный радиус скругления углов, рассмотрен только вариант сварки без использования магнитопроводов.

**Кромки с острыми углами без магнитопроводов.** Исследуемое внешнее электромагнитное поле в области z (заштрихованная часть рис. 27, а) отображается на полосу шириной  $\pi$  в области w (рис. 27, б) и на верхнюю полуплоскость t (рис. 27, в) с помощью функций [1, 10]:

$$z = x + jy = \frac{2jA}{k} \int_{j\sqrt{1/k}}^t \frac{\sqrt{(1-t^2)(1-k^2t^2)}}{t^2} dt; \quad (27)$$

$$e^w = -kt^2,$$

где k и A — параметры, зависящие от толщины кромок 2d и зазора между ними 2h, т. е. от h/d; t — параметр, зависящий от положения исследуемой точки на поверхности кромок.

При этом преобразовании точки A, B, C, D, A<sub>1</sub>, B<sub>1</sub>, C<sub>1</sub>, D<sub>1</sub> и m в области z отображаются точками A', B', C', D', A<sub>1</sub>', B<sub>1</sub>'

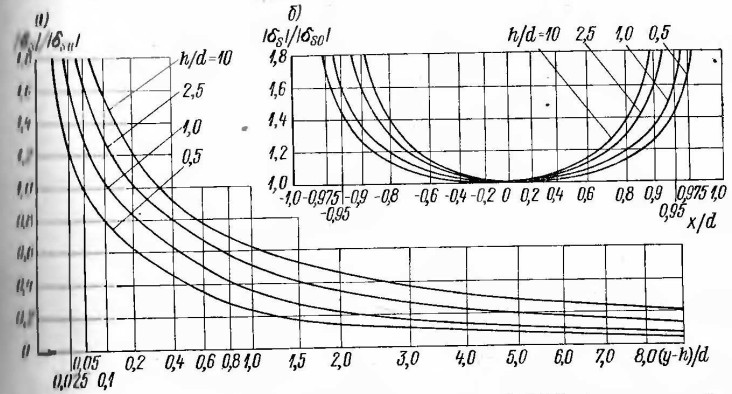


Рис. 28. Распределение поверхностной плотности тока  $|\delta_s|/|\delta_{s0}|$  на кромках без магнитопровода при различных h/d: а — на боковых поверхностях кромок AB, DC и A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>, C<sub>1</sub>D<sub>1</sub>; б — на свариваемых поверхностях BC и B<sub>1</sub>C<sub>1</sub>

C<sub>1</sub>, D<sub>1</sub> и m' в области w и A'', B'', C'', D'', A<sub>1</sub>'', B<sub>1</sub>'', C<sub>1</sub>'', D<sub>1</sub>' и m'' в области t.

Тогда поверхностная плотность тока на кромках  $|\delta_s|$  будет

$$|\delta_s| = |\delta_{s0}| \left| \frac{(1-k)t}{\sqrt{(1-t^2)(1-k^2t^2)}} \right|, \quad (28)$$

где  $|\delta_{s0}|$  — модуль поверхностной плотности тока в точке m (рис. 27, а). Ввиду того, что интеграл (27) не может быть выражен аналитическими функциями, зависимость  $|\delta_s| = f(z)$  получена в неявном виде.

На рис. 28 приведены распределения поверхностной плотности тока на кромках для различных h/d, рассчитанные по формулам (27) и (28).

**Кромки с острыми углами и двумя магнитопроводами.** Исследуемая область внешнего поля (заштрихованная часть области z

на рис. 29, а) отображается на верхнюю полуоскость (область  $t$  на рис. 29, б) и затем на внутреннюю часть прямоугольника в области  $w$  (рис. 29, в) с помощью функций [11]:

$$\left. \begin{aligned} z &= \frac{Cn}{k} \int_0^t \sqrt{\frac{1-k^2t^2}{1-t^2} \frac{dt}{1-nt^2}}; \\ w &= \int_0^t \frac{dt}{\sqrt{(1-t^2)(1-k^2t^2)}}, \end{aligned} \right\} (29)$$

где  $k$ ,  $n$  и  $C$  — параметры, зависящие от  $h$ ,  $d$  и  $b$  ( $b$  — зазор между магнитопроводами и кромками).

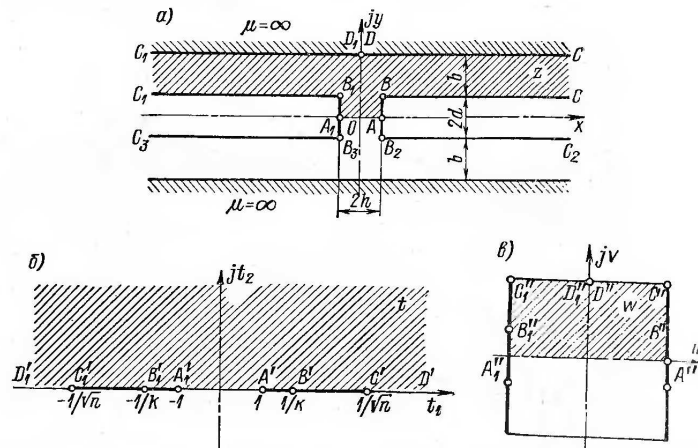


Рис. 29. Конформное отображение плоской системы, показанной на рис. 26, б, в областях  $z$ ,  $t$  и  $w$

Точки  $A, B, C, D, A_1, B_1, C_1, D_1$  в области  $t$  (рис. 29, б) обозначены теми же буквами с одним штрихом, а в области  $w$  (рис. 29, в) — с двумя штрихами.

Проведя соответствующие преобразования, получим выражение для поверхностной плотности тока на кромках

$$|\delta_S| = |\delta_{S0}| \sqrt{\frac{1-k^2}{1-n}} \sqrt{\frac{1-nt^2}{1-k^2t^2}}. \quad (30)$$

Модуль поверхностной плотности тока  $|\delta_{S0}|$  взят для точки  $A$  (рис. 29, а).

На рис. 30 приведены графики распределения поверхностной плотности тока на свариваемых поверхностях  $BB_2, B_1B_3$  (справа)

и боковых поверхностях  $BC, B_1C_1, B_2C_2$  и  $B_3C_3$  (слева) кромок для различных  $h/d$  и  $b/d$ , рассчитанные по формулам (29) и (30). Распределения токов на свариваемых поверхностях для значений  $b/d$ , равных от 1 до  $\infty$ , весьма близки, а на боковых поверхностях отличаются существенно.

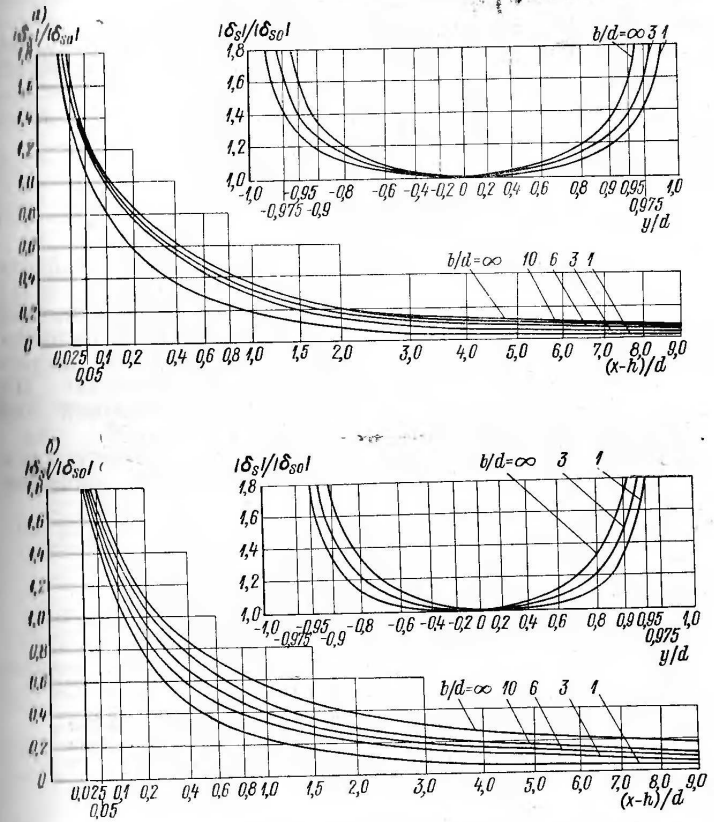


Рис. 30. Распределение поверхностной плотности тока на свариваемых поверхностях с двумя магнитопроводами при различных значениях  $b/d$ : а —  $h/d = 1,0$ ; б —  $h/d = 5,0$

Кромки с острыми углами и одним магнитопроводом. Исследуемая область внешнего поля в области  $z$  (рис. 31, а) отображается

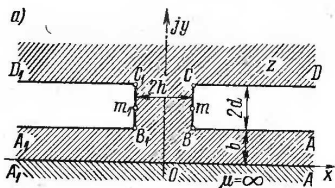
на верхнюю полуплоскость в области  $t$  (рис. 31, б), а затем на полосу шириной  $\pi$  в области  $\omega$  (рис. 31, в) с помощью функций:

$$\left. \begin{aligned} z &= \frac{Bn}{k} \int_0^t \frac{\sqrt{(1-t^2)(1-k^2t^2)}}{1-nt^2} dt; \\ t &= -(1/\sqrt{n}) \sin j\omega = -(j/\sqrt{n}) \operatorname{sh} \omega, \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

где  $k$ ,  $n$  и  $B$  — параметры, зависящие от  $h$ ,  $d$  и  $b$  (рис. 31, а). Поверхностная плотность тока на кромках определяется из выражения

$$|\delta_S| = |\delta_{S0}| \sqrt{\frac{(1-t_0^2)(1-k^2t_0^2)}{1-nt_0^2}} \times \left| \sqrt{\frac{1-nt^2}{(1-t^2)(1-k^2t^2)}} \right|, \quad (32)$$

где  $|\delta_{S0}|$  — модуль поверхностной плотности тока, взятый для точки  $m$  (для этой точки  $t = t_0$ ).



Рассчитанные по формулам (31) и (32) графики распределения поверхностной плотности тока на кромках для  $h/d = 1,0$  и различных  $b/d$  приведены на рис. 32.

При сварке толстостенных труб ( $D/(2d) < 30$ ) кривизна

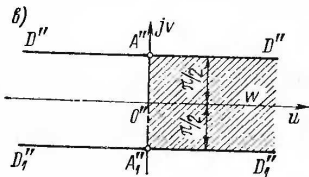
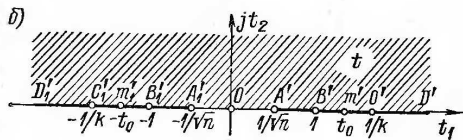


Рис. 31. Конформное отображение плоской системы, показанной на рис. 26, в, в областях  $z$ ,  $t$  и  $\omega$

трубной заготовки оказывает существенное влияние на распределение поверхностной плотности тока на кромках и их электрические параметры.

Кромки трубной заготовки реальной кривизны с острыми углами. При высокочастотной сварке толстостенных труб ( $D/(2d) < 30$ ) за счет эффекта близости плотность тока, идущего

вдоль свариваемых кромок по внутренней поверхности заготовки, несколько выше, чем на наружной. При этом пятое допущение в весьма малой кривизне трубной заготовки не может быть принято. Поэтому был выполнен расчет поверхностной плотности тока на свариваемых кромках с учетом кривизны трубной заготовки для случаев, когда используются один или два магнитопровода<sup>1</sup>. При расчете систем с двумя магнитопроводами все допущения, принятые ранее для расчета параметров кромок, кроме пятого, сохраняются. Дополнительно принимаем, что на линиях  $B_1C_1$  и  $M_1F_1$  (рис. 33, а) скалярный магнитный потенциал постоянен. Решение проведено методом конформных отображений для зон I, II и III (рис. 33) отдельно.

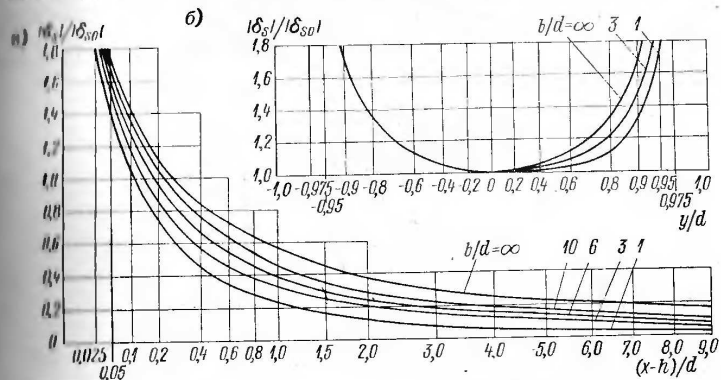


Рис. 32. Распределение поверхностной плотности тока  $|\delta_S|/|\delta_{S0}|$  на кромках в одном магнитопроводе при различных значениях  $b/d$  и  $h/d = 1,0$  для поверхностей: а — свариваемых; б — боковых

Исследуемое поле для зоны I в области  $z$  (рис. 33, б) отображается в пространство между двумя концентрическими окружностями в области  $\omega$  (рис. 33, в), затем на внутренность прямоугольника в области  $\gamma$  (рис. 33, г) с помощью функций:

$$\omega = \omega_1 + j\omega_2 = \rho e^{j\theta} = \frac{A+1}{A-1} \frac{z - \xi_{10}}{z - \xi_{20}}; \quad (33)$$

$$\gamma = \gamma_1 + j\gamma_2 = \ln \omega = \ln \rho + j\theta. \quad (34)$$

Внутри прямоугольника  $A_3E_3D_3B_3$  (рис. 33, г) поле неравномерно (скалярный магнитный потенциал постоянен на линиях  $B_3C_3$  и  $A_3E_3$ ), поэтому воспользуемся еще двумя функциями, отобра-

<sup>1</sup> См.: Червинский В. И. Расчет активного сопротивления кромок трубной заготовки при высокочастотной сварке с учетом кривизны труб. — Изв. ВПИ, 1976, № 203, с. 48—53.

жающими внутренность прямоугольника в области  $\gamma$  (рис. 33, а) на верхнюю полуплоскость в области  $t = t_1 + jt_2$  (рис. 33, б) и затем на внутренность прямоугольника в области  $w = u + jv$

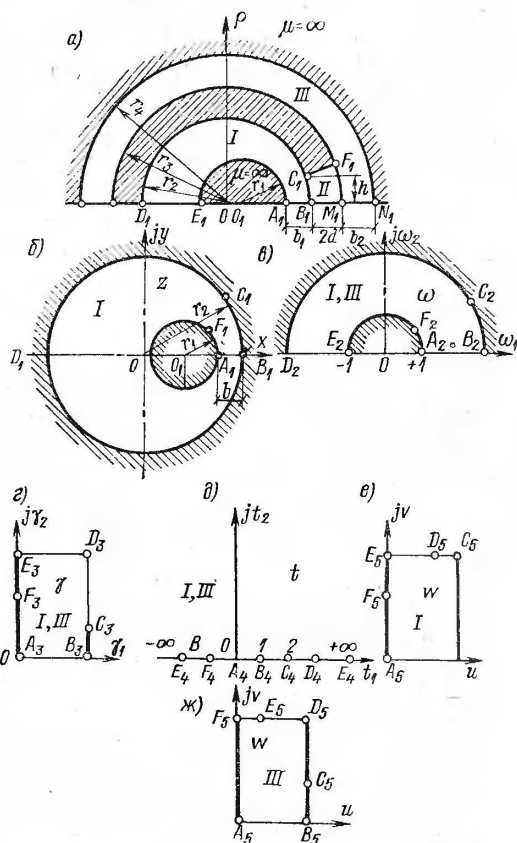


Рис. 33. Конформное отображение плоской системы, показанной на рис. 26, б, для зон I и III в областях  $z$ ,  $\omega$ ,  $\gamma$ ,  $t$ ,  $w$

(рис. 33, е), где  $w$  — комплексная функция,  $u$  — скалярный магнитный потенциал, а  $v$  — функция магнитного потока:

$$\gamma = \ln \rho F(\sqrt{t}, k)/K(k); \quad (35)$$

$$w = u + jv = u_1 F(\sqrt{t}, \sqrt{1/\alpha})/K(\sqrt{1/\alpha}). \quad (36)$$

В выражениях (33)—(36)  $A$ ,  $\xi_{10}$ ,  $\xi_{20}$ ,  $k$ ,  $\alpha$  — параметры, зависящие от геометрических соотношений исследуемой системы;  $I$  и  $K$  — полный и полный эллиптические интегралы первого рода;  $u_1$  — разность скалярных магнитных потенциалов на линиях  $A_1E_1$  и  $B_1C_1$ .

Для отображения исследуемого поля зоны III на внутренность прямоугольника  $A_5F_5D_5B_5$  (рис. 33, ж) используются функции (34)—(36). Задача определения комплексной потенциальной функции для зоны II (рис. 33, а) является частным случаем задачи для плоских кромок с острыми углами без магнитопровода, которая решена с помощью функции (27).

Используя выражения (33)—(36), получаем распределение плотности тока на поверхностях кромок:

внутренней (зона I)

$$|\delta_S| = |\delta_{S0}| \times \frac{hn' \sqrt{\alpha} \sqrt{tk_I^2 - 1} K(k_I) \operatorname{arch}\left(\frac{2}{n^2} - 1\right)}{2\pi r_2 n^2 \sqrt{t - \alpha} F\left(\sqrt{\frac{1-1/t}{k_I}}; k_I\right) K\left(\sqrt{\frac{1}{\alpha}}\right) E(n)} \quad (37)$$

и внешней (зона III)

$$|\delta_S| = |\delta_{S0}| \times \frac{hn' \sqrt{\beta} \sqrt{tk_{III}^2 + 1} K(k_{III}) \operatorname{arch}\left(\frac{2}{n^2} - 1\right)}{2\pi r_3 n^2 \sqrt{t + \beta} F\left(\sqrt{\frac{1+1/t}{k_{III}}}; k_{III}\right) K\left(\sqrt{\frac{1}{\beta}}\right) E(n)}, \quad (38)$$

где  $n$ ,  $n'$ ,  $k_I$ ,  $k_{III}$ ,  $k'_I$ ,  $k'_{III}$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  — параметры, зависящие от  $h$ ,  $d$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ .

Параметры  $n$  и  $n'$ , связанные соотношением  $n' = \sqrt{1 - n^2}$ , определяют по формуле

$$\frac{h}{d} = \frac{E(n)}{K(n') - E(n')}. \quad (39)$$

Модули  $k_I$ ,  $k_{III}$ ,  $k'_I = \sqrt{1 - k_I^2}$ ,  $k'_{III} = \sqrt{1 - k_{III}^2}$  для формул (37) и (38) находят из выражений:

для зоны I

$$\ln \frac{1}{1 - b_1/r_2} = \pi \frac{K(k_I)}{K(k'_I)}; \quad (40)$$

для зоны III

$$\ln \frac{1}{1 + b_2/r_3} = \pi \frac{K(k_{III})}{K(k'_{III})}. \quad (41)$$

Параметры  $\alpha$  и  $\beta$  находят из выражений:  
для зоны I

$$\frac{h}{r_2} = \frac{\pi}{K(k'_I)} F\left(\frac{\sqrt{1-1/\alpha}}{k'_I}; k'_I\right); \quad (12)$$

для зоны III

$$\frac{h}{r_3} = \frac{\pi}{K(k'_{III})} F\left(\frac{\sqrt{1+1/\beta}}{k'_{III}}; k'_{III}\right). \quad (13)$$

При расчете параметров кромок для наиболее интересного случая, если сварка ведется с использованием только одного, расположенного внутри заготовки магнитопровода, допущение о постоянстве скалярного магнитного потенциала справедливо на окружности, радиус которой примерно равен  $2,4r_2$ . Тогда параметр

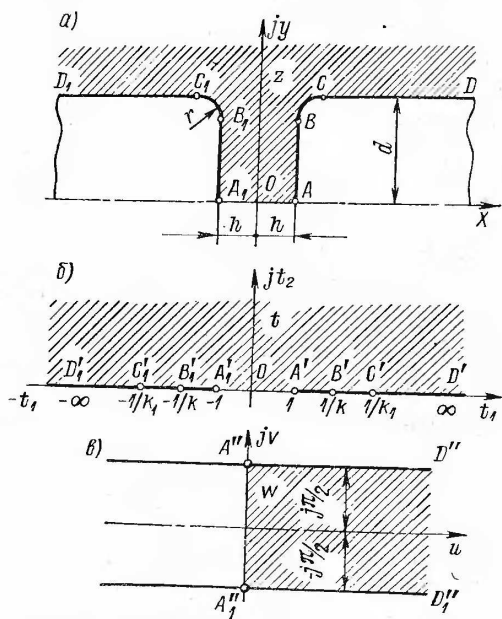


Рис. 34. Конформное отображение плоской системы, соответствующей кромкам со скругленными углами без магнитопроводов в областях  $z$ ,  $t$  и  $w$

$b_2 \approx 1,4r_2$ . Для свариваемых поверхностей кромок (зона II на рис. 33, a) поверхностная плотность тока определяется выражением (30).

**Кромки со скругленными углами без магнитопроводов.** Исследуемое внешнее поле в области  $z$  (рис. 34, a) отображается на верхнюю полуплоскость в области  $t$  (рис. 34, б), а затем на полосу шириной  $\pi$  в области  $w$  (рис. 34, в) с помощью выражений [16]:

$$z = A \int_0^t \sqrt{\frac{1-k^2t^2}{1-t^2}} dt + B \int_0^t \sqrt{\frac{1-k_1^2t^2}{1-t^2}} dt; \quad (44)$$

$$t = -\sin jw,$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $k$  и  $k_1$  — параметры, зависящие от  $h/d$  и  $r/d$ .  
Поверхностная плотность тока будет

$$|\delta_S| = |\delta_{S0}| \left| \frac{c \sqrt{1-k^2} + \sqrt{1-k_1^2}}{c \sqrt{1-k^2t^2} + \sqrt{1-k_1^2t^2}} \right|. \quad (45)$$

Рассчитанные по формулам (44) и (45) графики распределения поверхностной плотности тока на кромках со скругленными углами

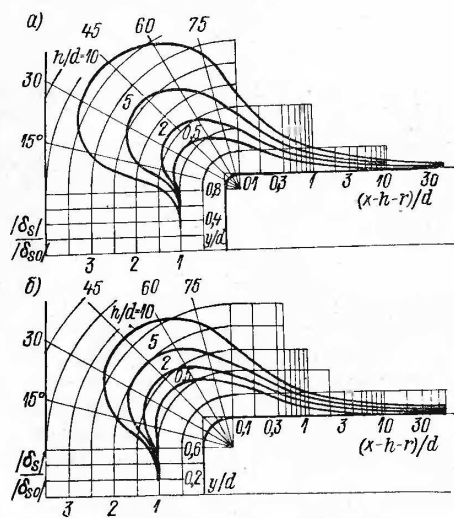


Рис. 35. Распределение поверхностной плотности тока  $|\delta_S|/|\delta_{S0}|$  на свариваемых кромках со скругленными углами без магнитопроводов при различных значениях  $h/d$ : а —  $r/d = 0,2$ ; б —  $r/d = 0,4$

для различных  $h/d$  и  $r/d$  приведены на рис. 35. Приведенные расчеты распределения поверхностной плотности тока на кромках были проверены экспериментально. Проверка показала, что

расхождение между расчетными и экспериментальными значениями поверхностной плотности тока для параллельных кромок не превышает 10% [10, 11, 16]. Для кромок, расположенных под углом, это расхождение возрастает до 15%.

На основании приведенных данных можно сделать следующие выводы. Ток на свариваемых поверхностях кромок трубной заготовки распределен неравномерно: на углах кромок плотность тока значительно больше, чем в середине. Это является причиной перегрева углов кромок при сварке, что может ухудшить качество сварного соединения. На идеализированных острых углах кромок поверхностная плотность тока (по расчету) равна бесконечности. При конечном радиусе скругления углов поверхностная плотность конечна. С уменьшением радиусов скругления поверхностная плотность тока на скруглениях растет. При выраженном поверхностном эффекте для случая  $r > \Delta$  расчетные и измеренные значения поверхностной плотности тока совпадают по всему периметру кромок. При  $r < \Delta$  на скругленных углах кромок измеренная плотность тока ниже расчетной и разница тем больше, чем меньше  $r$ . По-видимому, линии равной плотности тока в металле кромок вблизи углов изгибаются и радиус их скруглений больше  $r$ .

Как было показано, кроме тока, идущего по свариваемым поверхностям, имеется ток, текущий по боковым поверхностям вдоль кромок. Так, при сварке без магнитопроводов и  $h/d = 1$  этот ток может достигать до 75%.

При уменьшении зазора между кромками распределение тока становится более благоприятным: на свариваемых поверхностях оно становится более равномерным, а на боковых поверхностях ток уменьшается. При  $h/d = 0,5$  уже 35% тока течет по свариваемым поверхностям. Однако зазор между кромками при сварке не всегда можно уменьшить. В таком случае более благоприятного распределения тока на кромках можно достичь, располагая внутри трубной заготовки и снаружи вдоль кромок магнитопроводы. Применение магнитопроводов тем эффективнее, чем меньше зазор между магнитопроводами и кромками и чем больше зазор между кромками. Так, если  $h/d = 1$  и  $b/d \geq 6$ , магнитопроводы не влияют на распределение тока на свариваемых поверхностях. Если  $h/d = 10$ , то даже при  $b/d = 10$  влияние магнитопроводов весьма сильно.

При сварке труб кромки сходятся под углом и зазор между ними изменяется от  $2h_{\max}$  до нуля. Зазор же между магнитопроводами и кромками постоянен на всей длине. В связи с этим целесообразно располагать магнитопровод на участках, расположенных в непосредственной близости от места схождения кромок, где  $h \leq b$ . При использовании одного магнитопровода распределение тока на кромках несимметрично: со стороны магнитопровода оно более равномерное, чем с противоположной стороны, а плотность тока под магнитопроводом ниже.

Методом конформных отображений была решена плоская краевая задача, рассчитано распределение поверхностной плотности тока на кромках, что позволяет получить интегральные параметры кромок для случая ярко выраженного поверхностного эффекта. Таким методом невозможно рассчитать плотности тока вблизи углов кромок. Ошибка будет тем больше, чем меньше отношение  $d/\Delta$ . Однако часто желательно знать истинное распределение тока на кромках, например при определении исходных данных для расчета температурного поля на свариваемых поверхностях или минимальной частоты тока при высокочастотной сварке труб заданной толщины и др.

### 7. Расчет распределения плотности тока на кромках с учетом реальной глубины проникновения

Распределение плотности тока на кромках с учетом проявления реального поверхностного эффекта может быть получено, например, методом связанных контуров. При этом методе плоская система, изображенная на рис. 27, а, заменяется системой двухпроводных линий (рис. 36). Считается, что поперечное сечение

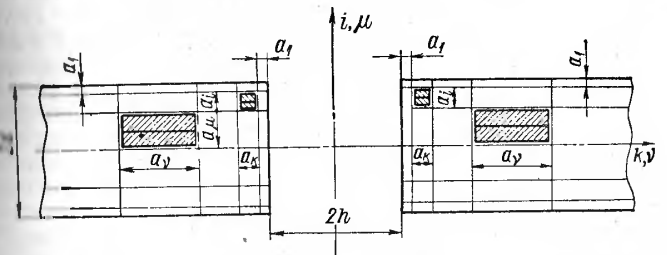


Рис. 36. Система двухпроводных линий, заменяющая свариваемые кромки без магнитопроводов

прямоугольного провода каждой линии настолько мало, что ток по нему распределен равномерно. Напряжение на всех линиях одинаково.

Для расчета тока линий необходимо решить систему уравнений

$$\dot{U} = \dot{I}_{k,i} (R_{k,i} + j\omega L_{k,i}) + j \sum \dot{I}_{v,\mu} \omega M_{k,i}; v, \mu \quad (46)$$

где  $\dot{I}_{k,i}$  — ток в двухпроводной линии, которая имеет  $k$ -й номер по оси абсцисс и  $i$ -й по оси ординат;  $R_{k,i}$ ,  $\omega L_{k,i}$  — активное и индуктивное сопротивление линии, имеющей координаты  $k$  и  $i$ ;  $\dot{I}_{v,\mu}$  — ток в двухпроводной линии  $v, \mu$  ( $v \neq k$  и  $\mu \neq i$ );  $M_{k,i;v,\mu}$  — коэффициент взаимной индукции линий  $k, i$  и  $v, \mu$ .

Число уравнений системы (46) равно числу двухпроводных линий и ограничивается возможностью ЭЦВМ. При анализе распределения поверхностной плотности тока, полученного методом конформных отображений, видно, что ток течет по широкой полосе свариваемых кромок и плотность тока быстро изменяется вблизи их углов. Поэтому размеры проводов линий выбираются в зависимости от их положения и выражаются формулами:

$$a_k = a_1 q^{k-1}; \quad a_l = a_1 q^{l-1};$$

$$a_v = a_1 q^{v-1}; \quad a_\mu = a_1 q^{\mu-1},$$

где  $q$  — параметр, определяющий увеличение размера поперечного сечения линий по мере удаления их от углов кромок. Так, размеры поперечного сечения проводов, расположенных в непосредственной близости от углов кромок, где плотность тока изменяется быстро, выбраны достаточно малыми. Размеры сечения проводов, расположенных на значительном расстоянии от углов кромок, поскольку плотность тока изменяется медленно, могут быть достаточно большими, чтобы ширина исследуемой зоны была не менее  $100d$ , а общее количество линий не превышало 100.

Можно ожидать, что развитие этого метода позволит в дальнейшем получить распределение плотности тока на свариваемых кромок с учетом реальной глубины проникновения и уточнить расчет активного и индуктивного сопротивлений кромок. Кроме того, результаты могут быть использованы при разработке теплового расчета, а также положены в основу решения комплексной задачи исследования электромагнитных и тепловых полей и процессов деформации разогретого металла.

В связи с тем, что работа по исследованию распределения поверхностной плотности тока на кромок методом связанных контуров не закончена, электрические параметры кромок и мощность, необходимая для их разогрева, рассчитывались по распределению поверхностной плотности тока, полученному методом конформных отображений. При этом активное сопротивление определялось при условии, что ток течет по поверхности кромок в слое толщиной  $\Delta$ .

## 8. Расчет электрических параметров свариваемых кромок

Выше были приведены распределения поверхностной плотности тока на свариваемых кромок из неферромагнитного материала при различной их геометрии. Зная распределение поверхностной плотности тока на кромок и магнитный поток в зазоре между ними, можно определить активное сопротивление кромок длиной

$l$  и определяемую внешним потоком индуктивностью:

$$R = \frac{\rho}{\Delta} \frac{\int_S |\delta_S|^2 |dz|}{\left\{ \int_S |\delta_S| |dz| \right\}^2}; \quad (47)$$

$$L_{\text{вн}} = \mu_0 \frac{\int_{S_1} |H| |dz|}{\int_S |\delta_S| |dz|}, \quad (48)$$

где  $|H|$  — модуль действующего значения напряженности магнитного поля, А/м;  $S$  — контур интегрирования, совпадающий с контуром поперечного сечения кромок;  $S_1$  — линия интегрирования, совпадающая с линией постоянного магнитного потенциала.

Для удобства выполнения инженерных расчетов введено понятие коэффициента уменьшения активного сопротивления кромок

$$k_R = R/R_0, \quad (49)$$

где  $R$  — активное сопротивление кромок в реальном случае ( $h/d \neq 0$  и  $b/d \neq 0$ );  $R_0 = \rho l/d \Delta$  — активное сопротивление кромок при  $h/d = 0$  или  $b/d = 0$ .

Зная сопротивление кромок  $R_0$  и вычислив коэффициент уменьшения сопротивления кромок, можно рассчитать активное сопротивление кромок для реальных зазоров. Для расчета коэффициента уменьшения активного сопротивления  $k_R$  и определяемой внешним магнитным полем индуктивности  $L_{\text{вн}}$  кромок, сходящихся под углом, кромок разбиваются на участки, длина которых мала, и  $k_R$ , а также  $L_{\text{вн}}$  в начале и конце участка отличаются незначительно. Тогда средние коэффициенты уменьшения активного сопротивления кромок  $k_{R\text{ср}}$  и внешняя индуктивность всей зоны нагрева определяются по формулам:

$$k_{R\text{ср}} = \frac{1}{I_{\text{кр}}} \sum_{m=1}^{m=n} k_{Rm} \Delta l_m; \quad (50)$$

$$L_{\text{вн, ср}} = \frac{1}{I_{\text{кр}}} \sum_{m=1}^{m=n} L_{\text{вн}m} \Delta l_m, \quad (51)$$

где  $\Delta l_m$  — длина участка  $m$ ;  $k_{Rm}$  — коэффициент уменьшения активного сопротивления для участка  $m$ ;  $L_{\text{вн}m}$  — индуктивность участка  $m$ .

Для плоских кромок с острыми (см. рис. 26) и скругленными (см. рис. 34) углами коэффициенты уменьшения активного сопротивления и внешние индуктивности кромок могут быть рассчитаны по формулам, которые получены подстановкой выражений

(27)–(32), (44), (45) соответствующих распределений поверхностной плотности тока, а также напряженностей магнитного поля в формулы (47) и (48).

1. Кромки с острыми углами без магнитопроводов:

$$k_R = \frac{K' + 2K - 2F(k, S_1)}{[2 \ln t_1 - \ln(1/k)]^2} [(1 + k^2) K' - 2E']; \quad (52)$$

$$L_{\text{вн}} = \frac{\mu_0 \pi}{2 \ln t_1 - \ln(1/k)}, \quad (53)$$

где  $K, K', E'$  и  $F(k, S_1)$  — полные и неполные интегралы первого и второго рода от модуля  $k$ , который зависит от  $h/d$  и определяется с помощью формулы (27);  $t_1$  — координата точки, лежащей на действительной оси в области  $t$  (см. рис. 27, б), соответствующей точке в области  $z$  (см. рис. 27, а) с координатами  $z_1 = d + j(h + 100d)$ ; зависимость между  $t_1$  и  $z_1$  определяется с помощью выражения (27).

2. Кромки с острыми углами и двумя магнитопроводами:

$$k_R = \frac{k^2}{n} \frac{K' + K - F(k, v)}{(K'_1)^2} [K' - \Pi(n', k)]; \quad (54)$$

$$L_{\text{вн}} = \mu_0 K_1 / K'_1, \quad (55)$$

где  $K_1$  и  $K'_1$  — полные эллиптические интегралы первого рода от модулей  $k_1 = \sqrt{n}$  и  $k'_1 = \sqrt{1-n}$ ;  $\Pi(n', k')$  — полный эллиптический интеграл третьего рода от дополнительных модулей  $k' = \sqrt{1-k^2}$  и параметра  $n'$  ( $n' = n \frac{1-k^2}{k^2-n}$ );  $v$  определяется по формуле  $v = \sqrt{n}/k$ .

Модули  $k$  и  $n$  определяются с помощью формулы (29) в зависимости от  $h/d$  и  $b/d$ .

3. Кромки с острыми углами и одним магнитопроводом:

$$k_R = \frac{2K + K' - F(k, \tau) - F(k, S_1)}{\left[ \frac{1}{\sqrt{n}} \ln(\sqrt{n} t_1 + \sqrt{n t_1^2 - 1}) \right]^2} \int_1^{1/k} \frac{V(t^2 - 1)(1 - k^2 t^2)}{n t^2 - 1} dt; \quad (56)$$

$$L_{\text{вн}} = \frac{\mu_0 \pi}{\ln(\sqrt{n} t_1 + \sqrt{n t_1^2 - 1})}, \quad (57)$$

где  $\tau = 1/\sqrt{n}$ ;  $t_1$  — координата точки, лежащей на действительной оси в области  $t$  (см. рис. 31, б), соответствующей точке в области  $z$  (см. рис. 31, а) с координатами  $z_1 = (h + 100d) + j(b + 2d)$ ; зависимость между  $t_1$  и  $z_1$  определяется с помощью выражения (31).

4. Кромки со скругленными углами без магнитопроводов:

$$k_R = \frac{D \int_1^{t_1} \frac{dt}{\left( C \sqrt{1 - k^2 t^2} + \sqrt{1 - k_1^2 t^2} \right) \sqrt{t^2 - 1}}}{\left[ \ln(t_1 + \sqrt{t_1^2 - 1}) \right]^2}; \quad (58)$$

$$L_{\text{вн}} = \frac{\mu_0 \pi}{2 \ln(t_1 + \sqrt{t_1^2 - 1})}, \quad (59)$$

где  $k$  и  $k_1$  — модули, определяемые в зависимости от  $h/d$  и  $r/d$  с помощью формулы (44);  $t_1$  — координата точки, лежащей на действительной оси в области  $t$  (см. рис. 34, б), соответствующей точке в области  $z$  (см. рис. 34, а) с координатами  $z_1 = (h + 100d) + jd$ ; зависимость между  $t_1$  и  $z_1$  определяется с помощью выражения (44);

$$D = C \left[ \sqrt{1 - k^2} \ln \frac{1 + \sqrt{1 - k^2}}{k} - \right.$$

$$\left. - k^2 \int_1^{1/k} \frac{\sqrt{t^2 - 1}}{\sqrt{1 - k^2 t^2} + \sqrt{1 - k^2}} dt \right] + \left[ \sqrt{1 - k_1^2} \ln \frac{1 + \sqrt{1 - k_1^2}}{k_1} - \right.$$

$$\left. - k_1^2 \int_1^{1/k_1} \frac{\sqrt{t^2 - 1}}{\sqrt{1 - k_1^2 t^2} + \sqrt{1 - k_1^2}} dt \right]; \quad (60)$$

$$C = \frac{\int_1^{1/k} \sqrt{(1 - k_1^2 t^2)/(t^2 - 1)} dt}{\int_1^{1/k_1} \sqrt{(k_1^2 t^2 - 1)/(t^2 - 1)} dt}. \quad (61)$$

Коэффициенты уменьшения активного сопротивления кромок со скругленными углами рассчитаны для  $0 \leq h/d \leq 10$  и  $r/d = 0,05 \div 0,9$ . По формулам (52), (54), (56), (58), (53), (55), (57) и (59) рассчитаны коэффициенты уменьшения активного сопротивления и внешние индуктивности для параллельных кромок с  $0 \leq h/d \leq 10$  и для различных  $b/d$ . Результаты расчетов приведены на рис. 37–40. Там же даны значения средних коэффициентов уменьшения активного сопротивления  $k_{R, \text{ср}}$  и внешних индуктивностей, рассчитанных по формулам (50) и (51).

Значения  $k_{R, \text{ср}}$  и  $L_{\text{вн}, \text{ср}}$  определены для кромок, сходящихся под углом прямолинейно. Однако в непосредственной близости от места схождения кромки криволинейны. Это увеличивает



погрешность расчета. Если желательно погрешность свести к минимуму, необходимо снять траекторию сближения кромок, и с использованием формул (50) и (51) произвести более точный расчет.

5. Кромки трубной заготовки реальной кривизны с острыми углами и одним магнитопроводом. Для учета влияния кривизны трубной заготовки введем поправочные коэффициенты  $k_{D_2}$  и  $k_{D_1}$ , которые могут быть получены из выражений (33)–(38). Коэффициент  $k_{D_2}$  учитывает снижение мощности на внутренней поверхности:

$$k_{D_2} = \frac{2(b_1/r_2) \alpha K(k') [K(\sqrt{1/\lambda_1})]^2}{\pi^2 [K(\sqrt{1/\alpha})]^2 \lambda_1} \times \frac{\int_0^{\arcsin \sqrt{1/\alpha}} [\sin \varphi / (1 - \alpha \sin^2 \varphi)] d\varphi}{\int_0^{\arcsin \sqrt{1/\lambda_1}} [\sin \varphi / (1 - \lambda_1 \sin^2 \varphi)] d\varphi} \quad (62)$$

Коэффициент  $k_{D_2}$  учитывает снижение мощности, выделяющейся на наружной поверхности:

$$k_{D_2} = \frac{2(b_2/r_2) \beta K(k') [K(\sqrt{1/\lambda_2})]^2}{\pi^2 [K(\sqrt{1/\beta})]^2 \lambda_2} \times \frac{\int_0^{\arcsin \sqrt{1/\beta}} [V \sin^2 \varphi - k^2 / (1 - \beta) \sin^2 \varphi] d\varphi}{\int_0^{\arcsin \sqrt{1/\lambda_2}} [\sin \varphi / (1 - \lambda_2 \sin^2 \varphi)] d\varphi} \quad (63)$$

Рис. 37. Значения коэффициентов  $L_{вн}$ ,  $L_{вн.ср}$ ,  $k_R$  и  $k_{R.ср}$  для кромок, расположенных: а — параллельно; б — под углом

где  $k$ ,  $k'$ ,  $n$ ,  $n'$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  — параметры, определяемые из выражений (33)–(35);  $\lambda_{1,2}$  определяется по формуле

$$\lambda_{1,2} = (1/2) [\text{ch}(\pi h/b_{1,2}) + 1]. \quad (64)$$

Коэффициенты  $k_{D_1}$ ,  $k_{D_2}$  и  $k_R$  при сварке с использованием только внутреннего магнитопровода ( $b_2 \approx 1,4r_2$ ) приведены на рис. 41 и 42.

Внешняя индуктивность кромок как функция магнитного сопротивления полезному (т. е. проходящему через щель между кромками) магнитному потоку [26]

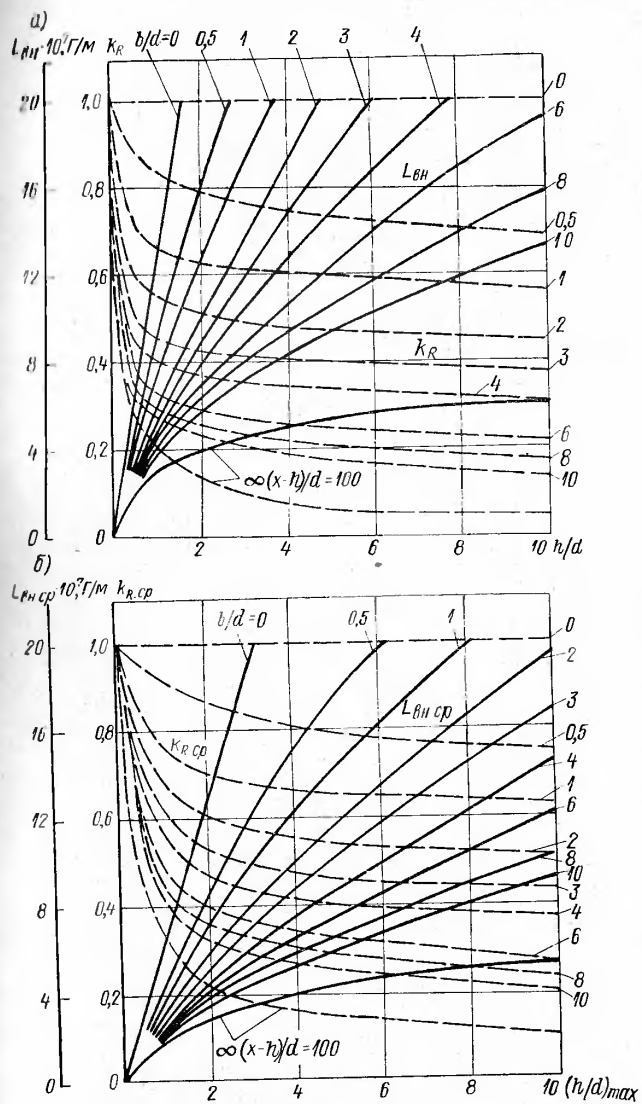


Рис. 38. Значения коэффициентов  $L_{вн}$ ,  $L_{вн.ср}$ ,  $k_R$  и  $k_{R.ср}$  для кромок с двумя магнитопроводами, расположенных: а — параллельно; б — под углом (при  $b/d = \infty$  магнитопроводы отсутствуют)

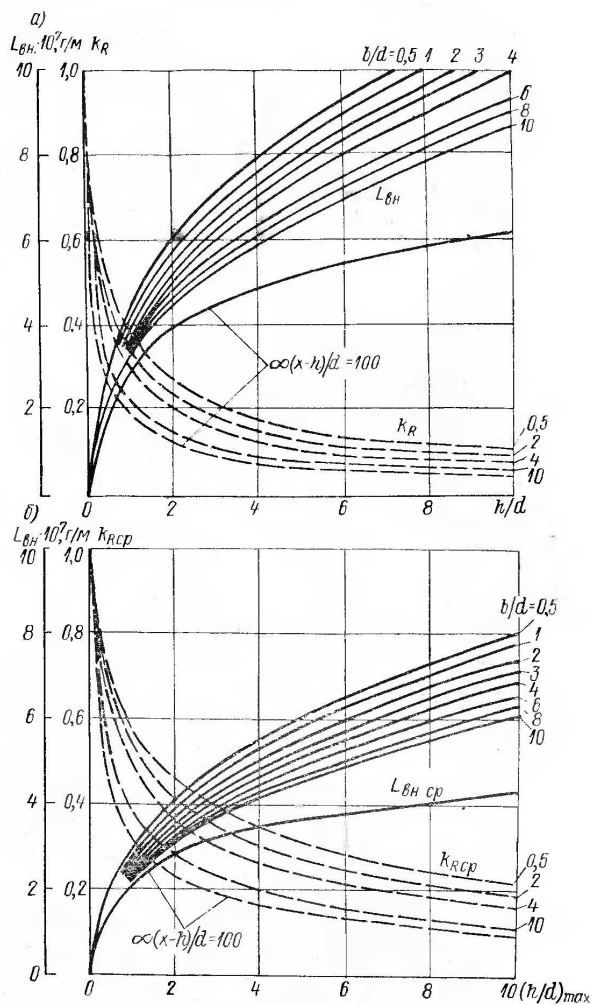


Рис. 39. Значения коэффициентов  $L_{вн}$ ,  $L_{вн.сп}$ ,  $k_R$  и  $k_{R.сп}$  для кромок с одним магнитопроводом, расположенных: а — параллельно; б — под углом (при  $b/d = \infty$  магнитопроводы отсутствуют)

$$L_{вн} = 1/(R_{mI} + R_{mII} + R_{mIII}), \quad (65)$$

где  $R_{mI}$ ,  $R_{mII}$ ,  $R_{mIII}$  — сопротивления магнитному потоку, проводящему через щель между кромками в зонах I, II, III (см. рис. 33, а).

Рассчитанные В. И. Червинским магнитные сопротивления приведены на рис. 43. Сопротивление  $R_{mIII}$  рассчитано только для кромок без наружного магнитопровода, поэтому был принят радиус  $r$  (рис. 33, а), равный  $2,4r_в$ . Исследования показали, что внутренний магнитопровод может быть выполнен в виде немагнитной трубы со щелью, заполненной ферромагнитным материалом. Труба щелью обращена к кромкам. Относительную ширину щели  $b_n$ , которая равна отношению длины дуги открытой части магнитопровода к зазору между кромками, нужно выбирать в соответствии с графиком (рис. 44) на условия минимального магнитного сопротивления  $R_{mI}$  (подробнее конструкции магнитопроводов описаны в гл. III).

С помощью формул для распределения поверхностной плотности тока, полученных методом конформных отображений, были рассчитаны электрические параметры идеализированных (с острыми углами) и реальных (со скругленными углами) кромок при различных расположениях магнитопроводов. Экспериментальной проверкой было показано, что расхождение между расчетными и экспериментальными значениями не превышает 20% [10, 11, 26].

Установлено, что активное и индуктивное сопротивления кромок зависит от зазоров между кромками, а также между магнитопроводами и кромками. Применение двух магнитопроводов оказывает большее (в 3—4 раза) влияние, чем одного. Реальные сопротивления кромок существенно меньше, чем вычисленные для идеализированного случая ( $h/d = 0$  или  $b/d = 0$ ). При уменьшении относительного зазора между кромками  $h/d$  (при

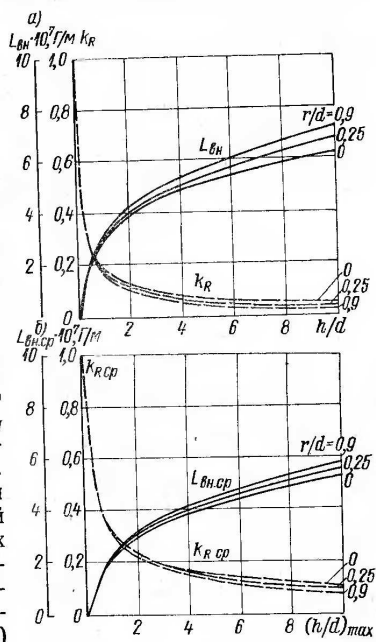


Рис. 40. Значения коэффициентов  $L_{вн.сп}$ ,  $L_{вн}$ ,  $k_R$  и  $k_{R.сп}$  для кромок, расположенных: а — параллельно; б — под углом

$b/d = \text{const}$ ) или  $b/d$  (при  $h/d = \text{const}$ )  $k_{R\text{cp}}$  и  $L_{\text{вн. ср}}$  увеличиваются. При этом  $k_{R\text{cp}} \rightarrow 1$ .

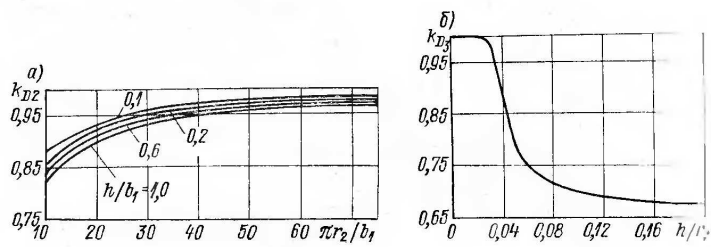


Рис. 41. Значения коэффициентов  $k_{D2}$  и  $k_{D3}$ , учитывающих кривизну трубной заготовки: а — для внутренней поверхности; б — для наружной поверхности

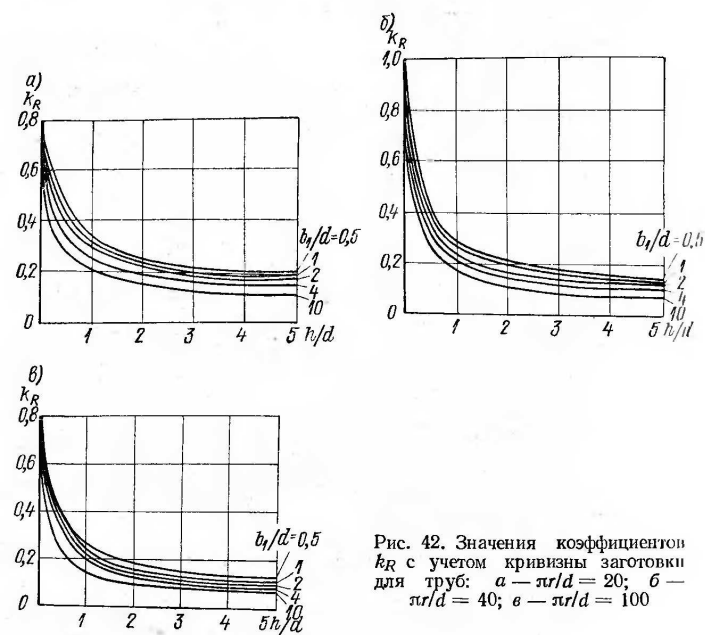


Рис. 42. Значения коэффициентов  $k_R$  с учетом кривизны заготовки для труб: а —  $\pi r/d = 20$ ; б —  $\pi r/d = 40$ ; в —  $\pi r/d = 100$

При больших зазорах между кромками ( $h/d \gg 2$ ) влияние магнитопроводов очень велико. Например, применение двух магнитопроводов ( $b/d = 2$ ) приводит к увеличению  $k_{R\text{cp}}$  и  $L_{\text{вн. ср}}$  соответственно в 2,7 и 1,9 раза. При уменьшении зазора  $h/d$

влияние магнитопроводов уменьшается. Так, при зазоре  $h/d = 0,5$   $k_{R\text{cp}}$  и  $L_{\text{вн. ср}}$  возрастают примерно в 1,72 и 1,57 раза соответственно. При малых относительных зазорах ( $h/d < 0,25$ )

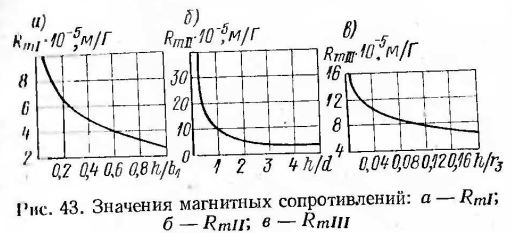


Рис. 43. Значения магнитных сопротивлений: а —  $R_{mI}$ ; б —  $R_{mII}$ ; в —  $R_{mIII}$

при любом  $b/d$  или  $b/d < 0,5$  при любом  $h/d$ )  $k_{R\text{cp}}$  близок к единице. Расчет активного и индуктивного сопротивлений кромок может быть проведен по методике, указанной в работе [6].

Коэффициенты  $k_R$  и  $k_{R\text{cp}}$  несколько ниже, а  $L_{\text{вн}}$  и  $L_{\text{вн. ср}}$  несколько выше для реальных кромок ( $r \neq 0$ ), чем для кромок с острыми углами. Однако разница невелика и ее следует учитывать лишь при больших зазорах между кромками. Для параллельных кромок при  $h/d \leq 3 + 3,5$  и кромок, расположенных под углом при  $h/d \leq 4 + 4,5$ , радиус скругления углов можно не учитывать. При неярко выраженном поверхностном эффекте, если  $2d/\Delta \geq 5 + 6$ , погрешность расчета не увеличивается.

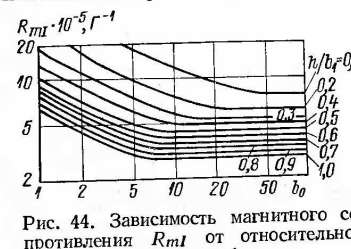


Рис. 44. Зависимость магнитного сопротивления  $R_{mI}$  от относительной ширины  $b_0$

### 9. Расчет мощности, необходимой для разогрева кромок до сварочной температуры

При расчете мощности принимались следующие допущения: 1) тепловые потери за счет теплопередачи с поверхности и вдоль кромок весьма малы; 2) энергия, выделяющаяся на боковых поверхностях кромок, не подлежащих сварке, на температуру свариваемой поверхности не влияет.

Несмотря на допущения, этот расчет весьма сложен, так как на углах кромок даже при учете их скругления поверхностная плотность тока значительно больше, чем в середине кромок. Поэтому нельзя пренебрегать тепловым потоком от углов к

середине кромок, хотя строго учесть влияние этого потока довольно трудно. Ввиду этого расчет мощности производился для двух крайних случаев.

1. Тепловой поток от углов к середине кромок весьма мал и на распределение температуры на свариваемых поверхностях не влияет. В этом случае средняя часть кромок разогревается до сварочной температуры, а их углы перегреваются. Полезная мощность определяется из условия, что поверхностная плотность тока на свариваемых поверхностях постоянна и равна плотности тока в середине кромок. При этом полезная мощность равна полной мощности, выделяющейся на кромках при  $h/d = 0$  или  $b/d = 0$ , когда тепловой поток направлен по нормали к свариваемым поверхностям. Отношение полной мощности к полезной обозначим  $k_{p1}$  и назовем максимальным коэффициентом увеличения мощности.

2. Тепловой поток от углов к середине кромок настолько велик, что несмотря на неравномерное распределение тока на свариваемых поверхностях, температура за счет теплопроводности выравнивается. В этом случае вся энергия, выделяющаяся равномерно на свариваемых поверхностях, полезна. Отношение полной мощности, подведенной к кромкам, к мощности, выделяющейся на свариваемой поверхности, назовем минимальным коэффициентом увеличения мощности  $k_{p2}$ .

Очевидно, истинное значение коэффициента увеличения мощности  $k_p$  лежит в пределах от  $k_{p1}$  до  $k_{p2}$  и зависит от времени нагрева, свойств материала, толщины кромок и других параметров, учесть которые довольно трудно. Поэтому этот коэффициент можно принять

$$k_p = (k_{p1} + k_{p2})/2. \quad (66)$$

Таким образом, мощность  $P_{кр}$ , необходимую для сварки, находим по формуле

$$P_{кр} = k_p p_0 2d 2l_{кр},$$

где  $p_0$  — удельная мощность, определяемая по методике для полубесконечной среды [6, 35];  $l_{кр}$  — длина кромок на участке нагрева.

Эта формула, строго говоря, применима, если  $p_0$  не изменяется на участке от контактов или индуктора до места схождения кромок. Но в реальном случае  $p_0$  не постоянна на участке нагрева. При сварке изделий из немагнитного материала она растет по закону, близкому к линейному. При сварке изделий из ферромагнитного материала она растет от нуля до максимального значения, затем на участке потери магнитных свойств падает и потом снова растет на участке до места схождения кромок. Ошибка при расчетах  $P_{кр}$ , если пренебречь изменением  $p_0$  на участке нагрева, не превышает 10%.

Ниже приведены формулы для расчета коэффициентов увеличения мощности  $k_{p1}$  и  $k_{p2}$ , полученные с использованием распределения поверхностной плотности тока для кромок с острыми и скругленными углами при различном расположении магнитопроводов.

1. Кромки с острыми углами без магнитопроводов:

$$k_{p1} = \frac{K' + 2K - 2F(k, S)}{(1 + k^2)K' - 2E'}; \quad (67)$$

$$k_{p2} = [K' + 2K - 2F(k, S)]/K'. \quad (68)$$

2. Кромки с острыми углами и двумя магнитопроводами:

$$k_{p1} = \frac{n(1 - k^2)}{k^2(1 - n)} \frac{K' + K - F(k, v)}{K' - \Pi(n', k')}; \quad (69)$$

$$k_{p2} = [K' + K - F(k, v)]/K'. \quad (70)$$

3. Кромки с острыми углами и одним магнитопроводом:

$$k_{p1} = \frac{2K - F(k, \tau) + K' - F(k_1, S_1)}{\frac{nt_0^2 - 1}{(t_0^2 - 1)(1 - k^2 t_0^2)} \int_1^{1/k} \frac{V(t^2 - 1)(1 - k^2 t^2)}{nt^2 - 1} dt}; \quad (71)$$

$$k_{p2} = [2K - F(k, \tau) + K' - F(k, S_1)]/K'. \quad (72)$$

4. Кромки со скругленными углами без магнитопроводов:

$$k_{p1} = \frac{c\sqrt{1 - k^2} + \sqrt{1 - k_1^2}}{d} \int_1^{t_1} \frac{dt}{(c\sqrt{1 - k^2 t^2} + \sqrt{1 - k_1^2 t^2})\sqrt{t^2 - 1}}; \quad (73)$$

$$k_{p2} = \frac{\int_1^{t_1} \frac{dt}{(c\sqrt{1 - k^2 t^2} + \sqrt{1 - k_1^2 t^2})\sqrt{t^2 - 1}}}{\int_1^{t_1} \frac{dt}{(c\sqrt{1 - k^2 t^2} + \sqrt{1 - k_1^2 t^2})\sqrt{t^2 - 1}}}. \quad (74)$$

Рассчитав коэффициенты  $k_{p1}$  и  $k_{p2}$  по формулам (67)–(74), получим по формуле (66) значения  $k_p$  для параллельных кромок, которые приведены на рис. 45–47. На этих же рисунках приведены значения коэффициента  $k_{p\text{ср}}$  для кромок, расположенных под углом, которые рассчитывались по формуле

$$k_{p\text{ср}} = \frac{1}{l_{кр}} \sum_{m=1}^{m=n} k_{pm} \Delta l_m,$$

где  $k_{pm}$  — коэффициент  $k_p$  для участка  $m$ .

Как видно из рис. 45—47, мощность, необходимая для разогрева кромок до сварочной температуры, существенно зависит от зазора между кромками, а значит и от угла схождения кромок. Например, при  $b/d = \infty$  уменьшение относительного зазора  $(h/d)_{\max}$  вдвое позволяет уменьшить мощность примерно на 25%. При минимальном угле между кромками мощность может быть еще снижена, если внутри и снаружи трубной заготовки расположить магнитопроводы, эффективность применения которых

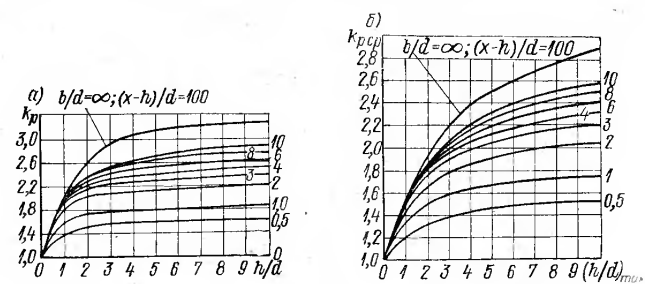


Рис. 45. Значения коэффициентов  $k_p$  и  $k_{p\text{ср}}$  для кромок с двумя магнитопроводами, расположенных: а — параллельно; б — под углом (при  $b/d = \infty$  магнитопроводы отсутствуют)

увеличивается при уменьшении зазора между магнитопроводами и кромками. При весьма малых зазорах между кромками вблизи их места схождения влияние магнитопроводов незначительно, и поэтому располагать их в этой зоне не следует.

Значения  $k_{p1}$ ,  $k_{p2}$ ,  $k_p$  и  $k_{p\text{ср}}$ , рассчитанные для кромок со скругленными углами, несколько меньше значений, полученных для  $r = 0$ . Однако разница невелика, и ее следует учитывать при расчете  $k_{p1}$ ,  $k_{p2}$  и  $k_p$  для  $h/d \geq 2,5$  и при расчете  $k_{p\text{ср}}$  для  $h/d \geq 2,5$ .

### 10. Расчет параметров свариваемых кромок при производстве труб из ферромагнитного материала

При сварке труб материал свариваемых поверхностей к концу нагрева теряет магнитные свойства на глубину до  $(2 \div 3) \Delta$  в середине кромок и до  $(3 \div 5) \Delta$  на углах. Примерно 80—85% длины кромок на участке нагрева имеют свариваемые поверхности, прогретые до температуры потери магнитных свойств на глубину, равную или больше  $\Delta$ . Поэтому реальные кромки можно свести к представленной на рис. 48 системе.

Как показали измерения, распределение поверхностной плотности тока на моделях из ферромагнитного материала, у которых

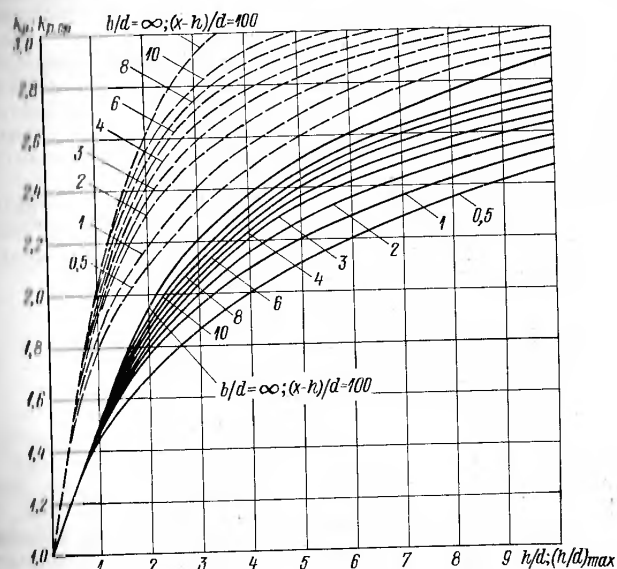


Рис. 46. Значения коэффициентов  $k_p$  и  $k_{p\text{ср}}$  для кромок с одним магнитопроводом, расположенных параллельно (---) и под углом (—)

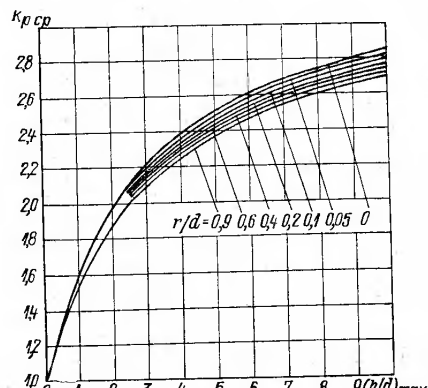


Рис. 47. Значения коэффициентов  $k_{p\text{ср}}$  для кромок со скругленными углами, расположенных под углом

свариваемые поверхности на глубину  $(1 \div 2) \Delta$  немагнитны, так же, как и на моделях из немагнитного материала (максимальное расхождение 12%).

Следовательно, при одинаковом распределении поверхностной плотности тока на немагнитных и ферромагнитных кромках полезная мощность примерно одинакова. Полная же мощность на ферромагнитных кромках несколько больше, так как на боковых поверхностях магнитная проницаемость  $\mu > 1$  и удельная мощность больше, чем при  $\mu = 1$ .

Мощность, необходимая для сварки, и активное сопротивление кромок из ферромагнитного материала увеличиваются по сравнению с мощностью и активным сопротивлением кромок из немагнитного материала пропорционально коэффициенту

$$k_{\mu} = \frac{\int_{S_2} |\delta_S|^2 |dz| + 0,55 \int_{S_3} \sqrt{\mu_e} |\delta_S|^2 |dz|}{\int_S |\delta_S|^2 |dz|}, \quad (75)$$

где  $S_2$  и  $S_3$  — контуры интегрирования на участках с  $\mu_e = 1$  и  $\mu_e > 1$  ( $\mu_e$  — относительная магнитная проницаемость на поверхности кромок, берется из графика рис. 6 в зависимости от напряженности магнитного поля на поверхности кромок).

По формуле (75) рассчитаны значения  $k_{\mu}$  для параллельных кромок, по которым затем получены средние коэффициенты

$k_{\mu, \text{ср}}$  для кромок, расположенных под углом. Значения этих коэффициентов для кромок с различным расположением магнитопроводов показаны на рис. 49, из которого видно, что  $k_{\mu, \text{ср}}$  зависит от сварочного тока и зазоров между кромками, а также зазоров между магнитопроводами и кромками. Экспериментальной проверкой установлено, что при  $2d/\Delta_k \geq 1$  расхождение между расчетными и экспериментальными значениями  $k_{\mu, \text{ср}}$  не превышает 10%.

В вышеприведенных разделах книги рассмотрены особенности протекания токов высокой частоты по кромкам трубной заготовки при сварке, приведены зависимости поправочных коэффициентов, которые позволяют рассчитать активное и индуктивное сопротивление свариваемых кромок и мощность, необходимую для их разогрева до сварочной температуры. Пользуясь этими данными, можно рассчитать электрические параметры сварочного устройства с контактным подводом тока. Для расчета электрических параметров устройств с индукционным подводом тока, которые

нашли широкое применение в промышленности, необходимо дополнительно проанализировать систему индуктор—трубная заготовка.

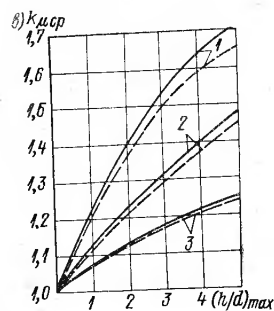
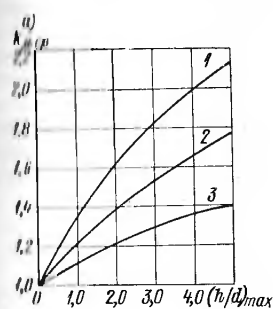
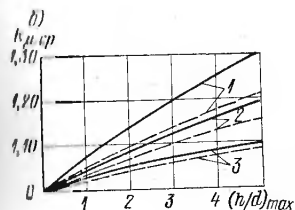


Рис. 49. Значения коэффициентов  $k_{\mu, \text{ср}}$  для ферромагнитных кромок, расположенных под углом: а — без магнитопровода; б и в — с двумя и одним магнитопроводами ( $b/d = 10$  — сплошные линии,  $b/d = 6$  — штриховые линии);

1 —  $I_{\text{КП}}/2d = 15 \cdot 10^4$  А/м; 2 —  $I_{\text{КП}}/2d = 45 \cdot 10^4$  А/м; 3 —  $I_{\text{КП}}/2d = 90 \cdot 10^4$  А/м



## 11. Расчет электрических параметров системы индуктор—трубная заготовка

Несмотря на то что высокочастотная сварка с индукционным подводом тока применяется давно, работ, посвященных созданию методики расчета параметров индуктора, относительно мало. Предложены две методики, в которых используются метод связанных контуров (численный) [28] и схемы замещения [25, 26].

Численный расчет параметров индуктора с использованием метода связанных контуров. Методом связанных контуров можно воспользоваться для расчета параметров индуктора, применяемого для сварки труб из неферромагнитного материала без использования магнитопроводов. Исследуемая система (индуктор—трубная заготовка) разбивается на изолированные один от другого элементы. Поперечное сечение токопроводов каждого элемента принимается настолько малым, что плотность тока в пределах сечения можно считать постоянной. Разбивая наружную и внутреннюю поверхности трубной заготовки на элементы, получаем

два контура I и II (рис. 50, б) с элементарными токами: один образуется токами, протекающими по наружной  $I_{нар}$  и внутренней  $I_{вн}$  поверхностям трубы, а второй — током, протекающим вдоль свариваемых кромок  $I_{кр}$  (рис. 50, б). При этом реальное растекание тока по поверхностям трубной заготовки (рис. 25) заменяется идеализированным (рис. 50, а). Индуктор разбивается также на элементы.

Решение системы уравнений (46) для контуров трубной заготовки и индуктора позволяет получить распределение плотности тока и удельной мощности на поверхностях трубной заготовки

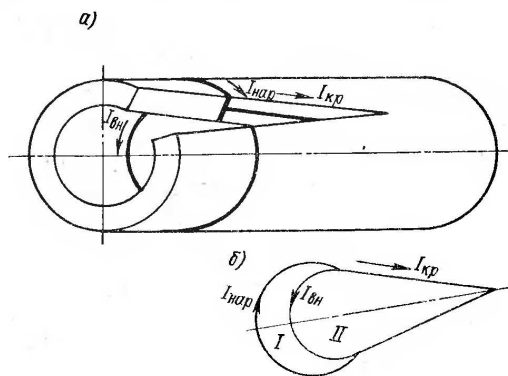


Рис. 50. Идеализированная схема растекания по поверхности трубной заготовки и элемент, состоящий из контуров тока при индукционном подводе тока

и индуктора; эквивалентное активное, индуктивное и полное сопротивление индуктора и мощность сварки, необходимую для разогрева кромок до сварочной температуры; выбрать оптимальные размеры индуктора и место его расположения. Эта методика проверялась при расчете параметров индуктора для сварки труб диаметром 19 мм и толщиной стенки 1 мм из алюминиевого сплава. Результаты расчета на ЭВМ активного и полного сопротивлений приведены на рис. 51, а удельной мощности вдоль кромок на участке от индуктора до места их схождения в плоскости, делящей толщину кромок пополам, — на рис. 52.

С помощью численного расчета установлено, что при увеличении расстояния от индуктора до места схождения кромок эквивалентное сопротивление индуктора растет незначительно, а активное сопротивление при  $l_{кр} \approx (1,5 \div 1,9) D$  имеет максимальное значение.

Удельная мощность при индукционном нагреве так же, как и при контактном, непостоянна по длине кромок. На участке, ближайшем к индуктору, мощность довольно быстро растет за счет снижения зазора между кромками и, главное, за счет увеличения тока, идущего вдоль кромок. На следующем участке ток вдоль кромок не увеличивается и мощность слабо растет за счет снижения зазора между кромками. На участке в зоне схождения кромок удельная мощность резко повышается за счет перераспределения тока.

Расчет параметров индуктора с использованием схем замещения. На основании анализа электромагнитного поля систему индуктор—трубная заготовка можно привести к электрической схеме замещения. Рассмотрим

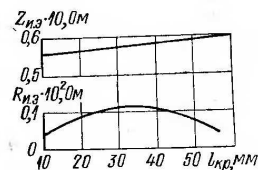


Рис. 51. Зависимость эквивалентных активного  $R_{ак}$  и полного  $Z_{пол}$  сопротивлений охватывающего индуктора при сварке алюминиевой трубы диаметром 19 мм, толщиной стенки 1 мм без магнитопроводов

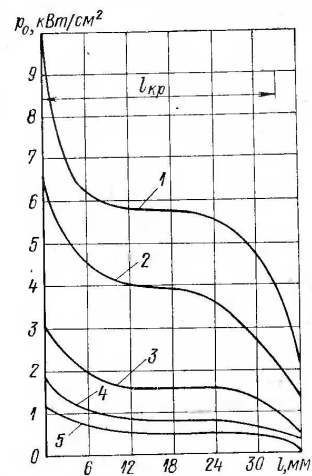


Рис. 52. Распределение удельной мощности  $p_0$  вдоль свариваемых кромок I от места их схождения до переднего торца индуктора для алюминиевых труб диаметром 19 мм с толщиной стенок (мм):

1 — 0,5; 2 — 0,7; 3 — 1; 4 — 1,5; 5 — 2 (Угол схождения кромок  $6^\circ$ , длина индуктора 12 мм)

схемы замещения систем с охватывающим и внутренним индукторами<sup>1</sup>.

1. Система с охватывающим индуктором (рис. 53, а). Индуктивное сопротивление рассеяния  $X_S$ , обусловленное магнитным сопротивлением потоку в зазоре между индуктором и трубной заготовкой, будет

$$X_S = \omega \mu_0 l (D_n^2 - D^2) / (4a_n), \quad (76)$$

<sup>1</sup> Описание конструкции охватывающих и внутренних индукторов дано в гл. III.

где  $D_{вн}$ ,  $D$  — диаметры индуктора (внутренний) и трубной заготовки (наружный), м;  $a_{вн}$  — длина катушки индуктора, м.

Индуктивное сопротивление  $X_{вн}$ , обусловленное магнитным сопротивлением потока индуктора во внешнем пространстве, равно

$$X_{вн} = X_S k_M / (1 - k_M), \quad (77)$$

где  $k_M$  — коэффициент, учитывающий внешнее поле индуктора. Для индукторов, диаметр которых значительно меньше их длины,

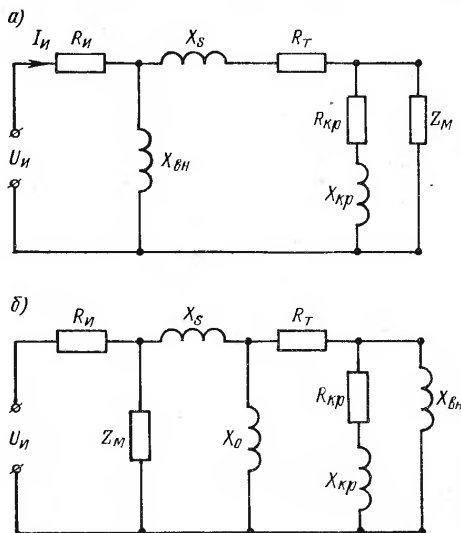


Рис. 53. Схема замещения систем с охватывающим (а) и внутренним (б) индукторами

он равен коэффициенту Нагаока [14]. Значения  $k_M$  для интересующего нас диапазона  $a_{вн}/D = 0,2 \div 1,5$  приведены на рис. 54.

Активные сопротивления одновиткового индуктора  $R_{И}$  и трубной заготовки из немагнитного материала  $R_{Т}$  току, протекающему по ней под индуктором, определяем по формулам:

$$\left. \begin{aligned} R_{И} &= \rho_{И} \pi D_{И} / (\Delta_{И} a_{И}); \\ R_{Т} &= \rho \pi D / (\Delta a), \end{aligned} \right\} \quad (78)$$

где  $\rho_{И}$  и  $\rho$  — удельные сопротивления материалов индуктора и трубной заготовки, Ом·м;  $\Delta_{И}$  и  $\Delta$  — глубины проникновения тока в материал индуктора и трубной заготовки, м;  $a$  — ширина

полосы на трубной заготовке, по которой протекает ток, наведенный индуктором ( $a \approx a_{вн}$ ).

Для труб из ферромагнитного материала

$$R_{Т} = 1,37 \rho \pi D / (\Delta_{\epsilon} a). \quad (79)$$

Комплексное сопротивление  $Z_M$  обусловлено магнитным сопротивлением внутренней полости трубной заготовки из немагнитного материала. Если внутри трубной заготовки нет магнитопровода, сопротивление  $Z_M$  равно

$$Z_M = \rho \pi D_{вн} / (\Delta a_{вн}) + j \omega \mu_0 \pi D_{вн}^2 / (4 a_{вн}),$$

где  $D_{вн}$  — внутренний диаметр трубной заготовки, м;  $a_{вн}$  — ширина полосы (м) на внутренней поверхности заготовки, по которой замыкается часть тока, наведенного на наружной поверхности ( $a_{вн} \approx 2a_{вн}$ ).

Для труб из ферромагнитного материала активная составляющая полного сопротивления может быть рассчитана по формуле

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(Z_M) &= \\ &= 1,37 \rho \pi D_{вн} / (\Delta_{\epsilon} a_{вн}). \end{aligned}$$

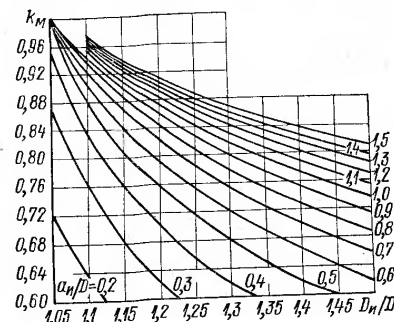


Рис. 54. Зависимость  $k_M$  от  $D_{вн}/D$  при различных  $a_{вн}/D$

Если же внутри трубы располагается магнитопровод, то  $Z_M = \infty$ .

Активное  $R_{кр}$  и индуктивное  $X_{кр, вн}$  сопротивления кромок определяются по методике, изложенной в п. 8. Однако при расчете охватывающего индуктора значение индуктивного сопротивления кромок  $X_{кр, вн}$  необходимо уточнить, используя формулу  $X_{кр, вн} = \omega / (1/L_{вн} - R_{м0})$ , где  $R_{м0} = [2\pi \mu_0 \ln(r_4/r_3)]^{-1}$  — сопротивление магнитному потоку на участке между наружной поверхностью заготовки радиусом  $r_3$  и окружностью радиусом  $r_4$  (см. рис. 33, а). Если наружный магнитопровод не используется, принимается  $r_4 \approx 2,4r_3$ . Сопротивление  $R_{м0}$  необходимо вычитать, иначе окажется, что магнитное сопротивление промежутка (наружный магнитопровод — отрезок окружности, соединяющий наружные углы кромок) будет учтено дважды — при определении  $X_{кр}$  и  $X_S$ .

Параметры свариваемых кромок тонкостенных труб ( $D/2d > 30$ ) могут быть определены без учета их кривизны. При расчете параметров кромок толстостенной заготовки ( $D/2d < 30$ )



следует учитывать кривизну кромок, иначе ошибка расчета может достигать 20%.

Эквивалентные индуктивное и активное сопротивления охватывающего индуктора с трубной заготовкой при учете схемы замещения (рис. 53, а) можно определить, если принять, что  $X_{кр} \gg R_{кр}$  и  $Z_m = \infty$ :

$$X_{и.э} = \frac{X_{вн} (X_{кр} + X_S)}{X_{вн} + X_{кр} + X_S}; \quad (80)$$

$$R_{и.э} = R_n + \frac{R_{кр} + R_T}{\left(1 + \frac{X_{кр} + X_S}{X_{вн}}\right)^2}. \quad (81)$$

2. Система с внутренним индуктором. Как правило, внутренний индуктор размещается либо концентрично по отношению к трубной заготовке, либо, если его диаметр значительно меньше диаметра внутренней поверхности заготовки, со смещением в направлении к свариваемым кромкам. Для снижения потоков рассеяния индуктора применяется компенсатор, который вместе с внутренним индуктором заполняет до 80—90% площади сечения заготовки.

Схема замещения электромагнитной системы внутренних индуктор—трубная заготовка приведена на рис. 53, б. Для этой схемы комплексное сопротивление  $Z_m$  обусловлено сопротивлением магнитопровода внутреннего индуктора, которое с достаточной степенью точности может быть принято равным бесконечности, если индукция в магнитопроводе не превышает допустимых значений. Индуктивное сопротивление  $X_{вн}$  обусловлено магнитным сопротивлением потоку, замыкающемуся вне трубной заготовки. Если сварка ведется с наружным магнитопроводом, можно принять  $X_{вн} = \infty$ .

Индуктивное сопротивление  $X_0$  обусловлено магнитным сопротивлением потоку индуктора на участке между наружной поверхностью магнитопровода внутреннего индуктора и внутренней поверхностью трубной заготовки  $X_0 = \omega/R_{m1}$ . Значение  $R_{m1}$  берется по графику рис. 43, а. Тогда индуктивное сопротивление кромок будет равно

$$X_{кр.вн} = \omega/(1/L_{вн} - R_{m1}).$$

Коэффициент самоиндукции рассеяния внутреннего индуктора с магнитопроводом, располагаемым концентрично по отношению к трубной заготовке, может быть определен по формуле

$$L_S = \mu D_m W^2 \varphi / (4\pi),$$

где  $D_m$  — наружный диаметр магнитопровода внутреннего индуктора, м;  $W$  — число витков индуктора;  $\varphi$  — безразмерный коэффициент, зависящий от геометрических размеров системы.

Значения коэффициента  $\varphi$  в зависимости от  $D_{вн}/D_m$  и  $D_m/a_n$  приведены на рис. 55.

Коэффициент самоиндукции рассеяния внутреннего индуктора, смещенного к свариваемым кромкам, определяется по удельной

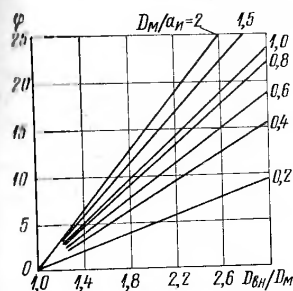


Рис. 55. Зависимость коэффициента  $\varphi$  от  $D_{вн}/D_m$  и  $D_m/a_n$

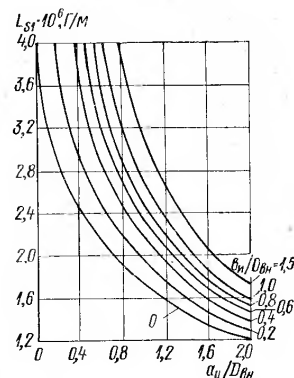


Рис. 56. Зависимость удельной индуктивности рассеяния  $L_{S1}$  внутреннего индуктора с компенсатором от  $a_n/D_{вн}$  и  $b_n/D_{вн}$  ( $b_n$  — длина дуги радиусом  $D_k/2$ , соединяющей у компенсатора кромки полости для индуктора)

индуктивности рассеяния  $L_{S1}$  (на 1 м среднего зазора между внутренней поверхностью трубной заготовки и поверхностью индуктора с компенсатором), значения которой даны на рис. 56. Для схемы замещения (см. рис. 53, б) найдем активное сопротивление  $R_T$  току, наведенному на внутренней поверхности трубной заготовки из немагнитного материала, по формуле

$$R_T = \frac{\rho}{\Delta a_n} [(\pi D_{вн} - b_n) k_T + b_n],$$

где  $b_n$  — длина дуги радиусом  $D_k/2$  ( $D_k$  — наружный диаметр компенсатора), соединяющей кромки полости компенсатора, в которой расположен индуктор. При коаксиальном размещении индуктора коэффициент  $k_T = 1$ , если же он смещен к свариваемым кромкам и применяется компенсатор,  $k_T$  может быть определен по графикам рис. 57.

Найдем активное сопротивление  $R_T$  для труб из ферромагнитного материала, приняв допущение, что ток под индуктором (на участке  $b_n$ ) течет по полосе, равной длине катушки индуктора  $a_n$ ,

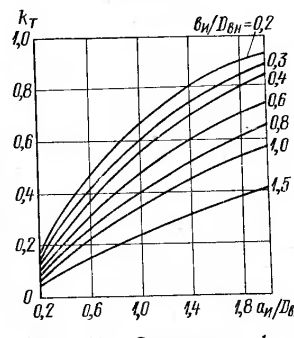


Рис. 57. Зависимость  $k_T$  от  $a_n/D_{вн}$  и  $b_n/D_{вн}$

а под компенсатором ширина этой полосы увеличивается в обе стороны симметрично по линейному закону до ширины, равной длине компенсатора. Тогда

$$R_T = 1,37\rho \sum_{i=1}^{i=n} l_i / (\Delta_{ei} a_i),$$

где  $l_i$ ,  $a_i$  — длина и ширина одного из участков, на которые разбивается периметр трубы;  $\Delta_{ei}$  — глубина проникновения тока на этом участке.

Параметры свариваемых кромок  $X_{кр}$  и  $R_{кр}$  определяются так же, как и при сварке с охватывающим индуктором.

Эквивалентное индуктивное сопротивление внутреннего индуктора найдем по формуле

$$X_{и.э} = X_S + X_{кр} \frac{1}{1 + X_{кр}/X_0}.$$

Эквивалентное активное сопротивление внутреннего индуктора

$$R_{и.э} = R_n + (R_{кр} + R_T) \frac{1}{(1 + X_{кр}/X_0)^2}.$$

В приложении 2 приведены примеры расчетов электрических параметров кромок и индукторов, выполненных в соответствии с предлагаемыми методиками.

### Глава III.

## УСТАНОВКИ ДЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СВАРКИ

Высокочастотные установки с ламповыми генераторами и машинными преобразователями частоты применяются для осуществления процессов сварки давлением с оплавлением и сварки плавлением. Из-за специфики этих процессов и условий, в которых они реализуются, к сварочным установкам предъявляются дополнительные требования, а именно:

строго определенная величина переменной составляющей на выходе высоковольтного выпрямителя и связанное с этим изменение активной мощности, выделяемой в свариваемых элементах; необходимость удаления нагревательного контура от других блоков установки на расстояние 15—20 м;

большая мощность в единице и вследствие этого необходимость применения высоковольтного питания и системы быстродействующей электронной защиты;

автоматическое регулирование режима сварки по одному или нескольким параметрам;

надежность работы в условиях высокой запыленности и при значительных колебаниях температуры окружающей среды.

В этой главе рассматриваются особенности схемных и конструктивных решений высокочастотных сварочных установок отечественного и зарубежного производства.

## 12. Установки с ламповыми генераторами

Установки имеют условные обозначения, содержащие их назначение и принципиальные параметры. Например, обозначение установки типа ВЧС2-160/0,44 ТВМ расшифровывается следующим образом: ВЧ — высокочастотная; С — сварочная; 2 — порядковый номер разработки; 160 — колебательная мощность, кВт; 0,44 — рабочая частота, МГц; Т — для использования в тропическом климате; В — влагоустойчивое исполнение; М — модернизированная.

Основные технические данные установок приведены в табл. 17. Установки выполнены по схеме, представленной на рис. 58. Ниже рассмотрены особенности высоковольтного выпрямителя, лампового генератора и сварочного устройства с системой токоподводов.

**Выпрямитель.** В установках применяются полупроводниковые управляемые выпрямители. В установках, питающихся от сети 380 В, выпрямитель выполнен на диодах, а регулирование осуществляется с помощью тиристоров с низкой стороны силового (анодного) трансформатора. Принципиальная схема выпрямителя с симметричным входом приведена на рис. 59 [3].

Ниже приводятся технические характеристики выпрямителя:

Номинальный выпрямленный ток, А	24
Номинальное выпрямленное напряжение, кВ	11
Диапазон регулируемых напряжений	0,3—1,0 номинального
	0,3—0,9
Диапазон стабилизируемых напряжений	
Нестабильность напряжения на выходе выпрямителя при изменении напряжений силовой сети $\pm 10\%$ от номинального, %	0,1
Коэффициент пульсации выпрямленного напряжения при полном открытии выпрямителя, %	5
Допустимый длительный ток перегрузки, А	28
Напряжение питающей сети, В	380
Частота тока питающей сети, Гц	50—60
Охлаждение:	
тиристоров	Водяное
диодов	Естественное воздушное
Тип и количество (шт.) силовых вентилях:	
тиристоров	ТЛ-200-7; 6
диодов	ВЛ-200-9; 180
Ресурс работы, ч	30 000
Температура окружающего воздуха, °С	1—35
Готовность к работе	Мгновенная

В установках, питающихся от высоковольтного напряжения, применен тиристорный выпрямитель (рис. 60). Так как в настоящее

Параметр	Численное значение параметров установок					
	выпускаемых			намечаемых к выпуску		
	ВЧС-160/1,76	ВЧС-160/0,44	ВЧС-100/0,44	ВЧС-630/0,44	ВЧС-1000/0,44	ВЧС-100/1,76
Напряжение трехфазной питающей сети 50 Гц, В	380	380	6000 или 10 000	6000 или 10 000	6000 или 10 000	380
Мощность, потребляемая от сети, кВт	260	260	630	960	1540	410
Мощность высокой частоты, кВт	160	160	400	630	1000	250
Частота рабочая, МГц	1,76	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
К. п. д. генератора, % (не менее)	70	72	74	74	75	75
Анодное напряжение, кВ	10,5	10,5	11,0	11,5	12	11,5
Ток (на плече), А:						
анодный	11	11	22,5	38,0	50,0	30
сеточный	2,7	2,7	8,0	11,0	16,0	3,5
Тип генераторных триодов	ГУ-23А	ГУ-23А	ГК-5А	ГК-5А	ГУ-65А	ГУ-68А
						ГУ-65А

Продолжение табл. 17

Параметр	Численное значение параметров установок					
	выпускаемых			намечаемых к выпуску		
	ВЧС-160/1,76	ВЧС-160/0,44	ВЧС-100/1,76	ВЧС-630/0,44	ВЧС-1000/0,44	ВЧС-250/0,44
Количество триодов	2	2	4	4	4	1
Стабилизация цепи накала генераторного триода	Есть	Есть	Есть	Есть	Нет	Нет
Точность стабилизации анодного напряжения (%) при колебаниях питающей сети $\pm 10\%$ (не более)	0,1	0,1	1,0	1,0	1,0	0,1
Коэффициент пульсации выпрямленного напряжения при полностью открытом выпрямителе, % (не более)	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0
Расход охлаждающей воды при давлении 2,5—3,0 атм, л/мин	110	110	300	110	550	170
Масса, т	7,5	8,3	24,5	26,1	29,0	7,5
						8,2

Примечание. Для установок ВЧС-100/1,76 и ВЧС-250/0,44 приведена проектная масса.

время выпускаются тиристоры на напряжения до 2 кВ, каждое плечо выпрямителя собрано на последовательно включенных тиристорах с соответствующей схемой управления. Выпрямитель состоит из силового блока, системы управления и систем сигнализации и защиты.

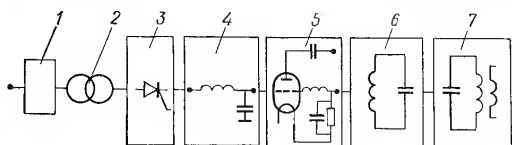


Рис. 58. Общая схема высокочастотной сварочной установки с ламповым генератором:

1 — аппаратура подключения к сети с элементами защиты; 2 — анодный трансформатор; 3 — управляемый анодный выпрямитель; 4 — сглаживающий фильтр; 5 — ламповый генератор; 6 — анодный контур; 7 — нагревательный контур

Силовой блок выпрямителя собран по трехфазной мостовой схеме с шестью управляемыми плечами  $V1—V6$ . Порядковый номер плеча соответствует порядку чередования коммутаций при

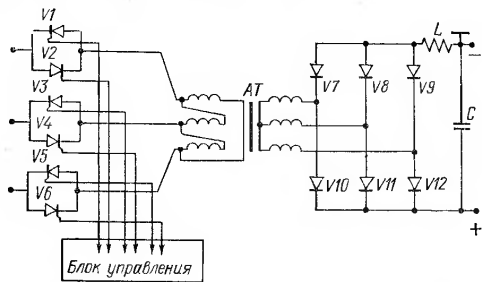


Рис. 59. Схема выпрямителя с тиристорным регулятором на низкой стороне анодного трансформатора:

$V1—V6$  — тиристоры;  $V7—V12$  — диоды;  $AT$  — анодный трансформатор

работе выпрямителя. Все плечи выпрямителя собраны по одинаковой схеме и содержат по 32 последовательно включенных тиристора. Каждый тиристор шунтирован резистором для равномерного деления постоянной составляющей напряжения и цепочкой  $RC$  для снижения перенапряжений при коммутации и равномерного деления переменной составляющей. Последовательно с каждым плечом включены дроссели насыщения 2, служащие для снижения скорости нарастания тока через тиристоры при их включении.

Система управления обеспечивает подачу на плечо выпрямителя импульса управления, синхронизированного с сетью высокого напряжения, при этом импульсы управления каждого последующего плеча сдвинуты относительно импульсов управления предыдущего на  $60^\circ$ . Регулирование величины выпрямленного напряжения осуществляется изменением угла проводимости плеч путем одновременного перемещения импульсов управления относительно линейных напряжений силовой сети. Переменное напряжение на силовую схему выпрямителя подается через трансформаторы тока 1, каждый из них имеет по две вторичные обмотки.

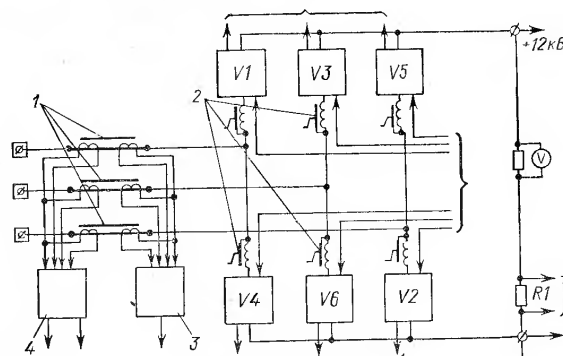


Рис. 60. Схема тиристорного выпрямителя с питанием от высоковольтного напряжения

Одна обмотка используется для подключения амперметров тока нагрузки 4 в каждом плече, другая — от датчика 3 — служит для формирования в случае перегрузки выпрямителя отключающих и предупреждающих сигналов, пропорциональных потребляемому току. Такая система обеспечивает отключение выпрямителя при возникновении аварий как в нагрузке, так и в самом выпрямителе. В каждом плече выпрямителя имеются датчики, от которых в систему защиты поступают напряжения, пропорциональные количеству вышедших из строя тиристоров. Эти напряжения используются для формирования светового сигнала или сигнала на отключение высокого напряжения при пробое тиристоров в любом из плеч выпрямителя. С резисторов  $R1$  снимается сигнал обратной связи для обеспечения режима стабилизации выпрямленного напряжения [27]. Технические характеристики выпрямителей: выпускаемого ныне ВВТ-250/12 и намечаемого к выпуску ПВТ-250/14 приведены в табл. 18.

Таким образом, оба типа выпрямителей, применяемых в высокочастотных сварочных установках, обеспечивают: плавное

Таблица 18. Технические характеристики высоковольтных выпрямителей

Параметр	Численное значение параметров выпрямителей	
	ВВТ-250/12	ПВТ-250/14
Номинальный выпрямленный ток, А	250	250
Номинальное выпрямленное напряжение, кВ	12	14
Диапазон регулирования напряжения	0,1—1,0 номинального	
Диапазон стабилизируемых напряжений	0,5—0,85	0,6—0,9
Нестабильность напряжения на выходе выпрямителя при изменении напряжения силовой сети $\pm 10\%$ от номинального, %	1	1
Коэффициент пульсации выпрямленного напряжения при полном открытии выпрямителя, %	8	8
Допустимый ток перегрузки в течение 30 с, А	$\leq 400$	$\leq 450$
Напряжение силовой сети, кВ	9	10
Напряжение сети собственных нужд, В	380	380
Частота тока силовой сети и сети собственных нужд, Гц	50—60	50—60
Мощность потерь в силовых цепях в номинальном режиме, кВт	$\leq 25$	$\leq 20$
Охлаждение	Принудительное воздушное	
Ресурс работы, ч	30 000	40 000
Уровень акустических шумов при частоте 50—400 Гц, дБ	$\leq 60$	$\leq 80$
Температура окружающего воздуха, °С	1—35	1—35
Масса, кг	$\leq 2200$	$\leq 2000$

регулирование выпрямленного напряжения (а следовательно, и активной мощности в свариваемых изделиях) при постоянной величине его пульсации с частотой 300 Гц; возможность автоматического регулирования и стабилизации выпрямленного напряжения с малой постоянной времени; устойчивую работу в условиях широкого диапазона колебаний температуры окружающего воздуха и малого стартового времени; высокий гарантированный срок службы.

**Ламповый генератор.** Известно, что простота и быстрота согласования параметров нагрузки с параметрами генераторной лампы, устойчивость работы автогенератора при значительном удалении нагревательного контура от остальной его части обеспечиваются только при использовании многоконтурных схем. Ламповые ге-

нераторы, выпускаемые в СССР, выполнены по трехконтурной схеме. Генераторы всех установок, кроме ВЧСЧ-160/0,44, построены по двухтактной схеме включения ламп, позволяющей получить требуемую реактивную мощность за счет повышения напряжения на контуре (рис. 61). Заметим, что все напряжения относительно земли в такой схеме составляют половину от приложенного, и поэтому нет надобности в специальных мерах по повышению электрической прочности ее элементов<sup>1</sup> [8].

Анодный контур генератора состоит из емкостей  $C_4$ ,  $C_5$  и индуктивностей  $L_2$  и  $L_3$ . Эти емкости и индуктивности называются регуляторами мощности. Перемещением короткозамкнутых катушек  $L_4$  и  $L_5$  достигается согласование параметров нагрузки с параметрами генераторных ламп  $\Pi 1$  и  $\Pi 2$ , что позволяет получить требуемую мощность при оптимальном режиме генераторных ламп (табл. 19) и обеспечить высокий к. п. д. генератора (не ниже 72%). Нагревательный контур состоит из емкостей  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$  и высокочастотного трансформатора  $T_1$ , ко вторичной обмотке которого может быть присоединен либо нагревательный индуктор  $L_1$ , либо контактная система токоподвода.

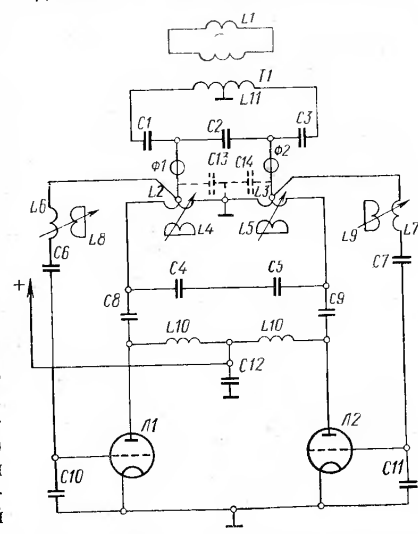


Рис. 61. Двухтактная схема лампового генератора

Анодный и нагревательный контуры соединяются между собой с помощью радиочастотных кабелей  $\Phi 1$  и  $\Phi 2$  длиной 10—25 м. Для повышения напряжения на нагревательном контуре кабели включаются не на весь контур, а на одну секцию конденсаторной батареи  $C_2$ .

Поскольку кабель обладает распределенными индуктивностью и емкостью, во всей колебательной системе, образованной анодным и нагревательным контурами, кроме основной расчетной частоты возможно возникновение более высокой (приблизительно на 40%) частоты, для которой нагревательный контур является практически нулевым сопротивлением. Поэтому при такой

<sup>1</sup> Схема разработана Ю. Б. Вигдоровичем.

Т а б л и ц а 19. Основные технические данные мощных генераторных триодов

Параметр	Численные значения параметров триодов				
	ГУ-23А	ГУ-66А	ГУ-68А	ГУ-65А	ГК-5А
Напряжение накала, В:					
наибольшее	12	14	21	26	18
наименьшее	11,5	13	19	24	16,8
Ток накала, А	195—225	200—250	300—330	640—720	540—610
Наибольший пусковой ток накала, А	315	360	450	820	863
Крутизна характеристики, мА/В	42—56	95—125	115—145	380—620	70—110
Коэффициент усиления	42—57	39—53	30—38	38—56	32—48
Колебательная мощность, кВт	100	100	250	300	250
Наибольшее напряжение анода, кВ	11,0	10	12	12	10
Наибольшая мощность, рассеиваемая анодом, кВт	60	60	130	350	200
Наибольшая мощность, рассеиваемая сеткой, кВт	2,6	1,3	2,3	7,0	10,0
Наибольшая температура баллона и спая с металлом, °С	150	200	175	150	150
Долговечность минимальная, ч	1250	3000	2000	1000	1000
Масса наибольшая, кг	11	16	24	28	19
Габариты максимальные, мм:					
диаметр	230	182	215	245	178
высота	500	420	530	764	790

частоте мощность в нагрузку не поступает и данный режим следует рассматривать как аварийный. Это явление носит название затягивания колебаний и выражается в скачкообразном переходе с одной частоты на другую [8]. Чтобы устранить затягивание, нужно применить такую схему обратной связи, при которой исключалось бы самовозбуждение более высокой частоты. Цепь обратной связи в принятой схеме состоит из индуктивно-емкостных делителей  $L_6$ ,  $L_7$ ,  $C_6$  и  $C_{10}$ ,  $C_7$  и  $C_{11}$ , включенных между точками подключения радиочастотных кабелей к анодному контуру и заземленным катодов генераторных ламп.

Коэффициент обратной связи — отношение напряжения на емкостях  $C_6$  и  $C_7$  к высокочастотному напряжению, вырабатываемому генераторными лампами, — в этой схеме легко регулируется перемещением короткозамкнутых катушек  $L_8$  и  $L_9$ . С рос-

том частоты коэффициент резко падает. Действительно, с ростом частоты увеличивается ток в анодном контуре, увеличивается и падение напряжения на участках индуктивностей  $L_2$  и  $L_3$ , которые включены между анодно-разделительными емкостями  $C_8$  и  $C_9$  и кабелями, т. е. падает напряжение на упомянутых цепях обратной связи. С другой стороны, с ростом частоты увеличивается сопротивление этих цепей, что способствует дальнейшему уменьшению тока в них. Все это приводит к резкому уменьшению напряжения обратной связи на емкостях  $C_6$  и  $C_7$ .

Для более высокой резонансной частоты коэффициент обратной связи настолько мал, что условия ее самовозбуждения нарушаются. Следует отметить, что при отсутствии радиочастотных кабелей эта цепь меняет знак коэффициента обратной связи, т. е. делает принципиально невозможным ее самовозбуждение. Уменьшение волнового сопротивления кабелей приводит к тому же результату. А так как волновое сопротивление параллельно включенных кабелей обратно пропорционально их количеству, то можно в известных пределах компенсировать длину кабельной линии количеством параллельно включенных ветвей.

Для всех типов отечественных коаксиальных радиочастотных кабелей волновое сопротивление примерно одинаково и увеличивается с ростом средней пропускаемой мощности. Поэтому для всех типов сварочных установок мощностью от 160 до 1000 кВт применен один тип кабеля марки РК-50-24-17, а меняется количество параллельных ветвей в зависимости от максимально допустимой длины кабельной линии и мощности установки.

В трехконтурной схеме автогенератора с наличием кабелей  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , по мнению Ю. Б. Вигдоровича, собственная частота системы анодный контур—цепь обратной связи значительно превышает заданную частоту генерации. Поэтому для получения заданной частоты система кабель—контур должна иметь емкостную реакцию, т. е.  $\cos \varphi$  на входе кабеля должен быть низким и, следовательно, ток может превысить допустимый. Чтобы уменьшить ток, на входе кабелей  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  включены емкости  $C_{13}$ ,  $C_{14}$ .

Разработанная схема решает еще одну задачу, связанную с применением радиочастотных кабелей. Распределенная емкость кабелей вместе с индуктивностями регуляторов мощности создает паразитный контур, в котором в принципе также возможно самовозбуждение, т. е. возникновение аварийного режима. Так как в описанной схеме коэффициент обратной связи уменьшается с ростом частоты, возможность аварии устраняется искусственным повышением собственной частоты паразитного контура, что достигается заземлением средней точки нагревательного контура через небольшую индуктивность  $L_{11}$ . Поскольку для паразитной частоты весь нагревательный контур является ничтожно малым сопротивлением, индуктивность  $L_{11}$  оказывается как бы включенной параллельно индуктивностям регуляторов мощности, что и повышает собственную частоту паразитного контура.

Таким образом, рассмотренная схема полностью обеспечивает устойчивую работу лампового генератора при удалении сварочного устройства на весьма значительные расстояния. Одновременно она позволяет обойтись без каких-либо антипаразитных

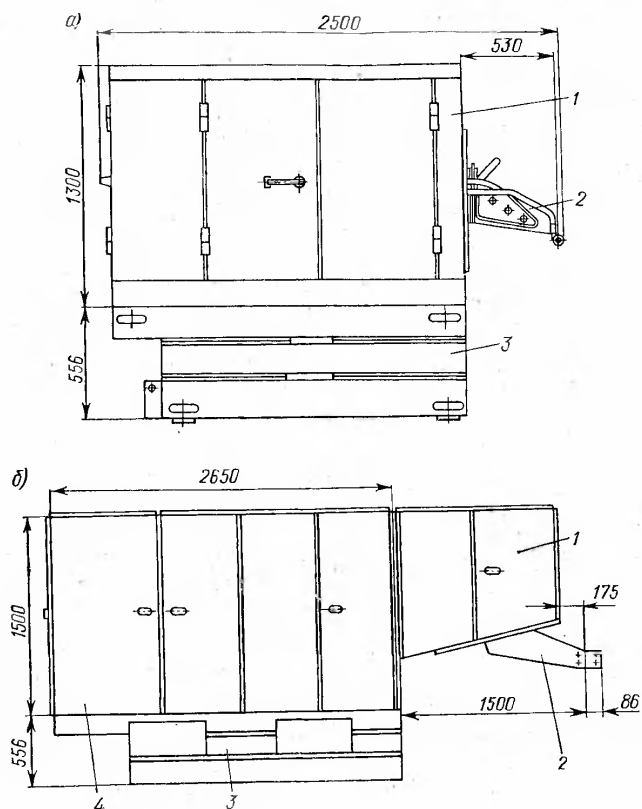


Рис. 62. Сварочные устройства установок мощностью: а — 160 кВт; б — 400, 630, 1000 кВт;

1 — шкаф трансформатора и конденсаторной батареи; 2 — токоподвод; 3 — механизм регулировки; 4 — отсек вентиляторов и конденсаторной батареи

сопротивлений, являющихся источником дополнительных тепловых потерь.

Сварочное устройство (рис. 62). В шкафу сварочного устройства монтируются высокочастотный трансформатор, конденса-

торная батарея и система охлаждения. Оба представленных типа устройств могут работать при индукционной и контактной системах подвода тока к свариваемым элементам. Для наведения и фиксации этих систем относительно свариваемого объекта шкаф сварочного устройства установлен на раме, которая с помощью электропривода может перемещаться вдоль своей оси на 800 мм и поперек на  $\pm 125$  мм. Технические данные керамических высоковольтных конденсаторов сварочных устройств установок с ламповыми генераторами приведены в табл. 20.

Таблица 20. Основные данные керамических высоковольтных конденсаторов

Тип	Номинальное напряжение, В		Номинальная емкость, пФ	Номинальная реактивная мощность, кВ·А	Масса, кг	Габаритные размеры, мм	
	эффективное	постоянного тока				диаметр	высота
K15-11-5600-12-1500	12	16	5 600	1500	6,5	180	212
K15-11-18000-7-1500	7	7	18 000	1500	4,0	180	212
K15Y1a-1500-15-90	15	20	1 500	90	1,0	125	30
K15Y1a-4700-10-130	10	12	4 700	130	1,3	180	30

Примечание. Допустимое отклонение емкости  $\pm 20\%$ ; температурный коэффициент емкости равен  $-1500$ .

Выше было сказано о том, что для нагревательных контуров сварочных устройств характерна большая мощность конденсаторной батареи. Например, для установки мощностью 630 кВт эквивалентная реактивная мощность конденсаторной батареи доходит до 30 тыс. квар. Это создает серьезные трудности при подключении нагревательного контура с помощью кабелей. Одним из путей решения этой задачи является применение нагрузочных трансформаторов с незамкнутым магнитопроводом вместо широко применяемых воздушных. Трансформаторы с ферритным сердечником хорошо зарекомендовали себя при создании первых высокочастотных сварочных устройств, однако мощность их в то время была сравнительно невелика и актуальность задачи не столь значительна [7]. ВНИИТВЧ созданы нагрузочные трансформаторы с ферритовыми сердечниками на частоту 440 кГц для установок мощностью до 1000 кВт (рис. 63).

В новой конструкции трансформатора в качестве изоляции 3 между обмотками применен вспененный полистирол [30]. Он строго фиксирует обмотки относительно друг друга, зазор между витками первичной обмотки 2 и положение ферритового

рис. 65. Неподвижные токоподводы через шины 8 соединены со вторичной обмоткой трансформатора. Шины крепятся на текстолитовых планках 7, которые закреплены на кронштейнах 9.

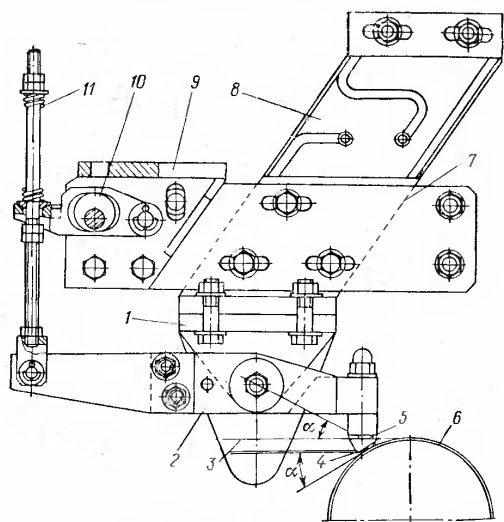


Рис. 64. Кондуктор для подвода тока скользящими контактами



Рис. 65. Сменные контакты с наконечниками из вольфрамовых прутков: а — из одного прутка; б — из пяти прутков; в — из трех прутков, вмонтированных в медный наконечник; 1 — контакт; 2 — наконечник

Планки имеют пазы для смещения шин и изменения расстояния контактов от места сварки. Контакты независимо друг от друга поджимаются к кромкам трубы 6 и полосы 3 с помощью двух пружин 11. Для подъема контактов перед их заменой или опуска-

нием кондуктора в рабочее положение предусмотрены эксцентрики 10, связанные с рукоятками. При сварке спиральношовных труб угол  $\alpha$  между направлением движения кромки и линией, проходящей через ось поворота контакта и контактного пятна вольфрамового наконечника, был принят  $25^\circ$ . В связи с этим ось шарнирного соединения токоподвода, передающего ток к кромке трубы, расположена значительно ниже (на 70 мм) оси шарнирного соединения второго токоподвода.

Для надежной передачи через шарнирное соединение тока 3000—4000 А при частоте 400 кГц усилие сжатия токоподводов должно быть равно примерно 300—350 кгс. Правильный подбор трущихся пар и хорошая смазка исключают задиры, уменьшают момент трения в шарнирном соединении. За счет этого можно применять значительные усилия сжатия торцовых поверхностей и избежать подгаров. За восемь лет эксплуатации кондуктора контактирующие поверхности шарнирного соединения ни разу не подгорели и не были причиной простоя стана. Индуктор и контактная система подключаются к выводам вторичной обмотки трансформатора сварочного устройства.

Основной недостаток любого кондуктора со скользящими контактами — быстрый износ вольфрамовых наконечников, который вызывает частые остановки стана для замены сменных контактов.

2. Кондуктор с вращающимися роликами. Недостатки сварочных устройств со скользящими контактами и в то же время желание использовать преимущества контактного способа подвода тока послужили толчком к разработке системы токоподвода с вращающимися контактными роликами. Было создано специальное сварочное устройство с вращающейся вторичной обмоткой трансформатора, к выводам которой крепятся катящиеся контактные ролики. Как показала практика, сварочное устройство такой конструкции имеет ряд преимуществ: 1) усилия поджима роликов могут быть значительно больше усилий поджима скользящих контактов; 2) участки роликов, испытывающие механические и токовые нагрузки, работают в повторно-кратковременном режиме, что значительно уменьшает их износ; 3) стойкость роликов выше, чем стойкость скользящих контактов.

К недостаткам этой конструкции трансформатора следует отнести увеличение расстояния от контактов до места схождения свариваемых кромок, что приводит к повышению расхода электроэнергии. При изготовлении тонкостенных труб (например, диаметром 203 мм с толщиной стенки 2 мм) увеличение этого расстояния снижает устойчивость кромок. Большая длина коаксиального фидера, соединяющего вторичную обмотку и контактные ролики, также ведет к повышению расхода электроэнергии примерно на 15%.

Впервые сварочный трансформатор с вращающимися контактными роликами, (рис. 66, а и б) был разработан в 1961 г. [38].



Трансформатор состоит из первичной обмотки 1, жестко закрепленной на корпусе 3, и вторичной обмотки 2, размещенной на полом вала 4. Вал на подшипниках имеет возможность вращаться в корпусе. Внутри полого вала пропущен коаксиальный фидер, состоящий из двух токопроводов 5, 6, связывающий вторичную обмотку с контактными роликами 7, 8. С помощью пружины корпус поворачивается вокруг оси и поджимает контактные ролики к кромкам трубной заготовки. Ось поворота закреплена

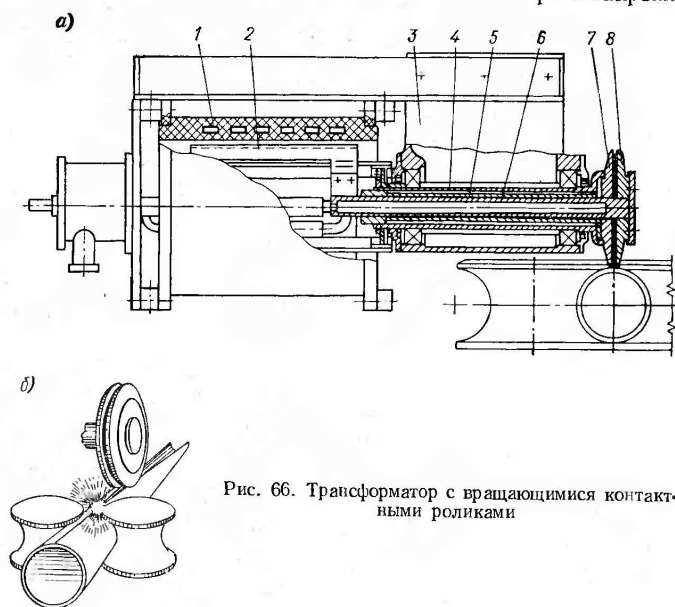


Рис. 66. Трансформатор с вращающимися контактными роликами

на салазках, которые при изменении расстояния от контактных роликов до места схождения кромок движутся по направляющим. Один раз в смену контактные поверхности роликов протачиваются по форме свариваемой трубы. Чтобы операцию проточки можно было выполнять без снятия роликов, трансформатор снабжен приводом для вращения роликов и суппортом для крепления резца и регулировки его положения. Привод вращения роликов снабжен обгонной муфтой, которая позволяет остановить двигатель привода, не разъединяя его механизма.

Трансформатор с вращающимися контактными роликами с 1964 г. эксплуатируется на стане 51-152 (рис. 67) для сварки труб диаметром 89 мм, толщиной стенки 4 мм. В качестве источника питания используется ламповый генератор мощностью

400 кВт, частотой 440 кГц. Контактные ролики расположены на расстоянии 100 мм от оси шовсжимающих валков. Усилие поджима роликов к кромкам составляет примерно 1000 кгс. Контакт между роликами и кромками стабилен и достигается за счет упругого прогиба кромок. Отмечено улучшение качества формовки и повышение стабильности кромок в зоне сварки.

**Компоновка и размещение установок.** Все высокочастотные установки с ламповыми генераторами имеют блочное исполнение (рис. 68 и 69). Конструкция блоков унифицирована для установок,

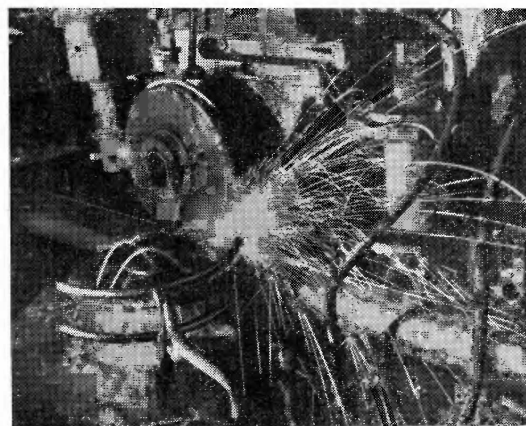


Рис. 67. Сварка вращающимися контактными роликами

близких по мощности. В установках мощностью 400, 630 и 1000 кВт все блоки, кроме блока выпрямителя и сварочного устройства, а также мощностью 160 кВт, исключая сварочное устройство, имеют одностороннее обслуживание. Блоки генераторные анодного контура и сварочные выпускаются со встроенной системой водовоздушного охлаждения. Выпрямитель ВВТ-250/12 (ПВТ-250/14) снабжается специальным блоком охлаждения, в котором смонтирован вентилятор и теплообменник.

Ламповые генераторы установок мощностью 400, 630 и 1000 кВт построены по двухтактной схеме, причем в каждом плече параллельно работает по две генераторные лампы. Каждое плече параллельно работающих ламп смонтировано в отдельных блоках. Соответствующим образом смонтированы в отдельных блоках регуляторы мощности, регуляторы обратной связи и конденсаторные батареи. Поэтому, как показано на рис. 69, в состав

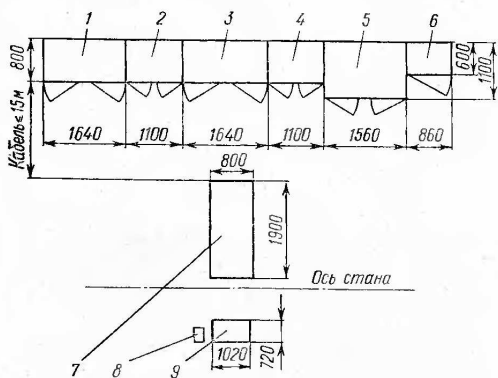


Рис. 68. Установки ВЧС1-160/1,76 и ВЧС4-160/0,44, состоящие из блоков:

1 — генераторного; 2 — анодного контура; 3 — анодного трансформатора; 4 — выпрямителя; 5 — фильтра; 6 — управления; 7 — сварочного устройства; 8 — фотопрометрического регулятора; 9 — пульта управления

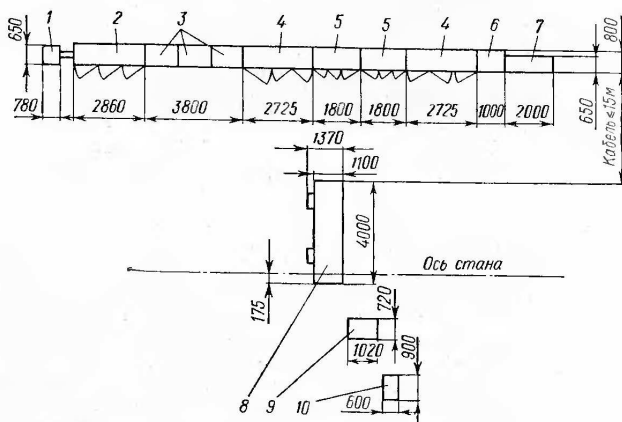


Рис. 69. Расположение блоков высокочастотной сварочной установки ВЧС1-630/0,44:

1 — охладитель; 2 — выпрямитель; 3 — фильтр; 4 — генераторный блок; 5 — анодный контур; 6 — гридлик; 7 — стабилизаторы; 8 — сварочное устройство; 9 — пульт управления; 10 — пульт автоматики

установок входит по два генераторных блока, блока контуров и блока гридликов. Монтируются они рядом, в положении, указанном на рис. 69. Длина кабеля от блока контуров до сварочного устройства не должна превышать 15 м и для каждого плеча одинаково. Расположение других блоков в некоторой степени произвольно, однако удобнее блоки выпрямителя и фильтра монтировать вместе, так как электрически они соединяются с помощью высоковольтного кабеля. Общая длина установок мощностью 400, 630 и 1000 кВт соответственно равна 19 110, 20 310 и 20 330 мм. Генераторный блок и блок контуров установок мощностью 160 кВт также монтируются вместе. Блок контуров установки частотой 440 кГц должен находиться от сварочного устройства на расстоянии не более 18 м, а установки частотой 1760 кГц — не более 12 м. Конструкции блоков установок мощностью 400, 630 и 1000 кВт полностью унифицированы. Произведена унификация и установок мощностью 160 кВт, частотой 440 и 1760 кГц.

**Особенности установок с ламповыми генераторами зарубежных фирм.** Номенклатура установок, выпускаемых крупными зарубежными фирмами, приведена в табл. 22. С начала 70-х годов все фирмы применяют полупроводниковые высоковольтные выпрямители взамен ранее применявшихся выпрямителей на газоразрядных приборах. Фирмы «Рэдайн», «Электротитинг», «Сименс», и «Герматул» применяют высоковольтные полупроводниковые неуправляемые выпрямители. Регулирование мощности, передвигаемой в заготовку, ведется с помощью нагрузочного трансформатора, а в некоторых случаях ступенчато на анодном трансформаторе. Например, анодные трансформаторы фирм «Ельфиак» и «Сименс» имеют отпайки с высокой стороны, позволяющие получать напряжение, равное 100, 90, 80, 70 и 60% от номинального. Анодные трансформаторы заполнены негорючими, взрывобезопасными жидкостями: пиранол (США); клофен (ФРГ) пирален (Франция). Фирмы «Токко», «Синтра» и «Броун-Бовери» предлагают в своих установках систему: тиристорный регулятор с низкой стороны — выпрямитель на диодах с высокой. Фирма «Броун-Бовери» применяет эту систему в установках мощностью до 400 кВт, а в установках большей мощности использует неуправляемый высоковольтный выпрямитель на диодах.

Фирма «Токко» предлагает систему низковольтный тиристорный регулятор — высоковольтный полупроводниковый выпрямитель для установок мощностью до 1000 кВт. В то же время неизвестны случаи поставок этой фирмой установок мощностью более 300 кВт. Установки фирм «Ельфиак» и «Синтра» мощностью 900 и 1000 кВт в конце 1969 г. поставлялись с газотронными выпрямителями. Поставки высокочастотных сварочных установок с тиристорными высоковольтными выпрямителями не зафиксированы.

В ламповых генераторах установок мощностью до 400 кВт применяется параллельная схема включения генераторных

Таблица 22. Мощности  $P$  (кВт) и частоты  $f$  (кГц) высокочастотных сварочных установок с ламповыми генераторами, выпускаемых зарубежными фирмами

Фирма	$P$	$f$	Фирма	$P$	$f$	Фирма	$P$	$f$
«Терматул» (США)	140	450	«Синтра» (Франция)	70	450	АЭГ—элотерм (ФРГ)	60	500
	280	450		145	400		120	460
	560	450		200	350		220	400
«Токко» (США)	70	400		350	350		300	360
	100	350		600	300		500	350
	140	320	1000	300	«Рэдайн» (Англия)	50	400	
	200	300	«Броун-Бовери» (Швейцария)	60		500	80	400
	250	280		100		500	100	350
	350	250		130		450	150	300
	500	240		200		400	250	180
700	220	220		350	«Электрохитинг» (Англия)	180	400	
1000	210	250	350	200		400		
«Ельфиак» (Бельгия)	50	400	300	300		250	350	
	80	400	350	300		350	300	
	100	350	400	250		400	260	
	125	325	500	260	500	250		
	150	350	600	200	«Жель» (Япония)	80	300	
	210	300	700	200		150	300	
	320	450	900	200		200	300	
	420	400	1000	200		300	200	
	600	300	«Сименс» (ФРГ)	60		450	600	200
	900	250		100	330			
	150	150		300				
	250	250		330				
	350	350		300				
	500	350	500	350				
	700	300	700	300				

нового генератора до сварочного трансформатора с конденсаторной батареей. Поэтому при мощности установок до 150—180 кВт ламповый генератор составляет единую конструкцию со сварочным устройством и устанавливается непосредственно на сварочной машине агрегата (например, установки фирмы «Ельфиак»). При большей мощности установок сварочный трансформатор встраивают в сварочную машину без конденсаторной батареи (в генераторах фирм «Терматул», «Рэдайн», «Электрохитинг», «Синтра», «Жель»). Расстояние от лампового генератора до трансформатора ограничено 2—3 м.

Как видно из табл. 22, борьба с неустойчивостью работы мощных автогенераторов во всех без исключения фирмах идет по пути понижения рабочей частоты генератора. Отсюда более чем двухкратный разбег рабочей частоты у установок мощностью от 100 до 1000 кВт. Сварочные устройства фирм «Терматул» и «Броун-Бовери» поставляются как с индукционной, так и с контактной системами подвода тока. Остальные фирмы поставляют сварочные устройства только с индукционными системами.

Фирмы «Ельфиак», «Электрохитинг», «Броун-Бовери», и «Рэдайн» в сварочных устройствах мощностью более 200—250 кВт применяют сварочные трансформаторы с плавно изменяющимся коэффициентом связи между обмотками, что позволяет регулировать мощность, передаваемую к свариваемым элементам. Фирма «Сименс» применяет сварочные трансформаторы с регулированием числа витков обмоток: на низкой стороне — ступенчатым (4 ступени) и с высокой стороны — плавным, бесступенчатым.

Все фирмы, кроме «Ельфиак» и «Терматул», применяют керамические высоковольтные конденсаторы большой реактивной мощности, как правило, горшкового типа. Охлаждение осуществляется пропусканьем воды во внутреннюю полость конденсатора через штуцера, вмонтированные в пробку корпуса. Конструкция неразборная. Пробка с корпусом соединена синтетической резиной. Как правило, строго лимитирована температура входящей воды (25—30°). Передача энергии от генератора к сварочному устройству осуществляется с помощью коаксиального фидера или шинпровода. При этом сварочные устройства, устанавливаемые на сварочных машинах, не могут перемещаться относительно свариваемого объекта, что усложняет и затрудняет наведение и фиксацию систем токоподвода.

Как видно из приведенных данных, в СССР и за рубежом созданы разнообразные специализированные высокочастотные установки с ламповыми генераторами для сварки металлов. Одно из основных требований к ним — высокая надежность — обеспечена применением новых схемных и конструктивных решений и использованием современной электронной аппаратуры. Эти работы сыграли значительную роль в повышении технического уровня установок и для других электротермических процессов.

триодов, при большей мощности — двухтактная. При этом используются генераторные триоды с водяным (фирмы «Терматул», «Токко», «Жель») или испарительным (фирмы «Ельфиак», «Рэдайн», «Электрохитинг», «Синтра», «Броун-Бовери») охлаждением анода. Фирмы, применяющие триоды с испарительным охлаждением анода, рекламируют следующие их преимущества:

уменьшение расхода охлаждающей воды примерно вдвое по отношению к триодам с водяным охлаждением анода;

возможность кратковременных больших перегрузок по мощности, рассеиваемой анодом;

удобство и быстрота монтажа лампы на баке без болтового крепления по фланцу; уплотнение достигается за счет массы лампы, которая в 2—2,5 раза больше, чем у обычных.

Все фирмы стремятся применять только одноконтурные схемы генераторов. Так как индуктивной ветвью колебательного контура в таком генераторе служит первичная обмотка сварочного трансформатора, всегда строго лимитировано расстояние от лам-

### 13. Установки с машинными преобразователями частоты

Серия сварочных установок с машинными преобразователями имеет условные обозначения, содержащие их назначение и технические параметры. Например, обозначение установки

ИС1-1000/10 расшифровывается следующим образом: ИС — индукционная сварочная; 1 — порядковый номер разработки; 1000 — мощность высокочастотного генератора, кВт; 10 — частота тока, кГц.

На рис. 70 приведена типовая схема установки серии ИС.

Несколько высокочастотных генераторов включаются в параллельную работу на общие шины распределительного устройства. К этим же шинам подсоединяются одна или две сварочные головки. Каждый генератор может включаться и отключаться независимо вручную разьединителем без нагрузки и дистанционно контактом под нагрузкой. Вводить генераторы в параллельную работу рекомендуется поочередным их включением на холостом ходу (когда сварочная головка отключена от сборных шин) и при снятом возбуждении. Когда все генераторы будут подключены, на них одновременно подается ток возбуждения. Сварочная головка подключается после того,

стоянным установленное на шинах напряжение с точностью  $\pm 10\%$ . В отдельных случаях напряжение можно задавать по программе.

Схемой предусмотрено измерение мощности, коэффициента мощности, тока и напряжений обмоток статора и возбуждения генераторов, напряжений на последовательной емкости и сборных шинах, коэффициента мощности, напряжений на индукторе и последовательной емкости сварочной головки. Посредством токовых реле и реле напряжений осуществляется защита от перегрузок по току и напряжению обмоток статора и возбуждения генератора, линии передачи от сборных шин и элементов сварочной головки. Дополнительно в схеме имеется защита от внезапных резких перенапряжений в силовой цепи установки. Такие перенапряжения обычно появляются в случае коротких замыканий на участке цепи за последовательной емкостью генераторов ( $C_T$ ) или повреждений индуктора. В обоих случаях генераторы оказываются включенными только на емкость, в силу чего возникает режим самовозбуждения, сопровождающийся резким возрастанием напряжения. Напряжение генератора повышается настолько быстро, что система защиты с обычными реле напряжения не успевает срабатывать. Поэтому в установках предусмотрена защита посредством разрядника. Разрядник пробивается и закорачивает обмотки генератора в момент, когда напряжение на них превысит в 1,5—2 раза номинальное значение. Одновременно замыкаются первичная обмотка трансформатора тока, включенная в цепь разрядника, и токовое реле защиты. При срабатывании токовых реле и реле напряжений с генераторов снимается ток возбуждения и они отключаются от сборных шин.

Разрядник конструктивно состоит из двух медных пластин, разделенных изоляционной прокладкой обычно из слюды. В середине прокладки имеется отверстие диаметром 20—25 мм. Толщина изоляции выбирается в зависимости от допустимого напряжения. Для разрядника, рассчитанного на пробивное напряжение 1200—1600 В (рабочее напряжение генератора 800 В), рекомендуется толщина изоляции из слюды 1 мм. Пластины и изоляционная прокладка зажимаются болтами между текстолитовыми плитами. Изоляция должна выступать на 5—10 мм за края медных шин для исключения пробоя по торцовым поверхностям. Приводные двигатели генераторов подключаются к сети 50 Гц посредством типовых ячеек комплексных распределительных устройств. Построение схемы установки позволяет легко изменять ее мощность и осуществлять резервирование. Во ВНИИТВЧ разработаны установки ИС1-1000/10, ИС1-1500/10, ИС1-2000/10, и ИС1-3000/10. Все они выполнены на основе преобразователей ОПЧ-250-10, каждый мощностью по 250 кВт, частотой 10 000 Гц.

На графиках рис. 71 приведены максимальные скорости сварки, которые могут быть обеспечены на установках серии ИС при подаче тока охватывающими индукторами. Графики построены по

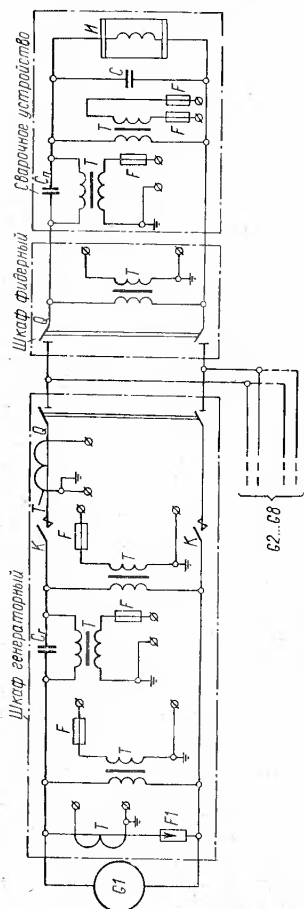


Рис. 70. Типовая схема установки серии ИС с машинными преобразователями частоты:

Г1—Г3 — машинные преобразователи частоты; С<sub>п</sub> — последовательная емкость преобразователя; К — контактор; Q — разьединитель; С<sub>т</sub> и С — последовательная и параллельная емкости сварочного устройства; И — индуктор; Т — трансформатор напряжения и тока; F1 — разрядник; F — предохранитель

как на сборных шинах установится нужное напряжение. Возбуждение генераторов осуществляется от специального тиристорного возбудителя-регулятора, который поддерживает по-

данной фирмы «Ельфияк». Приведем пример определения возможной скорости сварки трубы диаметром 426 мм с толщиной стенки  $2d=8$  мм на установке ИС-1500/10. Вначале по кривой рис. 71, а для трубы диаметром 180 мм находят скорость  $v=40$  м/мин. Затем по кривой рис. 71, б определяют коэффициент снижения скорости  $k_c=0,6$  для трубы диаметром 426 мм. Максимально возможная скорость сварки трубы диаметром 426 мм будет  $40 \cdot 0,6 = 24$  м/мин, а приведенная мощность —  $7,8$  кВт/(мм·м/мин)

Режимы сварки при индукционном подводе тока внутренним индуктором на установках серии ИС даны в табл. 23. Приведенная мощность для трубы диаметром 426 мм с толщиной стенки 8 мм в этом случае почти в два раза меньше, чем при использовании охватывающих индукторов. Необходимые мощности установок серии ИС в зависимости от скорости сварки можно приближенно

Таблица 23. Режимы сварки стальных прямошовных труб на установках серии ИС индукционным способом внутренним индуктором

Тип стана	Количество швов	Тип установки	Диаметр труб, мм	Толщина стенки, мм	Размер индуктора, мм	Число витков	Длина катушки, мм	Скорость сварки, м/мин	Приведенная мощность $P_0$ , кВт/(мм·м/мин)
203-530	1	ИС1-1500/10	203—219 219—325	4—6 4—6	156 180	5 5	200 230	40—80 35—80	3,75—3,0 4,0—3,0
530-820	1	ИС1-1000/10	325—530 530—820	6—10 6—12	230 160 × ×180	4 4	230 230	28—80 14—30	4,3—3,0 5,6—4,6
1020-1220	2	ИС2-2000/10	1020— 1220	8—15	160 × ×180	4	230	10—20	(6,8 ÷ 6,2) 2
1220-1620	2	ИС1-4000/10	1220— 1620	8—20,5	190 × ×200	3	300	8—24	(6,0 ÷ 4,8) 2 (8,0 ÷ 6,2) 2

Примечания: 1. Для стана 203-530 использовались индукторы цилиндрической формы, для остальных станов — прямоугольной. 2. На стане 1220-1620 перед сваркой технологического шва с кромок снимались наружные фаски высотой около половины толщины стенки заготовки под углом 45°, поэтому приведены значения мощности для кромок со снятыми фасками и без фасок.

определить, пользуясь графиком, приведенным на рис. 72. Определим, например, мощность установки для сварки трубы диаметром 426 мм и толщиной стенки  $2d=8$  мм со скоростью  $v=24$  м/мин. Приведенную мощность можно принять равной  $p_0=4,5$  кВт/(мм·м/мин). Тогда мощность установки должна быть не менее  $P=p_0 2dv=4,5 \cdot 8 \cdot 24 \approx 860$  кВт. Следовательно, для сварки этой трубы можно использовать установку ИС1-1000/10.

**Машинные преобразователи.** До настоящего времени главным источником тока средней частоты остаются машинные преобразователи. Основные их достоинства — простота конструкции, а

следовательно, высокая надежность в работе и легкость обслуживания, не требующего высококвалифицированного персонала; возможность включения нескольких преобразователей в параллельную работу; сравнительно низкая стоимость, особенно при больших мощностях. К недостаткам преобразователей относятся: уменьшение к. п. д. при неполной загрузке и высокие потери холостого хода, что приводит к повышенному среднему расходу электроэнергии в режиме работы высокочастотной установки. Шум, сложность системы смазки, водоохлаждения и монтажа,

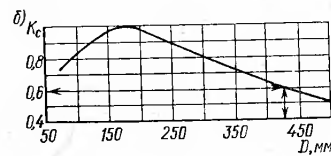
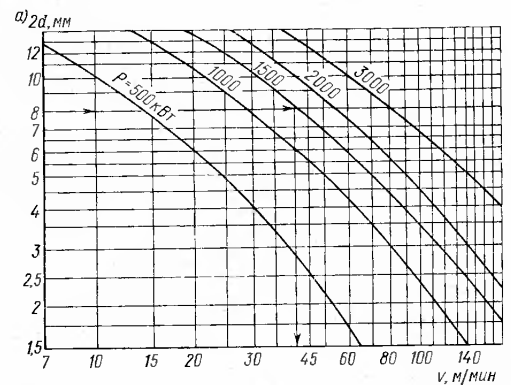


Рис. 71. Зависимость скорости сварки  $v$  от мощности  $P$  и толщины стенки  $2d$ : а — для труб диаметром 180 мм; б — для труб, диаметры которых отличаются от 180 мм

которые были характерны для машинных преобразователей, успешно преодолены в последних конструкциях.

Преобразователь частоты состоит из генератора и трехфазного приводного двигателя, питающегося от сети 50 Гц. Генератор средней частоты относится к типу индукторных машин, которые, как и синхронные, возбуждаются постоянным током. Однако, если у синхронных машин обмотки возбуждения и рабочие обмотки переменного тока перемещаются относительно друг друга при вращении ротора, то в индукторных машинах изменение взаимосвязи между обмотками происходит за счет вращения ферромагнитной массы ротора. Поэтому ротор в этих машинах обмоток не имеет. Ротору придана зубчатая форма, как у явнополусной синхронной машины.

Для электротермических установок применяются разноименно-полюсные (гетеропольные) генераторы и практически только в однофазном исполнении. При вращении ротора за время перемещения его на один полюсный шаг в проводнике каждого полюса статорной обмотки происходит полный цикл изменения напряжения. Следовательно, число полюсных шагов равно числу зубцов ротора, а частота получаемого напряжения  $f = zn/60$ , где  $z$  — число зубцов ротора;  $n$  — число оборотов ротора в минуту.

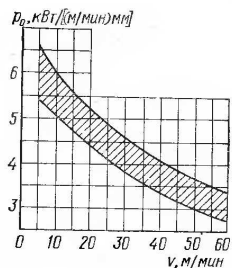


Рис. 72. Зависимость приведенной мощности  $p_0$  от скорости сварки  $v$  труб диаметром от 200 до 1000 мм. Частота тока 10 кГц. Подвод тока осуществляется внутренним индикатором

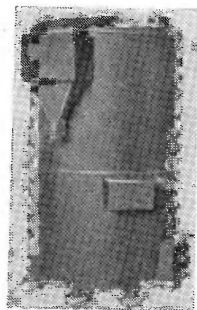


Рис. 73. Преобразователь частоты серии ОПЧ

Напряжение машинных генераторов регулируется от нуля до максимума изменением тока в обмотке возбуждения. Ток возбуждения небольшой, и для его регулирования не требуется сложной аппаратуры. В установках для высокочастотной сварки применяются машинные преобразователи типа ОПЧ-250-10.

Преобразователи этой серии (рис. 73) — однокорпусные, вертикальные, закрытые, состоят из индукторного генератора и приводного трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. В нижней части расположен статор генератора, в верхней — статор двигателя. Сердечники роторов имеют один общий вал. Роторный вал опирается на подшипники качения, имеющие автономную смазку: верхний — консистентную, нижний — жидкую. Верхний подшипник изолирован, что устраняет опасность появления подшипниковых токов.

Охлаждение преобразователей — воздушно-водяное с замкнутым циклом по воздуху и разомкнутым по воде. Охлаждение воздуха осуществляется встроенными в корпус воздухоохладителями. Преобразователи устанавливаются на виброизолирующих опорах без какого-либо крепления к фундаменту. Они оборудованы аппаратурой контроля температуры охлаждающей воды, воздуха,

подшипников и concentричности воздушного зазора. Генераторы допускают перегрузку по току 150, 140, 130 и 120% в течение 30, 40, 60 и 120 с соответственно.

Благодаря значительному уменьшению механических потерь к. п. д. их при недогрузках по мощности снижается очень мало. Например, при нагрузке 70% к. п. д. ОПЧ-250-10 снижается только на 3%. По своим технико-эксплуатационным показателям преобразователи серии ОПЧ находятся на уровне лучших мировых образцов.

Технические характеристики преобразователя ОПЧ-250-10 в целом, а также его генератора и двигателя приведены ниже.

#### Преобразователь

Полезная мощность, кВт	250
Потребляемая мощность, кВт	305
К. п. д., %	82
Скорость вращения (рабочая/синхронная), об/мин	2980/3000
Расход охлаждающей воды, м³/ч	4,8
Время пуска, с	18
Высота, мм	1980
Диаметр, мм	1144
Масса, кг	4710

#### Генератор

Частота (рабочая/синхронная), кГц	10/10,1
Напряжение, В	800
Ток, А	329
cos φ	0,95
Ток возбуждения, А	4—6
Напряжение возбуждения, В	102—154
Последовательная емкость, мкФ	5,7
Номинальное напряжение на конденсаторах, В	915
Напряжение на обмотках генератора, В	1010

#### Двигатель

Частота, Гц	50
Напряжение, В	6000/3000
Ток, А	32,6/65,2
cos φ	0,9
Пусковой ток при номинальном напряжении, А	170/340

Машинные преобразователи имеют ряд особенностей, которые необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации электротермических, в том числе и сварочных установок. В первую очередь это относится к характеристикам холостого хода и короткого замыкания и параллельной работы генераторов. Характеристика холостого хода имеет максимум напряжения. Это означает, что при достижении этого максимума дальнейшее увеличение тока возбуждения не будет давать эффекта. Ток короткого замыкания, в силу того, что внутреннее сопротивление

обмотки статора генератора с повышением частоты увеличивается, даже при полном токе возбуждения не больше, а часто даже меньше номинального. Поэтому от индукторного генератора трудно получить номинальную мощность при активной и особенно индуктивной нагрузках. По этой причине в электротермических установках проектируется нагрузка с опережающим коэффициентом мощности. По этой же причине в некоторых конструкциях преобразователей с частотой 4000 Гц и выше и, в частности, типа ОПЧ-250-10 последовательно с обмоткой генератора включена емкость  $C_r$  (рис. 74, а), являющаяся как бы составной частью

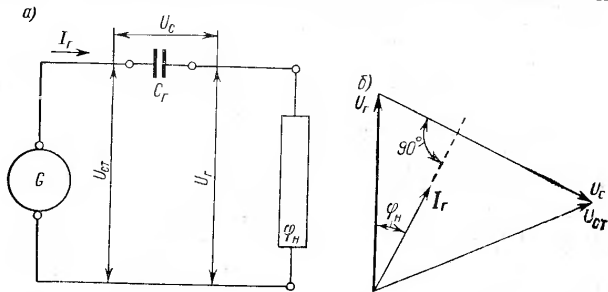


Рис. 74. Схема генератора с последовательной емкостью (а) и диаграмма напряжений (б)

генератора. Сопротивление  $X_C$  емкости  $C_r$  полностью или частично компенсирует индуктивное сопротивление обмотки статора генератора:  $X_d \approx E_{x,з} I_{к,з}$ .

Ток короткого замыкания генераторов с последовательной емкостью равен  $I_{к,з} \approx U_r / (X_C - X_d)$  и резко возрастает, а при полной компенсации достигает аварийных значений. Поэтому величина последовательной емкости выбирается из расчета  $X_C = 0,6 X_d$  и указывается в паспорте преобразователя. Номинальное напряжение генератора  $U_r$  получают уже за последовательной емкостью. Напряжение на выводах статорной обмотки  $U_{ст}$  отличается от номинального и зависит от величины последовательной емкости (от напряжения  $U_C$ ) и  $\cos \varphi_n$  (рис. 74, б).

На рис. 75 показано изменение напряжения  $U_{ст}$  генератора частотой 8000 Гц, напряжением 600 В при токе 292 А и  $X_d = 2,3 \text{ Ом}$  с последовательной емкостью  $C_r = 8,7 \text{ мкФ}$  (сопротивление  $X_C = 10^6 / 2\pi f C_r = 2,3 \text{ Ом}$ ) при различных  $\cos \varphi_n$ . Напряжение  $U_r$  остается постоянным (условие полной компенсации  $X_d = X_C$ ), в то время как  $U_{ст}$  изменяется и может достигнуть опасных значений  $U_{ст2}$  в случае емкостного характера нагрузки  $\cos \varphi_2$ .

Экспериментальные исследования показали, что при включении на параллельную работу индукторных генераторов с асинхронными и синхронными приводами не требуются какие-либо

специальные синхронизирующие устройства. Однако следует отметить некоторые особенности их ввода на параллельную работу.

1. При включении генераторов на холостом ходу частоты включаемых генераторов одинаковы, но напряжение на сборных шинах не равно напряжению подключаемого в параллельную работу нового генератора. На шинах устанавливается какое-то среднее напряжение. По обмоткам статоров обоих генераторов течет уравнивающий ток. Так как уравнивающий ток является реактивным, то он не нагружает первичные двигатели и не является опасным для параллельной работы. Однако у генераторов с последовательной емкостью уравнивающие токи могут достигать больших значений и потому рекомендуется включать их без возбуждения.

2. Если генераторы включаются под нагрузкой (привод асинхронный), их частоты в момент включения не одинаковы. Вследствие разности частот после включения наблюдаются биения напряжения. Биения проходят тем медленнее, чем ближе между собой частоты:  $\Delta f = z/60 [n_c (s_2 - s_1)]$ , где  $z$  — число зубцов ротора;  $n_c$  — число оборотов в минуту на холостом ходу;  $s_1$  и  $s_2$  — скольжения приводных двигателей.

Биение напряжения вызывает биение тока  $I_C$ , отстающего от  $\Delta E_C$  по фазе почти на  $90^\circ$ . В отличие от уравнивающего тока ток биения может составлять с напряжениями на шинах и подключаемого генератора угол сдвига от 0 до  $90^\circ$ , т. е. имеет активную составляющую, и не только загружает генератор током, но и создает дополнительные нагрузки, влияющие на режим работы приводных двигателей. Вновь включаемый генератор, у которого в первый момент  $s_1 = 0$ , при несовпадении мгновенных значений этих напряжений принимает на себя повышенную нагрузку. В результате возникают сильные механические удары и параллельная работа генераторов может нарушиться. Если этого не произойдет, то число оборотов подключенного генератора уменьшится, частоты сблизятся, биения исчезнут. Практика показывает, что высокочастотные генераторы, как правило, легко входят в синхронный режим. Уже через 2—3 с после включения биения прекращаются, но все равно генератор, у которого приводной

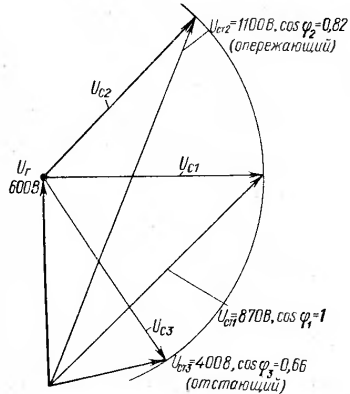


Рис. 75. Диаграмма напряжений при полностью скомпенсированном индуктивном сопротивлении обмоток генератора с последовательной емкостью

двигатель имеет меньшее скольжение, принимает большую нагрузку.

**Сварочное устройство.** Сварочное устройство оформлено в виде специального блока (головки), к которому подключается система токоподводов. Сварочное устройство предназначено для согласования параметров генератора и загрузки (индуктор + нагреваемые кромки), чтобы обеспечить передачу индуктором необходимой мощности в пределах номинальных данных генератора. Согласованию подлежат коэффициенты мощности и напряжения. Для этого в сварочном устройстве имеются конденсаторы, автотрансформаторы или другие средства согласования. Наиболее распространенная типовая схема сварочного устройства представлена на рис. 76. Конденсаторы  $C$ , подключенные параллельно индуктору  $I$ , образуют колебательный контур, который и является

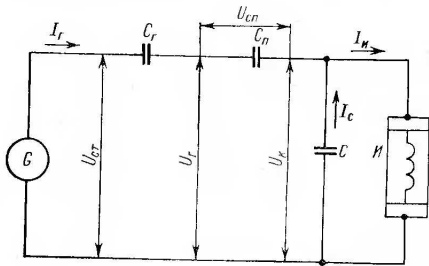


Рис. 76. Типовая схема сварочного устройства

загрузкой для генератора. Необходимость согласования коэффициентов мощности вызвана тем, что электромагнитная система индуктор—кромки (колебательный контур) имеет низкий коэффициент мощности  $\cos \varphi_n = 0,1 \div 0,25$ .

Генератор может развивать мощность  $S_g = U_g I_g \cos \varphi_g$ , где  $U_g$ ,  $I_g$  и  $\cos \varphi_g$  — номинальные значения напряжения, тока и коэффициента мощности генератора.

Для нагрева используется мощность генератора  $P_{ак} = U_n I_n \cos \varphi_n$ , где  $\cos \varphi_n$  — угол сдвига между напряжением и током индуктора. Практически всегда  $\cos \varphi_g$  близок к единице и, следовательно, для нагрева используется только малая часть мощности генератора, подключенного непосредственно к индуктору с низким  $\cos \varphi_n$  — активная составляющая, а большая ее часть — реактивная составляющая — не используется. Реактивная мощность в виде энергии магнитного поля запасается в индуктивности контура и генератора, бесполезно загружая его и линию передачи реактивным током, увеличивая общие потери в цепи генератор—загрузка.

Для устранения этого недостатка необходимо дополнительными средствами повысить (согласовать) коэффициент мощности

индуктора (загрузки) до  $\cos \varphi_g$ , т. е. практически довести его до единицы. Таким согласующим средством в высокочастотных установках является конденсаторная батарея. В этом случае энергия, запасенная в магнитном поле индуктора, передается конденсатором, переходя в энергию электрического поля. Реактивный ток замыкается только в контуре, если реактивные сопротивления индуктора и конденсаторов равны. При этом контур в целом (индуктор и конденсаторная батарея) представляет для генератора активную нагрузку. Это выполняется, если мощность конденсаторной батареи  $Q_C \approx P_g \operatorname{tg} \varphi_n$ .

Таким образом, согласование коэффициентов мощности сводится практически к подбору емкости колебательного контура. Для этого в сварочном устройстве до 30% конденсаторов присоединяются посредством рубильников или контакторов, что позволяет легко увеличивать или уменьшать емкость. Согласование проводят, пользуясь фазометром, подбирая такую емкость, чтобы коэффициент мощности на фазометре был близок к единице. Кроме коэффициента мощности контур (загрузка) характеризуется сопротивлением  $Z_k$ . Сопротивление загрузки определяется конфигурацией, размерами и числом витков индуктора и параметрами нагреваемых кромок (толщиной, длиной, углом схождения). Следовательно, требуемую для нагрева мощность (ток) можно передать только при определенном напряжении на индукторе. С другой стороны, генератор развивает паспортную мощность при номинальных значениях тока и напряжения, когда загрузка имеет приведенное к генератору сопротивление  $Z_k = U_{гн}/I_{гн}$ .

Если после согласования коэффициентов мощности загрузка генератора по мощности не может быть получена, то необходимо согласовать сопротивления контура и генератора. При номинальном напряжении ток генератора мал, если сопротивление  $Z_k$  велико.

В установках серии ИС согласование сопротивлений производят изменением величины последовательной емкости. При уменьшении емкости ее сопротивление увеличивается и, следовательно, напряжение на контуре возрастает, хотя напряжение генератора остается без изменения. Одновременно с уменьшением последовательной емкости необходимо уменьшать и емкость параллельную, чтобы сохранить постоянным коэффициент мощности нагрузки для генератора.

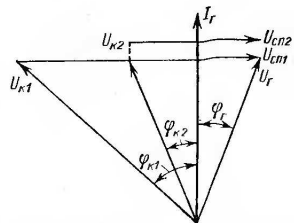


Рис. 77. Диаграмма, поясняющая настройку типовых сварочных установок



Для расчета последовательной емкости  $C_{п2}$  или  $C_{п1}$  (рис. 77) можно использовать следующие выражения:

$$U_k \cos \varphi_k = U_r \cos \varphi_r; \quad (82)$$

$$U_{Cп} = U_k \sin \varphi_k \pm U_r \sin \varphi_r. \quad (83)$$

Если требуется снизить напряжение на контуре от  $U_{к1}$  до  $U_{к2}$ , то параллельную емкость нужно изменить (увеличить) так, чтобы

$$\cos \varphi_{к2} = U_{к1} \cos \varphi_{к1} / U_{к2}. \quad (84)$$

Тогда напряжение на последовательной емкости уменьшится до

$$U_{Cп2} = U_r \sin \varphi_r + U_{к2} \sin \varphi_{к2}, \quad (85)$$

а реактивная мощность последовательной конденсаторной батареи также снизится до

$$P_{Cп2} = U_{Cп2} I_r. \quad (86)$$

Мощность последовательных конденсаторов после пересчета на их номинальное напряжение  $U_{C0}$  будет

$$P_{C0п2} = P_{Cп2} (U_{C0} / U_{Cп2})^2. \quad (87)$$

Зная мощность одного конденсатора, легко найти количество конденсаторов, которое должно быть подключено для любого режима. Согласование или, как часто называют, настройку установки с последовательной емкостью следует проводить осторожно. До настройки желательно сделать предварительный расчет по формулам (82)–(87).

Для примера произведем такой расчет для установки мощностью 1500 кВт, частотой 10 кГц, имеющей следующие параметры:  $U_r = 800$  В,  $I_r = 2000$  А,  $\cos \varphi_r = 0,95$  (опережающий),  $U_k = 1000$  В,  $U_{C0} = 1000$  В.

В соответствии с формулами (84), (83), (86) и (87) получаем:

$$\cos \varphi_{к1} = 800 \cdot 0,95 / 1000 = 0,76 \text{ (отстающий);}$$

$$U_{Cп1} = 1000 \cdot 0,65 + 800 \cdot 0,3 \approx 900 \text{ В;}$$

$$P_{Cп1} = 900 \cdot 2000 \cdot 10^{-3} = 1800 \text{ квар;}$$

$$P_{C0п1} = 1800 (1000/900)^2 \approx 2200 \text{ квар.}$$

Количество последовательных конденсаторов при мощности каждого в 400 квар:  $n_{Cп} = 2200/400 = 5,5 \approx 6$ .

Максимально допустимый ток нагрузки (по последовательным конденсаторам)  $I = 5 \cdot 400 = 2000$  А.

Процесс настройки рекомендуется проводить при хорошо отрегулированной защите от перенапряжений (через разрядник) в следующем порядке.

Установить индуктор в рабочее положение относительно кромок свариваемой трубной заготовки; подключить в сварочном устройстве количество конденсаторов, которое определено предварительным расчетом; замкнуть последовательную емкость; включить нагрузку и проверить по фазометру  $\cos \varphi$ , он должен

быть в нашем примере близким к 0,76 (отстающий). Затем нужно включить последовательную емкость, нагрузку и проверить напряжение на контуре (индукторе), которое должно быть около 1000 В при напряжении на генераторе 800 В и  $\cos \varphi_r = 0,95$  (опережающем).

Напряжение на последовательной емкости не должно превышать номинальных значений конденсаторов при токе генератора 2000 А.

Если напряжение на индукторе окажется недостаточным (ниже 1000 В) и отбираемая мощность мала, необходимо откорректировать настройку. Для этого постепенно (по секциям конденсатора) увеличивают параллельную емкость до тех пор, пока напряжение на индукторе не достигнет 1000 В. Затем уменьшают последовательную емкость до установления  $\cos \varphi_r = 0,95$  (опережающего). Может оказаться, что при напряжении на контуре 1000 В ток от генератора будет больше номинального (более 2000 А), и, следовательно, при его номинальном значении отобрать полную мощность от генератора нельзя (поскольку тогда придется снизить напряжение генератора). Это означает, что полное сопротивление нагрузки оказалось меньше расчетного, а число витков индуктора взято меньше, чем требуется. Чтобы и в этом случае настроить установку на полную мощность, следует произвести переключение (изменение) параллельной и последовательной емкостей. Рекомендуется вначале, уменьшая возбуждение генератора, установить напряжение, при котором отбираемый от него ток становится нормальным (2000 А); после этого уменьшить постепенно (секциями) величину последовательной емкости до тех пор, пока напряжение генератора не повысится до номинального (800 В). Затем так же увеличить параллельную емкость до установления  $\cos \varphi_r = 0,95$  (опережающего).

Рассмотрим, как следует изменить емкости, чтобы уменьшить на индукторе напряжение с  $U_{к1} = 1000$  В до  $U_{к2} = 800$  В, сохранив при этом отбираемую от генератора мощность. Расчет проведем для тех же параметров установки:  $U_r = 800$  В,  $I_r = 2000$  А,  $\cos \varphi_r = 0,95$  (опережающий). Тогда по формулам (84)–(87) получим:

$$\cos \varphi_{к2} = 1000 \cdot 0,76 / 800 = 0,95 \text{ (отстающий);}$$

$$U_{Cп2} = 800 \cdot 0,35 + 800 \cdot 0,35 = 480 \text{ В;}$$

$$P_{Cп2} = 480 \cdot 2000 \cdot 10^{-3} = 960 \text{ квар;}$$

$$P_{C0п2} = 960 (1000/480)^2 = 4000 \text{ квар.}$$

Количество последовательных конденсаторов с номинальным напряжением 1000 В и мощностью 400 квар следует увеличить до  $n_{Cп2} = 4000/400 = 10$ .

**Системы токоподводов.** На всех установках частотой 10 кГц применяется индукционный подвод тока охватывающим или внутренним индукторами. Во ВНИИТВЧ экспериментально проверена возможность применения контактной системы, аналогично

используемой в установках с ламповыми генераторами, хотя практического применения она пока не нашла.

При сварке с частотой 10 кГц применялись охватывающие многовитковые цилиндрические индукторы. Однако на трубо-сварочных станах для сварки труб среднего диаметра при этой частоте невозможно установить охватывающий индуктор достаточно близко к месту схождения кромок. В этом случае применяется индуктор с клином (рис. 78, а), наличие которого несколько снижает коэффициент использования мощности, выделившейся в трубе, но снижает тепловые потери и, следовательно, повышает эффективность нагрева кромок. Многовитковые индукторы подключаются непосредственно к выходным шинам сварочной головки.

Главное достоинство охватывающих индукторов — простота изготовления и надежность в работе. Но отечественная практика

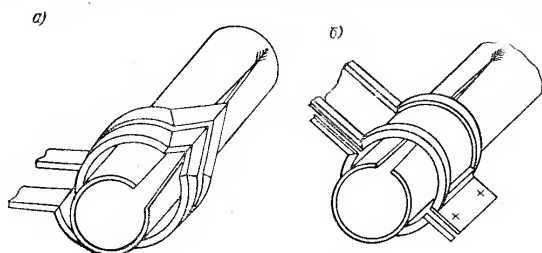


Рис. 78. Охватывающие цилиндрические индукторы: а — с клином; б — съемный

и опыт зарубежных фирм (например, «Ельфиак») показали, что установки с охватывающим индуктором имеют ряд серьезных недостатков, особенно для сварки труб большого диаметра: значительный нагрев валков шовосжимающей клетки; трудность защиты индуктора от повреждений в случае разрыва шва, стыкующего рулоны; невозможность установки индуктора в оптимальное положение из-за больших размеров валков шовосжимающей клетки; отсутствие разъема, что затрудняет монтаж охватывающего индуктора при его замене (в индукторе, показанном на рис. 78, б, в какой-то мере устранен этот недостаток); высокий расход электроэнергии (большая приведенная мощность), возрастающий с увеличением диаметра свариваемых труб.

В 1964 г. профессор А. Е. Слухоцкий предложил нагревать кромки трубной заготовки при сварке наружным линейным индуктором, индуктирующий провод которого нормален к оси шва, изогнут по форме трубной заготовки и охватывает только часть ее периметра. Этот индуктор можно использовать при сварке труб или других замкнутых изделий, периметр которых достаточно велик, и в тех случаях, когда применение охватывающего индук-

тора нецелесообразно из-за больших потерь мощности. К его недостаткам можно отнести: значительные размеры валков шовосжимающей клетки, не позволяющие разместить индуктор на оптимальном расстоянии от места схождения кромок; расположение валков шовосжимающей клетки (так же, как при использовании охватывающего индуктора) в поле рассеяния индуктора, в результате чего они разогреваются.

Развивая эту конструкцию, ВНИИТВЧ разработал индуктор<sup>1</sup>, индуктирующие проводники которого также нормальны к оси сварного шва и связаны только с частью периметра свариваемой трубы, но сам индуктор размещается внутри трубы (рис. 79). Магнитопровод 1 набран из листовой трансформаторной стали, катушка 2 выполнена из профилированной медной трубки. Длина

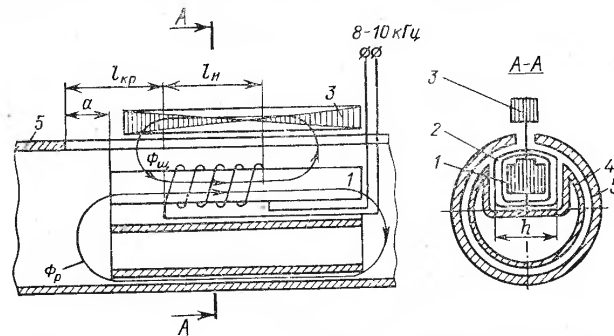


Рис. 79. Взаимное расположение трубы, внутреннего индуктора и наружного магнитопровода

магнитопровода должна быть в три—пять раз больше длины катушки. Поперечное сечение катушки представляет собой сегмент, дуга которого обращена к свариваемым кромкам и приблизительно коаксиальна трубной заготовке 5.

Внутренний и охватывающий индукторы работают по одному принципу. Ток, наведенный в трубной заготовке, доходит до свариваемых кромок и замыкается через место их схождения. На участке периметра трубной заготовки, находящемся в непосредственной близости от активных проводников катушки, ток течет по полосе, ширина которой равна примерно длине катушки. На других участках периметра ширина этой полосы растет и плотность тока падает. Наименьшая плотность тока наблюдается на линии, диаметрально противоположной щели. Потери мощности в трубной заготовке определяются в основном потерями мощности на участке периметра, находящемся в непосредственной близости от катушки индуктора.

<sup>1</sup> Авт. свид. № 285733.

Внутренний индуктор по сравнению с охватывающим имеет существенные преимущества: потери в теле трубной заготовки значительно слабее зависят от диаметра трубной заготовки; длина зоны нагрева свариваемых кромок может быть выбрана оптимальной с точки зрения технологии сварки, расхода электроэнергии и независимо от размеров валков шовообжимной клетки; поток рассеяния индуктора замыкается внутри трубной заготовки и нагрев шовообжимных валков снижается; при аварийном изменении трубной заготовки (раслой металла полосы, разрыв стыкового шва, соединяющего рулоны) вероятность повреждения индуктора ниже.

К недостаткам внутреннего индуктора следует отнести: сложность изготовления; необходимость подводить электроэнергию и охлаждающую воду через щель между кромками; трудность создания защиты магнитопровода от брызг расплавленного металла и искр, выбрасываемых из зоны сварки.

При разработке конструкции внутреннего индуктора проводились исследования соотношений между размерами отдельных элементов на его работоспособность и эффективность процесса сварки. Установлено, что ширина индуктора  $h$  существенно влияет на эффективность нагрева. Увеличение его ширины повышает электрический к. п. д., но приводит к резкому росту потерь в теле трубной заготовки, т. е. уменьшает коэффициент использования энергии, выделившейся в трубной заготовке. Результирующий к. п. д. системы падает. При уменьшении ширины индуктора уменьшается часть тока, которая, протекая вдоль кромок трубной заготовки, замыкается через место их схождения. Поэтому ширина индуктора должна быть не меньше  $(0,6 \div 1)I_{кр}$  и достаточно большой, чтобы передать требуемую мощность.

Высоту внутреннего магнитопровода следует выбирать равной его ширине, а длину катушки индуктора  $l_{и}$  — равной или несколько больше  $l_{кр}$  (обычно 200—300 мм). Длина выступающего из индуктора конца магнитопровода должна быть примерно равна или несколько больше его высоты (100—130 мм). Уменьшение длины конца магнитопровода, выступающего за катушку, приводит к повышению индукции и перегреву боковых его пакетов, а увеличение его длины более чем в 1,2—1,4 раза по сравнению с высотой также нежелательно, поскольку увеличивает длину нагреваемых кромок.

Длину магнитопровода следует брать равной примерно 600—700 мм, чтобы длина заднего выступающего из индуктора конца магнитопровода была в три-четыре раза больше длины переднего. Уменьшение длины магнитопровода приводит к увеличению тока шунтирования, проходящего вдоль кромок в сторону, противоположную от места их схождения, и замыкающего по внутреннему диаметру трубной заготовки. Однако длина магнитопровода свыше 700 мм не приводит к существенному повышению эффективности процесса и поэтому нецелесообразна.

Расстояние от переднего конца индуктора до места схождения кромок желательно иметь минимальное, чтобы повысить долю тока, замыкающегося через место схождения кромок. Однако уже при расстоянии 50 мм наблюдается снижение надежности магнитопровода, на который попадают брызги расплавленного металла и искры, выбрасываемые из зоны схождения кромок. Для повышения срока службы индуктора его передний торец обильно охлаждают водой. Магнитный поток, проходящий через щель между кромками, наводит на кромках сварочный ток. Отношение потока, замыкающегося через щель между кромками  $\Phi_{щ}$ , к полному потоку, проходящему по магнитопроводу, представляет собой параметр  $k_{эф}$ , который характеризует эффективность внутреннего индуктора (например, для трубы диаметром 720 мм он равен 0,24—0,26).

Для уменьшения потока рассеяния  $\Phi_p$ , снижения потерь мощности в магнитопроводе и электрического сопротивления индуктора применен компенсатор 4 (рис. 79). Компенсатор выполняется из высокоэлектропроводного материала и вместе с индуктором заполняет почти все поперечное сечение трубной заготовки. Компенсатор не следует делать сплошным, а достаточно по форме его наружной поверхности изогнуть медный лист. Использование компенсатора диаметром 500 мм при высокочастотной сварке трубы диаметром 720 мм повышает  $k_{эф}$  индуктора до 0,25—0,28.

Чтобы снизить магнитное сопротивление потоку  $\Phi_{щ}$ , иногда применяют наружный магнитопровод 3. Использование магнитопровода и компенсатора при сварке трубы диаметром 720 мм повышает  $k_{эф}$  до 0,33—0,38. Сечение наружного магнитопровода принимают равным 40—50% от сечения внутреннего магнитопровода индуктора. Магнитопровод и пенал, в котором он расположен, обматывают стеклотканью и пропитывают эпоксидными компаундами. Внутренний индуктор имеет значительное рассеяние, поэтому потери мощности в магнитопроводе довольно велики (до 70—100 кВт). Это не ухудшает общий энергетический баланс, однако магнитопровод нужно весьма интенсивно охлаждать водой.

Система охлаждения магнитопровода выполнена замкнутой. Охлаждающая вода поступает со стороны штанги, к которой индуктор присоединен своим задним концом, и возвращается по элементам, которые во время работы индуктора не нагреваются. Как уже было отмечено, в процессе работы из-за попадания на магнитопровод брызг расплавленного металла эпоксидные компаунды выгорают, герметичность переднего торца магнитопровода нарушается и охлаждающая вода попадает в свариваемую трубу. Попадание воды в трубу является аварийным. Вода разбавляет эмульсию, которой охлаждаются механизмы стана. Сварщик, заметив нарушение герметичности индуктора, должен остановить стан. Индуктор подлежит ремонту. Для восстановления индуктора, как правило, достаточно только обмотать стеклотканью обожженное

место и пропитать эпоксидными компаундами. Необходимо следить, чтобы в магнитопроводе при протекании воды не образовывалось воздушных пузырей. Для этого трубки, по которым охлаждающая вода возвращается из индуктора, должны собирать воду из его верхней части, с тем чтобы весь магнитопровод находился в воде. Для этого сливные трубки, отводящие воду от шлангов, должны монтироваться на 0,5—1,0 м выше индуктора.

Предлагаются и другие конструкции токоподводов, которые пока не нашли применения в практике. Среди них, например, индуктор кольцевого или петлевого типа, охватывающий только место схождения кромок<sup>1</sup>. Такой индуктор может располагаться внутри трубы. Возможна схема с двумя индукторами, расположенными один внутри, а второй снаружи трубной заготовки. Институтом электросварки им. О. Е. Патона предложен индуктор с двумя полюсами магнитопровода, между которыми проходят свариваемые кромки. В магнитопроводе возбуждается переменный магнитный поток средней частоты посредством многовитковой катушки. Под действием этого потока в трубной заготовке индуцируется ток, который вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости концентрируется на свариваемых кромках.

**Комплектуемое оборудование и аппаратура.** В сварочных установках с машинными преобразователями используется большое количество комплектующего оборудования и аппаратуры серийного изготовления.

1. Шкафы станций управления. Аппаратура управления размещается в специальных шкафах, условно обозначаемых ШТЕ. Конструктивно они выполнены в виде шкафов двустороннего обслуживания, различаются по назначению, току и частоте. Высота шкафов 2400 мм. Длина (глубина) 800 мм. В установку входит следующий комплект шкафов.

Шкаф силовой генераторный ШТЕ-9911 (ШГ) предназначен для подключения генератора ОПЧ-250-10 к сборным шинам. Ширина шкафа 1300 мм. В шкафу (см. рис. 70) установлены: контактор *K*, разъединитель *Q*, разрядник *F1*, измерительные приборы и реле токовой защиты генератора, трансформаторы тока и напряжений *T* для измерительных приборов и обратной связи, последовательные конденсаторы *C<sub>r</sub>*. Контактор *K* высокочастотный, серии К1000, типа К1122, открытого исполнения, двухполюсный. Характеристика контактора приведена ниже.

Номинальный ток, А . . . . .	400
Напряжение, В:	
номинальное . . . . .	1600
главной цепи . . . . .	800
втягивающей катушки от источника постоянного тока . . . . .	220
Охлаждение . . . . .	Воздушное (естественное)

<sup>1</sup> Авт. свид. № 105861.

Разъединитель *Q* серии ВЛДФ, типа ВЛДФ-2-400, двухполюсный с центральной рукояткой, имеет следующие данные:

Номинальный ток, А . . . . .	400
Напряжение, В . . . . .	До 2000
Охлаждение . . . . .	Воздушное (естественное)

Шкаф обратной связи ШТЕ-9900 (ШОС) шириной 800 мм применяется в схемах централизованного питания для защиты от перенапряжений на сборных шинах и снятия с них напряжения сигнала обратной связи для тиристорного возбудителя. В нем же смонтированы реле защиты по току и напряжению.

Шкаф защиты и контроля (ШЗК) предназначен для контроля двигателя и генератора преобразователя. Ширина шкафа 800 мм.

Шкаф управления генератором (ШУГ) шириной 800 мм служит для размещения измерительных приборов, сигнальных табло, кнопок управления и др. Разработан на те же параметры (токи), что и шкафы силовые генератора, и получает питание от измерительных трансформаторов.

Шкаф возбуждения (ШВ) шириной 800 мм комплектуется тиристорным возбудителем РВТ-10 или РВТ-63. В каждом шкафу установлено по два возбудителя: один — рабочий, второй — резервный. Резервный может подключаться на ходу. Возбудители типа РВТ-10 и РВТ-63 — тиристорные. Они одновременно являются регуляторами, автоматически поддерживающими напряжение на сборных шинах (генераторе). Ниже приводятся их характеристики:

	РВТ-10	РВТ-63
Ток, А . . . . .	10	63
Напряжение, В:		
постоянного тока . . . . .	20—180	20—180
номинальное . . . . .	120	120
обратной связи . . . . .	25—100	25—100
однофазной питающей сети 50 Гц . . . . .	220	220
Точность стабилизации, % . . . . .	±1	±1

Шкаф фидерный (ШФ) шириной 800 мм служит для подключения к сборным шинам сварочного устройства. В шкафу (см. рис. 70) установлены разъединитель *Q* типа ВЛДФ-3000 двухполюсный с центральной рукояткой, номинальным током 3000 А и напряжением 2000 В (охлаждение водяное) и трансформатор напряжения *T* для измерительных приборов, находящихся на пульте управления сварщика.

Используя шкафы станции управления можно создать установку по различным схемам питания и на любую мощность. На рис. 80 показана компоновка установки для сварки двухшовных труб.

Шкафы силовые поставляются в виде секций в комплекте со сборными шинами, которые монтируются над шкафами. Длина секции не более 4 м. При монтаже секции соединяются в цельное распределительное устройство. Типы шкафов в секциях и их количество согласуются при заказе в соответствии с проектом.

Таблица 24. Характеристика конденсаторов серии ЭСВ

Тип	Емкость, мкФ	Напряжение, В	Количество выводов
ЭСВ-0,5-10	25,5	500	2
ЭСВ-0,8-10	9,96	800	2 или 4
ЭСВП-0,8-10	9,96	800	5

Конденсаторы ЭСВ-0,5-10 и ЭСВ-0,8-10 можно подключать на напряжение соответственно 1000 и 16000 В при последовательном соединении секций.

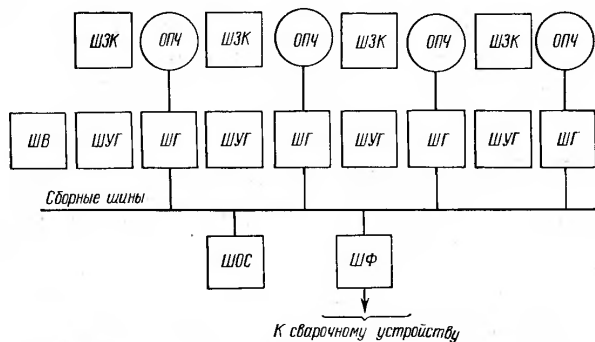


Рис. 80. Компоновка сварочной установки мощностью 1000 кВт

3. Кабель. Для передачи тока от генератора к сварочному устройству используют кабель марки КВСП, высокочастотный, специальный, коаксиальный (ТУ16-505-264-71). Ниже приводится его характеристика:

Ток при частоте, А:	
2,4 кГц	400
10 кГц	300
Напряжение, В	2000
Наружный диаметр, мм	43
Толщина полиэтиленовой изоляции, мм	3
Стронтельная длина, м	125
Температура окружающего воздуха, °С	25—40
Радиус изгиба, мм (не менее)	750

Кабель предназначен для укладки в кабельных каналах закрытых помещений. Монтаж допускается производить при температуре не ниже 0° С. Кабель следует прокладывать на специальных лотках, исключая его пережимы и промины. Параметры кабеля приведены в табл. 25.

Таблица 25. Параметры кабеля КВСП длиной 1 м

Частота, кГц	Ток, А	Z, Ом	R, Ом	X, Ом	φ, ... °	ΔU <sub>a</sub> , В	Потери, Вт
2,4	400	0,00102	0,000517	0,00087	59,5	0,207	82,8
10	300	0,00326	0,000897	0,00313	74,0	0,27	81,0

**Требования к системе охлаждения и размещению оборудования.** Высокочастотные генераторы, конденсаторы, понижающие трансформаторы, индуктор, шинопроводы, а в отдельных случаях и конструктивные элементы необходимо интенсивно охлаждать. Система водоснабжения в большинстве случаев определяет надежность работы установки в целом: выход из строя ее элементов чаще всего наблюдается при засорении каналов охлаждения грязью, накипью. Расходы, связанные с охлаждением, составляют значительный процент от общих затрат. Опыт показывает, что лучшей системой охлаждения является замкнутая система: вода из градирни или резервуара насосами подается для охлаждения и затем возвращается обратно. Заметим, что вода из всех охлаждаемых элементов должна возвращаться самотеком через открытые сливные воронки, доступные для визуального наблюдения. Температура охлаждающей воды должна поддерживаться в пределах 15—25° С. При температуре воды ниже 15° С наблюдается отпотевание (конденсация паров из окружающего воздуха) на всех металлических элементах, что резко снижает надежность установки в целом, а особенно токоведущих частей, находящихся под напряжением. Характеристика воды, которую можно применять при охлаждении, приведена ниже:

Температура воды на выходе, °С (не выше):	
индукторов, шинопроводов, генераторов	50
конденсаторов	40
Давление воды, кгс/см <sup>2</sup>	3
Механические примеси, мг/л	20—40
Минеральные примеси, <sup>1</sup> мг·экв/л	3
Фактор pH	5—7,5

Расход воды указывается в паспорте оборудования. Трубопроводы системы охлаждения желательно выполнять из оцинкованных труб, а все шланги — из бессажевой резины.

<sup>1</sup> 1 мг·экв/л соответствует наличию в воде 28 мг CaCO<sub>3</sub>.

Помимо общих правил размещения электротехнических устройств при проектировании высокочастотных установок должен быть соблюден ряд дополнительных требований, учитывающий особенности их работы: сварочная головка обязательно должна размещаться вблизи стана (индуктора), чтобы как можно короче был соединяющий шинопровод; преобразователи вместе с пусковыми устройствами, шкафами станций управления и аппаратурой автоматики желательнее устанавливать в специальных помещениях.

Шкаф управления следует устанавливать вблизи сварочного стана или дублировать основные приборы измерения и регулятор тока возбуждения на пульте управления сваркой. По требованиям техники безопасности высокочастотные установки приравняются к установкам промышленной частоты.

#### 14. Система автоматического регулирования режима сварки

В 1967 г. в СССР коллективом авторов<sup>1</sup> была разработана система автоматического регулирования режима применительно к сварке алюминиевых оболочек кабелей дальней связи. Авторами изобретения предложено в качестве косвенного параметра, определяющего качество сварного шва, принять интегральное излучение из очага расплавления (нагрева). Установлено, что суммирование излучения обычным фотопирометрическим датчиком дает положительный результат, особенно при сварке тонких изделий или изделий из цветных сплавов (алюминий, медь), для которых характерен небольшой объем расплава металла и сравнительно с полем датчика небольшое удаление точки схождения кромок от среднего положения. Сейчас все станы высокочастотной сварки кабелей оболочек и ряд трубозлектросварочных оснащены этой системой регулирования. Система излучение—мощность, подводимая к индуктору (или контактам), — замкнутая и по существу стабилизирует геометрические размеры очага расплавления. Датчиком системы служит фотопирометр, с помощью которого посредством электромеханического обтюратора производится сравнение потоков излучения от визируемого нагретого тела и эталонной лампы накаливания. Регулирование мощности в установках с машинными преобразователями достигается изменением тока возбуждения с помощью тиристорного выпрямителя (возбудителя), а в ламповых генераторах — изменением анодного напряжения посредством управляемого выпрямителя.

Применение системы автоматического регулирования для режимов сварки алюминиевых кабельных оболочек и стальных труб позволило существенно улучшить технико-экономические показатели высокочастотных нагревательных устройств. Регистрограммы температуры (излучения очага сварки) иллюстрируют, что

<sup>1</sup> Авт. свид. № 200060.

возмущения, вызванные изменением скорости сварки, устраняются применением системы автоматического регулирования.

Результаты статистической обработки испытаний образцов стальных труб, полученных при работе автоматического регулирования и ведении процесса вручную, приведены в табл. 26.

Таблица 26. Результаты технологических испытаний (раздач) сварных труб

Размер (диаметр × толщина), мм	Количество образцов	Скорость сварки, м/мин	Образцы, выдержавшие испытание, %	Образцы, выдержавшие испытание по требованиям термобработанных труб	Среднее увеличение диаметра при испытании, %	Режим работы
102×2	1000	36	60	50	7,9	Без регулирования С регулированием С регулированием при изменении скорости на 3 м/мин <sup>1</sup> С регулированием при изменении скорости на 6 м/мин
		36	100	100	12,9	
		39	100	100	11,5	
54×3	327	23	84	60	12,5	Без регулирования С регулированием
		23	100	100	12,5	

<sup>1</sup> При ведении сварки вручную все образцы испытания не выдержали.

Можно видеть, что использование системы регулирования приводит к повышению качества труб. Изменение скорости сварки не ухудшает качества сварного соединения. Кроме того, резко увеличивается количество труб, выдержавших испытания по требованиям, предъявляемым к термобработанным трубам. Применение системы автоматического регулирования на трубосварочных станах существенно снижает себестоимость изделий.

При сварке кабельных оболочек в автоматическом режиме, помимо резкого снижения процента брака по сварке, существенно повышается производительность агрегата за счет осуществления непрерывного цикла сварки с переменной скоростью (в моменты стыковки кабельного сердечника). Кроме того, это ведет к снижению отходов дефицитных материалов и увеличению строительной длины кабеля (табл. 27).

Конструктивно аппаратура автоматического регулирования выполнена в виде отдельных функциональных блоков, смонтированных на пульте управления. Она входит в состав установок высокочастотной сварки ВЧС4-160/0,44 и ВЧС1-160/1,76, но поставляется по дополнительному согласованию. В процессе

Таблица 27. Технично-экономические показатели работы агрегата для наложения алюминиевой оболочки кабелей связи

Режим работы	Длина кабеля без дефектов, км	Изменения скорости сварки, м/мин	Средняя скорость сварки, м/мин	Строительная длина кабеля, м	Колебания толщины штрипса в рулоне, мм
Без автоматического регулирования	18,7	Без изменения	37	615	—
С автоматическим регулированием	104,2	25—75	65	825	0,95—1,2

эксплуатации очень важно пирометр над очагом сварки расположить так, чтобы очаг целиком визировался при любых изменениях режима сварки и всех перемещениях трубной заготовки относительно опорно-сварочного узла. В зоне визирования не должно быть паров и водяных брызг. В том случае, когда охлаждение валков опорно-сварочного узла производится открытым поливом с большим образованием пара и брызг, эта система не дает положительного эффекта при сварке труб.

Создание системы автоматического регулирования режима сварки можно считать первым шагом решения проблемы автоматического поддержания качества сварки, на которое влияют многие воздействия: нестабильность скорости сварки, величина угла и положение точки схождения кромок, толщина и ширина штрипса, форма кривой выходного напряжения выпрямителя анодного напряжения и др.

В последнее время проведен ряд исследований по оценке степени влияния на качество сварного соединения каждого из факторов с тем, чтобы создать многопараметрическую систему регулирования. Однако первые результаты исследований показывают, что главным возмущающим фактором является нестабильность угла и положение точки схождения кромок. Видимо, поэтому зарубежные фирмы решают проблему качества сварки путем совершенствования конструкции формовки трубной заготовки.

#### Глава IV.

### ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СВАРКИ

Процессы при высокочастотной сварке характеризуются высокой степенью локализации энергии и возможностью в широких пределах изменять параметры ее режима, что неосуществимо при

других методах сварки. Кроме того, энергоемкость процесса высокочастотной сварки значительно ниже, чем при контактной и электродуговой сварке. Нет принципиальных ограничений по скорости сварки. Но при высокочастотном способе трудно сваривать изделия конечной длины, так как неизбежны неповаренные участки в начале и конце сварного шва. Из-за особенностей систем подвода тока и механизмов осадки ограничивается сортамент изделий сложной конфигурации, которые можно сваривать методом высокочастотной сварки.

Применение высокочастотной сварки наиболее эффективно при непрерывных процессах изготовления изделий достаточной простой конфигурации, выпускаемых массовыми сериями, поэтому этот способ нашел наибольшее распространение в производстве прямо- и спиральношовных труб из черных и цветных металлов, оболочек электрических кабелей, в приварке ребер, изготовлений профилей. Описанию наиболее эффективных процессов с применением высокочастотной сварки давлением посвящена эта глава.

#### 13. Сварка прямошовных труб малого и среднего диаметров

Высокочастотная сварка давлением с предварительным нагревом и местным расплавлением свариваемых поверхностей нашла наибольшее применение в производстве прямошовных труб малого

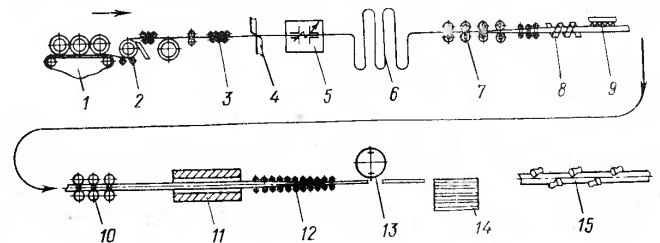


Рис. 81. Схема агрегата для производства прямошовных труб

и среднего диаметров. В 1975 г. методом высокочастотной сварки в СССР ежедневно изготовлялось более 3 млн. м сварных труб из углеродистых и нержавеющей сталей, сплавов алюминия, меди и титана диаметром от 10 до 530 мм с толщиной стенки от 0,5 до 10 мм.

Изготовление труб на трубоэлектросварочном агрегате. Принципиальная схема агрегата для высокочастотной сварки прямошовных труб приведена на рис. 81. Лента в рулонах поворотным краном подается на конвейер 1 и размотчик 2, затем правится в валковой машине 3 и после обрезки концов с помощью ножниц 4 сваривается в непрерывную ленту на стыковочной машине 5.

Образовавшийся при сварке грат удаляется гратоснимателем. Петлеобразователь 6 предназначен для создания запаса ленты перед формовочным станом и обеспечения непрерывного процесса производства труб во время обрезки и сварки концов ленты и снятия грата. Приводными тянущими роликами лента подается к формовочному стану 7. В некоторых случаях перед формовкой кромки ленты обрезаются на дисковых ножницах.

Формовочный стан состоит из горизонтальных и вертикальных клетей. Сформованная трубная заготовка поступает в сварочную машину 8, где производится нагрев кромок и формирование сварного соединения. Наружный грат снимается гратоснимателем режцового типа. Сваренные трубы охлаждаются до температуры 50—60° С в холодильнике 9 водовоздушной смесью, которая подается на поверхность труб через систему сопел. Окончательная калибровка трубы по диаметру осуществляется на стане 10, каждая клеть которого состоит из пары горизонтальных и пары вертикальных валков: горизонтальные — приводные, вертикальные — неприводные.

Продольная кривизна труб устраняется в правильной клети, имеющей две последовательно расположенные четырехвалковые обоймы. В дальнейшем труба поступает или в редуционный стан 12, пройдя нагрев в индукционной печи 11 и резку на летучей пиле 13, или на трубоотрезной станок, а затем на участок отделки 14, 15. При локальной нормализации шва индукционный нагреватель размещается непосредственно после гратоснимателя.

**Выбор оптимальных параметров сварочных устройств.** Свариваемый сортамент труб ограничивается отношением  $D/2d$ . Максимальное значение  $D/2d$  определяется условием устойчивости заготовки данного диаметра при осадке с оптимальным давлением, т. е. тонкостенность свариваемой трубной заготовки зависит от свариваемого диаметра и материала заготовки (табл. 28). Максимальное значение толщины стенки при заданном диаметре трубы определяется допустимыми электрическими потерями в ее теле, а при очень малых соотношениях — и возможностями процесса формовки.

Как было показано в гл. I, сварка труб, толщина которых определяется отношением  $D/2d$  (табл. 28), может быть осуществлена в широком диапазоне частот тока. Поэтому решающим фактором является простота и надежность конструкции системы передачи тока, зависящей в значительной степени от пропускаемого тока. Чем выше частота и длительнее время нагрева, тем меньше ток (рис. 82).

Снижение сварочного тока за счет увеличения времени нагрева нецелесообразно, так как при этом увеличиваются тепловые потери вследствие отвода тепла в тело свариваемой заготовки. Наиболее эффективно уменьшение тока за счет повышения частоты до 200—500 кГц. Дальнейшее повышение частоты, как правило, нежелательно, так как заметного уменьшения тока это не дает

Т а б л и ц а 28. Предельные значения отношения  $D/2d$  для труб диаметром от 10 до 530 мм

Наружный диаметр трубы, мм	$(D/2d)_{\max}$ для труб				$(D/2d)_{\min}$ для труб	
	из малоуглеродистой стали	из аустенитной стали	из меди, латуни	из алюминиевых сплавов	из стали	из алюминиевых и медных сплавов
10—20	80	70	60	50	8	10
20—28	100	80	70	60	8	10
28—32	100	80	70	60	10	12
32—42	100	80	75	60	12	14
42—70	100	80	75	60	12,5	15
70—96	90	75	70	50	15	15
102—152	90	75	—	50	17,5	16
152—220	90	—	—	60	18	—
220—355	90	—	—	—	—	—
355—530	100	—	—	—	—	—

и ухудшаются показатели источников питания сварочных устройств. Поэтому с учетом выделенного в СССР льготного диапазона частот для высокочастотной сварки труб малого и среднего диаметров принята частота 440 кГц, хотя в отдельных случаях применяются частоты 70 и 10 кГц. За рубежом для сварки таких труб применяют частоты 170—500 кГц [18].

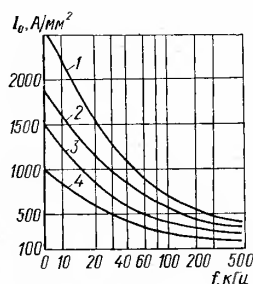


Рис. 82. Зависимость сварочного тока от частоты и времени нагрева: 1 — 0,1 с; 2 — 0,2 с; 3 — 0,4 с; 4 — 1 с

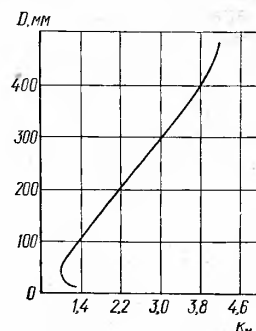


Рис. 83. Зависимость правочного коэффициента  $k_m$  от диаметра свариваемых труб  $D$

Выбор способа подвода тока к свариваемым кромкам также имеет важное значение. Обратимся к графику зависимости коэффициента изменения мощности  $k_m$  (или приведенной<sup>1</sup> мощности) от диаметра свариваемой трубной заготовки  $D$  (рис. 83).

<sup>1</sup> Под приведенной мощностью понимают отношение колебательной мощности к скорости сварки и толщине свариваемой трубы.



Наименьший расход электроэнергии при индукционном подводе тока с помощью охватывающего индуктора наблюдается при сварке труб диаметром 35—45 мм. Если принять мощность, потребляемую при сварке труб диаметром 35—45 мм за единицу, то отношение этой мощности к мощности, необходимой для сварки трубы другого диаметра, даст коэффициент изменения мощности  $k_m$ . Необходимо заметить, что при контактной системе подвода тока значение приведенной мощности для сварки труб диаметром 35—45 мм примерно такое же, как при индукционном подводе, и практически не меняется с изменением диаметра трубы. Поэтому при сварке труб малого диаметра следует рекомендовать только систему индукционного подвода тока. С ростом диаметра свариваемой заготовки значительно увеличивается потребляемая мощность, и при диаметре заготовки 220 мм она удваивается по сравнению с мощностью, необходимой для сварки труб диаметром 35—45 мм.

Однако экономичность процесса определяется не только энергетическими показателями. В табл. 29 приведены значения скорости, приведенной мощности и частоты тока при различных способах подвода тока для высокочастотной сварки труб диаметром 159—220 мм. Из таблицы видно, что при сварке труб диаметром 159 и 168 мм потребляемые мощности при контактном способе с помощью вращающихся контактов и индукционном практически одинаковы, а по данным фирмы «Терматул», для труб диаметром 168 мм можно уменьшить эту мощность на 10—12%, если применить скользящие контакты. Лишь при сварке труб диаметром 219 мм разница в мощностях становится ощутимой.

Помимо возможности иметь меньшую длину нагреваемых кромок и меньший расход мощности, система с контактным подводом тока удобна при перестройке стана, связанной с переходом с одного диаметра труб на другой. В то же время этой системе присущи следующие недостатки.

1. Необходимость симметричной передачи тока к свариваемым кромок посредством контактов, симметрично расположенных относительно вертикальной плоскости. Периодическое смещение кромок относительно контактов приводит к снижению качества сварного соединения, особенно в непрерывных трубосварочных станах при прохождении через формовочную и сварочную машины стыка полос следующих друг за другом рулонов.

2. Возможность появления на поверхности трубы локальных оплавленных участков (поджогов), возникающих вследствие образования электрической дуги в момент нарушения контакта. Нарушение контакта происходит при прохождении стыка, дефектах формовки или свариваемой ленты.

3. Необходимость периодической остановки стана при смене контактных наконечников или проточке вращающихся электродов. По данным Северского трубного завода, среднее время работы вращающихся контактов без проточки — одна рабочая смена,

Таблица 29. Значения скорости, приведенной мощности и частоты при высокочастотной сварке труб диаметром 159—220 мм

Размеры трубы, мм		Длина нагреваемых кромок, мм	Скорость сварки, м/мин	Приведенная мощность, кВт/(мм·м/мин)	Частота тока источника питания, кГц	Способ подвода тока	Завод, фирма
Диаметр	Толщина стенки						
159	5,0	160	45	1,50	440	Контактный с вращающимися контактами	Северский трубный завод
	6,0		40	1,55			
	6,0		40	1,50			
168	7,0	170	35	1,60	440	Индукционный с охватывающим индуктором	
	6,0		40	1,70			
	6,0		35	2,20			
219	7,0	180	30	1,80	440	Индукционный с охватывающим индуктором	
	6,0		35	2,30			
	7,0		30	2,30			
168	6,4	120	34	1,30	400—500	Контактный со скользящими контактами	«Терматул» (США)
	7,1		30	1,35			
219	6,4	120	34	1,30	400—500	Индукционный с охватывающим индуктором	«Ельфиак» (Бельгия)
	7,1		30	1,35			
168	6,0	150	40	1,70	300	Индукционный с охватывающим индуктором	«Ельфиак» (Бельгия)
	7,0		35	1,75			
219	6,0	180	35	2,30	300	Индукционный с охватывающим индуктором	«Ельфиак» (Бельгия)
	7,0		30	2,30			

а время проточки электродов — 15—20 мин. При применении контактных систем со скользящими контактами в зависимости от величины передаваемой мощности, качества поверхности трубной заготовки, ее материала стойкость контактных наконечников такова, что можно сварить от 1,5 до 30 тыс. м труб, используя пару наконечников. Время, необходимое для смены пары контактодержателей, — 20 мин. По данным фирмы «Терматул», при использовании сварочного устройства мощностью 280 кВт средняя стойкость контактных наконечников 3000 м, а время, необходимое для их замены, — 10 мин.

4. Необходимость квалифицированного обслуживания и непрерывного наблюдения за работой системы.

Исходя из изложенного, следует рекомендовать для сварки труб диаметром до 219 мм применение индукционной системы подвода тока охватывающим индуктором.

Более сложен выбор способа подвода тока при сварке труб диаметром до 530 мм. Для сварки таких труб применяется индукционный способ подвода тока охватывающим индуктором на частоте 440 кГц и внутренним индуктором на частоте 8 и 10 кГц (табл. 30) [32]. Значения приведенной мощности для труб диаметром 430—530 мм близки при подводе как охватывающим, так и внутренним индуктором, а для труб диаметром 273—326 мм — при индукционном подводе охватывающим индуктором на частоте 440 кГц на 30—40% меньше, чем при подводе внутренним индуктором. В будущем можно ожидать некоторого (на 10—15%) сокращения расхода электроэнергии за счет совершенствования мощных генераторных триодов в случае применения сварочных устройств с ламповыми генераторами и использовании тиристорных преобразователей частоты для сварочных устройств на частоте 8—10 кГц. Системы индукционного подвода тока на обеих частотах хорошо отработаны и нельзя ожидать заметного повышения их к. п. д.

Применение в современных мощных высокочастотных сварочных устройствах с ламповыми генераторами схем и конструкций тиристорных выпрямителей и электронной аппаратуры высокой надежности и долговечности свело на нет разницу в издержках при эксплуатации установок с машинными преобразователями и ламповыми генераторами. Но эксплуатационные издержки при изготовлении, ремонте и смене индукторов и ферритовых сердечников в устройствах с ламповыми генераторами ниже, чем внутренних индукторов на частотах 8—10 кГц. Капитальные затраты также несколько выше при индукционном подводе тока внутренним индуктором главным образом за счет высокой стоимости преобразовательной подстанции.

Одним из основных показателей рентабельности является производительность процесса. В табл. 31 приведена производительность при сварке труб диаметром 219—530 мм. Из данных таблицы видно, что применение сварочного устройства, работающего на частотах 8—10 кГц, для производства труб с толщиной стенки 4—6 мм не оправдано. Преимущества такой системы ощутимы лишь при производстве труб с толщиной стенки 8—10 мм.

Наконец, важным моментом в выборе оптимального сварочного устройства является качество сварного соединения. На рис. 84 приведены микроструктуры сварных швов труб диаметром 168 мм и толщиной стенки 6 мм, полученных при использовании различных сварочных устройств на частотах 8 и 440 кГц. Сварка труб производилась со скоростью 30 м/мин из полосы стали одной марки (из одного рулона) при одинаковом давлении осадки. Сварное соединение, выполненное с использованием сварочного устройства частотой 8 кГц, отличается лишь более широкой и размытой зоной термического влияния и несколько меньшим количеством включений троостита. После нормализации шва при температуре 850°С и выдержке 2 с микроструктуры сварных

Таблица 30. Сравнительные данные по высокочастотной сварке труб диаметром 273—530 мм при частоте тока 8—500 кГц

Размер труб, мм		Длина нагретых кромок, мм	Скорость сварки, м/мин	Приведенная мощность, кВт/(мм·м/мин)	Частота тока источника питания, кГц	Индукционный подвод тока	Завод, фирма			
Диаметр	Толщина стенки									
273	6,0	215	40	2,4	400—500	Охватывающим индуктором	«Ельфияк» (Бельгия), «Валурек» (Франция)			
	8,0		30	2,5						
326	6,0	240	40	2,6						
	8,0		30	2,8						
430	8,0	275	30	3,2						
	10,0		25	3,3						
530	8,0	315	30	3,6						
	10,0		25	3,8						
273	6,0	200	40	3,4				8—10	Внутренним индуктором	Новомосковский трубный завод
	8,0		30	3,5						
326	6,0	250	40	3,6						
	8,0		30	3,8						
430	8,0	280	30	3,8						
	10,0		25	4,0						
530	8,0	300	30	4,0						
	10,0		25	4,2						

Примечание. Данные, приведенные для труб диаметром 530 мм (см. нижнюю строку), являются ориентировочными.

Таблица 31. Производительность сварочных устройств

Наружный диаметр трубы, мм	Толщина стенки, мм	Показатели производительности сварочных устройств			
		мощностью 1000 кВт, частотой 440 кГц		мощностью 1500 кВт, частотой 8—10 кГц	
		Скорость сварки, м/мин	Производительность, т/ч	Скорость сварки, м/мин	Производительность, т/ч
219	4	110	140	115	145
	6	75	150	85	170
	8	55	135	60	145
273	4	100	160	105	165
	6	70	170	75	185
	8	50	155	55	170
326	4	95	180	100	190
	6	65	190	70	200
	8	45	170	50	185
430	4	80	200	95	240
	6	50	190	65	250
	10	30	185	40	240
530	5	55	210	75	280
	8	35	210	45	270
	10	25	190	35	260

соединений совершенно идентичны (рис. 85). Следовательно, подтверждается высказанное ранее (см. гл. I) соображение об относительно

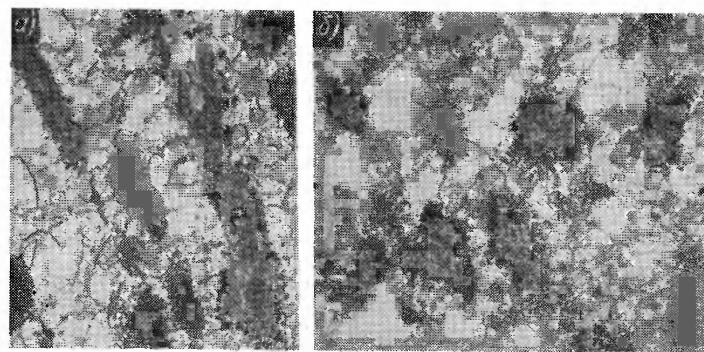


Рис. 84. Микроструктуры сварных соединений из стали 10, полученных на частотах тока: а — 440 кГц; б — 8 кГц (× 300)

слабой зависимости основных параметров процесса высокочастотной сварки с оплавлением от частоты тока источника питания.

Таким образом, при высокочастотной сварке прямошовных труб малых и средних диаметров целесообразно применение только индукционной системы передачи тока. Применение контактных систем со скользящими или вращающимися контактами технически и экономически не оправдано.

Для тонкостенных труб (диаметр 219—530 мм) следует рекомендовать применение индукционной системы подвода охватывающим индуктором на частоте 440 кГц. При производстве толстостенных стальных труб целесообразно применять систему индукционного подвода тока индуктором, размещаемым внутри свариваемой заготовки, с питанием от преобразователей частотой 8—10 кГц, так как высокочастотные сварочные устройства, работающие на частоте 440 кГц, не отвечают современному уровню производительности.

Эти рекомендации можно использовать и при производстве прямошовных труб из цветных металлов и сплавов, так как максимальный диаметр свариваемой заготовки не превышает 200—300 мм, толщина стенки — 5—6 мм, а величина приведенной мощности ниже, чем при сварке труб из стали. При сварке труб из цветных металлов применение системы с индукционным подводом тока на частоте 440 кГц является единственно разумным [19].

**Сварочная машина.** Сварка трубной заготовки производится в сварочной машине стана, схема которой представлена на рис. 86. В ней осуществляется нагрев и формирование сварного соединения. Ток к свариваемым кромкам передается с помощью индуктора.

Конструкция кольцевого одновиткового индуктора для сварки труб малых и средних диаметров при частотах радиодиапазона является оптимальной. Однако при сварке труб диаметром до 40—50 мм технологически проще применять многовитковый индуктор. Поэтому чаще при сварке труб малых диаметров применяются многовитковые цилиндрические индукторы, при сварке труб

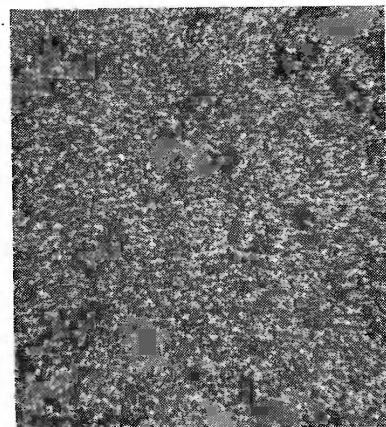


Рис. 85. Микроструктура сварного соединения из стали 10 после нормализации (× 100)

средних диаметров — одновитковые. Многовитковые индукторы изготавливаются из медной трубки. Витки индуктора электрически изолированы с помощью стеклоленты, пропитанной кремний-органическим лаком. Электрическая изоляция также предохраняет индуктор от межвитковых пробоев при попадании на витки мелких частиц металла, вносимых с формуемой заготовкой, и закристаллизовавшихся выплесков из зоны сварки. У одновиткового индуктора такой пробой возможен только между токоподводящими шинами, соединяющими клеммные колодки с активной частью

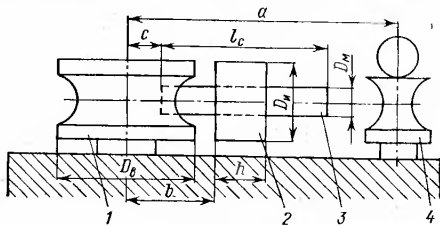


Рис. 86. Схема сварочной машины стана:

1 — шовообжимной валок диаметром  $D_{в}$ ; 2 — индуктор с внутренним диаметром  $D_{и}$  и высотой  $h$ , расположенный на расстоянии  $b$  от оси шовообжимных валков; 3 — ферритовый сердечник диаметром  $D_{м}$  длиной  $l_{с}$ , размещенный на расстоянии  $c$  от оси валков; 4 — валок шовонаправляющей клетки, центр которого расположен на расстоянии  $a$  от оси шовообжимных валков

индуктора. Шины изолируются посредством изоляционной прокладки, а активная часть индуктора не изолируется.

Одновитковый индуктор может изготавливаться из медной шины с напаянной медной трубкой, по которой пропускается охлаждающая жидкость (вода, в редких случаях эмульсия). Имеются конструкции, в которых индуктор охлаждается поливом снаружи. Конструкции одновитковых индукторов для сварки труб среднего диаметра, как правило, разъемные. Типовые конструкции индукторов, наиболее часто применяемых при производстве сварных труб, показаны на рис. 87. Размеры индукторов, рекомендуемые при сварке труб диаметром 10—530 мм, приведены в табл. 32.

Для сварки труб среднего диаметра при частотах 8—10 кГц могут применяться многовитковые охватывающие индукторы (см. рис. 78, а) или, лучше, внутренние индукторы (см. рис. 79). (Конструкция внутренних индукторов описана в гл. III).

Магнитопровод (ферритовый сердечник) вводится во внутреннюю полость свариваемой заготовки для увеличения шунтирующей индуктивности. Следовательно, применение его обязательно

Таблица 32. Основные параметры сварочных машин для производства прямошовных труб диаметром 10—530 мм

Наружный диаметр трубы, мм	Сварочная машина		Индуктор			Ферритовый сердечник				
	$D_{в}$ , мм	$a$ , мм	Конструкция	Размеры, мм			Конструкция	Размеры, мм		
				$D_{и}$	$b$	$h$		$D_{м}$	$l_{с}$	$c$
10	80—85	350	Многовитковый с изоляцией	15—16	15—16	30	Без предохранительного кожуха с наружным охлаждением	6	140	4
12	85—90	350		18—20	16—18	35		8	140	4
16	120	500		25	25—28	40		10	240	5
20	120	500		40	40	50		12	240	5
25	150	550		40	40	55		15	240	8
28	150	550		40	40	60		15	240	8
32	170	600		50	40	65		20	300	8
38	170	600		50	40	65		24	300	10
42	170	600		65	60	70		24	300	10
48	200	650		65	60	80		35	300	10
53	200	650	80	60	90	40	300	12		
57	220	700	Одновитковый неразъемный	80	60	100	С предохранительным кожухом цилиндрического сечения	40	300	12
63	220	700		90	80	100		55	350	15
70	230	750		105	100	110		60	350	15
76	230	750		125	120	125		80	500	20
				135	120	130		80	500	20
102	320	900	Одновитковый разъемный	150	120	140	Сегментного сечения	80	500	20
114	320	900		190	150	170		80	500	20
127	350	1200		190	150	170		115	750	25
152	420	1300		200	150	190		115	750	25
159	420	1300		230	150	220		150	750	30
168	460	1300		250	150	220		150	750	30
203	500	1500		280	200	240		150	750	30
220	500	1600		310	200	250		150	750	40
245	550	1600		370	250	280		180	850	40
273	550	2000		420	250	300		180	850	40
326	650	2300		510	300	320		180	850	40
377	700	2500		580	350	350		180	850	40
426	750	2800						180	850	40
530	850	3500						180	850	40

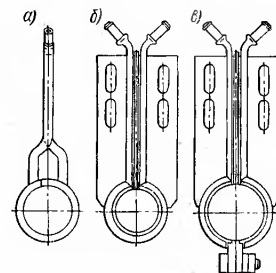


Рис. 87. Конструкции индукторов для сварки прямошовных труб: а — многовитковый неразъемный; б — одновитковый неразъемный; в — одновитковый разъемный

при сварке толстостенных труб. При сварке тонкостенных труб ( $D/d \geq 80$ ), особенно из алюминиевых сплавов, можно вести процесс без сердечника. Ферритовые сердечники (рис. 88) по конструктивному исполнению делят на три вида,

1. При сварке труб диаметром 40—130 мм сердечник набирается из стандартных стержней диаметром 8—10 мм и помещается в стеклотекстолитовый цилиндр, который является одновременно несущим конструктивным элементом и предохранительным кожухом. Тыльная сторона цилиндра заканчивается резьбовым штуцером, с помощью которого сердечник крепится к регулируемому кронштейну или штанге сварочной машины; в сердечник вводится охлаждающая жидкость (вода или эмульсия). При такой конструкции ферритовый сердечник часто разрушается

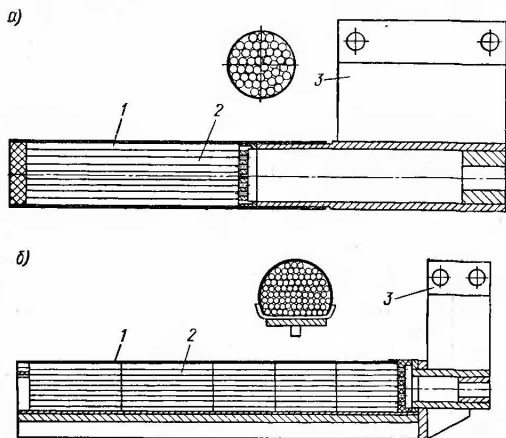


Рис. 88. Ферритовые сердечники: а — цилиндрического сечения; б — сегментного сечения; 1 — ферритовые стержни; 2 — защитный кожух; 3 — плиты крепления

от дефектов формуемой заготовки. Поэтому цилиндр, в котором помещаются ферритовые стержни, рекомендуется изготавливать из немагнитного материала (сталь аустенитного класса, алюминиевые сплавы, медь). Вдоль оси по стороне цилиндра, обращенной к V-образной щели, делается прорез шириной в 2—2,5 раза больше зазора между свариваемыми кромками. Прорез перекрывается изоляционным терлостойким материалом. В остальном эта конструкция не отличается от конструкции сердечника с цилиндром из стеклотекстолита.

2. При сварке труб диаметром более 130 мм достаточно, чтобы минимальная площадь поперечного сечения сердечника была порядка 25—30% от площади поперечного сечения внутренней полости трубы. Сердечник располагается коаксиально оси трубы. Тогда конструкция сердечника приобретает вид шарового сегмента, сферический элемент которого изготавливается из стекло-

текстолита, а остальная несущая конструкция — из алюминиевого сплава.

3. При сварке толстостенных труб малого диаметра ( $D \leq 40$  мм,  $D/2d = 8 \div 10$ ) ферритовый сердечник целесообразно изготавливать с максимально возможной площадью поперечного сечения и интенсивным водяным охлаждением, так как сердечник работает при магнитных индукциях, близких к насыщению. Сердечник набирается из толстостенных ферритовых колец на трубке из немагнитного материала. Охлаждение осуществляется водой, подаваемой через трубку. При сварке тонкостенных труб такого диаметра можно применять сердечник, состоящий из стержней (см. п. 1).

При сварке на частотах 8—10 кГц магнитопровод изготавливается из пластин электротехнической стали, на которые предварительно наносится методом фосфатирования изоляционный слой. При использовании охватывающего индуктора применяют два магнитопровода, один из которых располагается внутри трубной заготовки, а второй — снаружи. При использовании внутреннего индуктора применяют только наружный магнитопровод.

Шовообжимная и шовонаправляющая клетки должны обеспечивать условия стабильного нагрева и формирования сварного соединения. Давление осадки в шовообжимной клетке создается за счет разности периметров свариваемой заготовки и калибра шовообжимных валков. При этом полное давление на валки  $P_0$  складывается из давлений на участках доформовки  $P_\phi$  и сварки  $P_{св}$  [20]

$$P_0 = P_\phi + P_{св}, \quad (88)$$

где

$$P_\phi = \frac{\tau_S 4d^2 r_k r_p b_n}{l_{кк} (r_k + r_p) r}. \quad (89)$$

Здесь  $\tau_S = \sigma'_S / \sqrt{3}$  — усредненное значение предела текучести, не зависящее от  $l_{ос}$  (при температуре осадки), кгс/мм<sup>2</sup>;  $r_k$  и  $r_p$  — радиусы рабочей поверхности и реборды шовообжимного валка;  $b_n$  — толщина ножа шовонаправляющей клетки;  $l_{кк}$  — расстояние от места схождения кромок до оси валка;  $r$  — радиусы трубы на выходе из сварочного калибра (все линейные размеры выражены в миллиметрах).

Давление на участке сварки  $P_{св} = P_{ос} + P_p$ , где

$$P_{ос} = \frac{\sigma'_S}{\sqrt{3}} 2dl_{ос} \left[ 4 + \frac{2d}{\Delta_{ос}} \ln \left( 1 + \frac{\Delta_{ос}}{H_k} \right) \right]; \quad (90)$$

$$P_p = (D_n + D_k) l_p P_{ш}/2. \quad (91)$$

Здесь  $D_n$  и  $D_k$  — диаметры трубы на входе и выходе из шовообжимной клетки;  $l_p$  — длина зоны формования (рис. 89);  $P_n$  — удельное начальное усилие, кгс.

Расчеты, произведенные по формулам (88)—(91), показывают что основную долю в сварочном давлении на шовообжимные валки составляет давление редуцирования ( $P_p$ ) — 60—80%, а давление на участке осадки ( $P_{ос}$ ) — 15—30%. Эти давления растут с увеличением скорости сварки. Давление доформовки практически не зависит от скорости процесса. В зависимости от материала заготовки полное давление на валки при скорости сварки до 1,5 м/с для тонкостенных труб малых диаметров лежит в пределах 500—3500 кгс, а для труб средних диаметров доходит до 6000—

8000 кгс. Полное давление и определяет конструкцию шовообжимного узла (рис. 90) сварочной машины и, в частности, конструкцию подшипникового узла 2 и минимальный диаметр шовообжимных валков 1. Как правило, узлы для сварки труб малых диаметров — двухвалковые, для средних диаметров — трех-, четырехвалковые. Шовообжимные валки имеют раз-

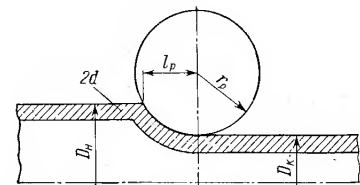


Рис. 89. Калибр шовообжимного узла

дельную регулировку для точной установки их калибра относительно оси трубной заготовки и совместную регулировку для создания давления осадки.

Свариваемая заготовка, поступающая в шовообжимный узел, должна иметь строго определенное, стабильное положение V-образной щели относительно оси стана и постоянный зазор между свариваемыми кромками. Это обеспечивается с помощью шовообжимной клетки. Наибольшее распространение получили следующие конструкции клеток.

1. С двумя горизонтальными валками 1, причем верхний — с разрезной шайбой 2, входящей в зазор между кромками и фиксирующей его (рис. 91). Благодаря совместному повороту обоих валков относительно центра формируемой заготовки на угол 10—15° достигается регулировка положения V-образной щели относительно шовообжимных валков. Недостаток этой конструкции заключается в том, что ток в кромках имеет второй путь через валок с разрезной шайбой, а это не только ведет к бесполезным электрическим потерям на нагрев клетки, но и дестабилизирует процесс сварки. Поэтому расстояние от шовообжимной клетки до индуктора должно быть в несколько раз больше, чем от индуктора до центра шовообжимных валков. Следовательно, эффективность такой конструкции невысока. Она применяется при производстве толстостенных труб из малоуглеродистых сталей, когда свариваемая заготовка формируется на угол 350—355°.

2. Если при указанной в п. 1 системе формовки необходимо иметь достаточно большой и стабильный угол схождения кромок (3—5°), шовообжимную клетку нужно располагать на малом расстоянии от оси шовообжимных валков, т. е. в непосредственной

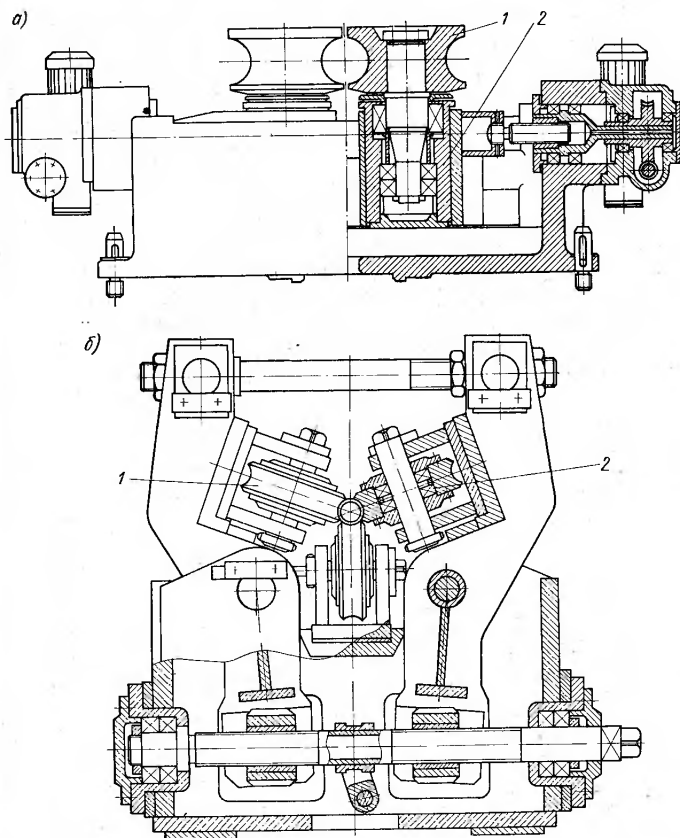


Рис. 90. Шовообжимные узлы: а — двухвалковый; б — трехвалковый

близости от индуктора. Для этого случая можно применить механизм, с помощью которого в зазор между кромками вводится пластина из минералокерамики — нож. Он может перемещаться в вертикальной и горизонтальной плоскостях и строго фиксирует заданный угол схождения и положение кромок относительно валков шовообжимной клетки. Нож имеет невысокую динамическую

прочность, поэтому такая конструкция применяется только при сварке тонкостенных труб из алюминиевых и медных сплавов.

3. Свариваемая заготовка формируется на угол 330—340°, шово-направляющая клетка отсутствует, а окончательное формирование заготовки производится в шовообжимной клетке. При малом расстоянии между осями последней клетки формовочного стана и шовообжимной клетки происходит натяжение кромок, достаточное для стабильного их положения. Дополнительное натяжение кромок может быть достигнуто применением клетки с двумя вертикальными валками и калибром, не полностью охватывающим заготовку. Валки такой клетки не замыкают кромки, и шово-направляющая клетка может быть расположена сколь угодно близко от индуктора. Такая система формовки и фиксации заготовки при нагреве и осадке наиболее эффективна. Она применяется при сварке тонкостенных стальных и алюминиевых труб.

В табл. 33 приведены типы станов и установок для сварки труб малого и среднего диаметров из малоуглеродистой стали и алюминиевых сплавов, а в табл. 34 — значения приведенной

Таблица 33. Типовые отечественные трубосварочные агрегаты для производства прямошовных труб диаметром 10—530 мм

Тип агрегата	Материал свариваемой трубы	Толщина стенки, мм	Скорость сварки, м/мин	Часовая производительность, км	Тип высокочастотной сварочной установки
10-30	Сталь Сплавы алюминия	0,5—1,5 0,5—2,0	50—100 50—100	4,8 4,8	ВЧС2-160/0,44 ВЧС2-160/0,44
20-76	Сталь Сплавы алюминия	1,0—4,0 1,0—3,5	40—120 30—120	5,4 5,2	ВЧС1-400/0,44 ВЧС2-160/0,44
51-114	Сталь	1,2—5,5	50—120 ≤600	3,4 12	ВЧС1-630/0,44 ВЧС1-630/0,44
102-220	Сталь Сплавы алюминия	3,0—8,0 1,5—5,5	30—80 40—100	3,0 3,2	ВЧС1-630/0,44 или ВЧС1-1000/0,44 ВЧС1-400/0,44
203-530	Сталь	2,0—6,0 6,0—10,0	30—80	2,5	ВЧС1-1000/0,44 ИС1-1500/10

Примечание. Агрегат 51-114 может работать с редукционным станом, при этом скорость выхода трубы составляет 600 м/мин.

мощности  $p_0$ . Можно определить приведенную мощность для сварки труб из других материалов, взяв значение  $p_0$  для стали из табл. 34 и умножив его на соответствующий коэффициент. Значения коэффициентов приведены ниже:

Аустенитная сталь (класса 18—8)	1,4
Медь марки М1	1,7
Латунь марки Л68	1,3

Итак, используя приведенные рекомендации, можно выбрать для конкретного случая сварки необходимое оборудование.

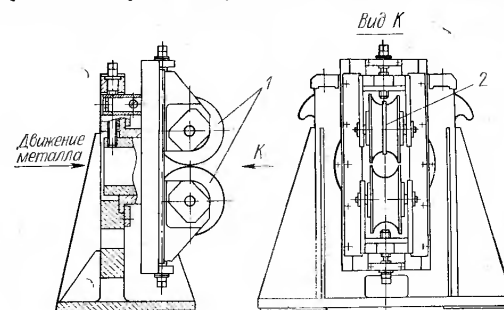


Рис. 91. Шово-направляющая клетка

Определим, например, тип источника питания и параметры сварочной машины стана для сварки труб диаметром 50—60 мм с толщиной стенки 1,5; 2 и 2,5 мм из малоуглеродистой стали и алюминиевого сплава. Заданная скорость сварки — 80 м/мин. По данным табл. 32, для этого диапазона диаметров рекомендуется применить не менее двух одновитковых неразъемных индукторов. Ферритовые сердечники можно взять одного типа. По табл. 34 выберем значения приведенной мощности  $p_0$  для предельных отношений  $D/2d = 80/1,5 = 53$  и  $D/2d = 80/2,5 = 32$ . Для стальных труб  $p_0 = 1,1$  кВт/(мм·м/мин), для алюминиевых  $p_0 = 0,65$  кВт/(мм·м/мин), но так как алюминиевые трубы можно сваривать без применения ферритового сердечника, то  $p_0 = 1,8$  кВт/(мм·м/мин).

Мощность источника питания при сварке стальных труб с толщиной стенки 2,5 мм определим по формуле  $P = p_0 d v = 1,1 \cdot 2,5 \cdot 80 = 220$  кВт; для труб толщиной 1,5 и 2 мм эти мощности будут соответственно 132 и 190 кВт.

В соответствии с табл. 17 необходимые скорости сварки могут быть обеспечены установками мощностью 160 и 400 или 250 кВт. Оптимальной была бы установка мощностью 250 кВт. Установка мощностью 400 кВт значительно сложнее в эксплуатации и дороже, поэтому целесообразно проанализировать возможность использования установки мощностью 160 кВт и снижения скорости сварки при производстве труб с толщинами стенок 2 и 2,5 мм. Тогда скорости сварки будут 72 и 58 м/мин соответственно. Так как эти скорости при заданных условиях значительно превосходят  $v_{кр}$ , то, если допустимо снижение производительности, следует выбрать сварочную установку мощностью 160 кВт.

Максимальная мощность источника питания при сварке труб с толщиной стенки 2,5 мм из алюминиевых сплавов с применением ферритового сердечника  $P = 0,65 \cdot 2,5 \cdot 80 = 130$  кВт, а при сварке труб с толщиной стенки 1,5 мм без сердечника  $P = 1,8 \cdot 1,5 \cdot 80 = 220$  кВт, т. е. сварочное устройство мощностью 160 кВт полностью обеспечивает сварку труб заданного сортамента, а сварку труб

Таблица 34. Значения приведенной мощности  $P_0$  и критической скорости  $\Phi_{кр}$  для сварки прямошовных труб

Наружный диаметр трубы, мм	Углы схождения и развала кромок, ...°				Углы схождения и развала кромок, ...°				$P_0$ , кВт/(мм·м/мин) при сварке труб				$\Phi_{кр}$ , м/мин	
	$\alpha$		$\beta$		$\alpha$		$\beta$		с сердечником		без сердечника		Сталь	Сплавы алюминия
	Сталь		Сплавы алюминия		D/2d	Сталь	Сплавы алюминия	D/2d	Сталь	Сплавы алюминия				
10—12	0,6 0,8	3,0 3,0	Не оговаривается	Не оговаривается	8 >10	1,2 1,1	0,7 0,65	—	—	—	—	1,5	10	
16—25	1,5 1,5	3,5 4,0	—	—	8 >10	1,0 0,8	0,6 0,5	—	—	—	—	2,0	10	
28—48	2,0 1,5—2,0	4,0 3,5	$\leq 12$ $\leq 10$	$\leq 14$ $\leq 10$	10 >12	1,2 1,0	0,7 0,6	—	—	—	—	3,0	15	
53—63	2,5 2,0—2,5	4,5 4,0	$\leq 12$ $\leq 10$	$\leq 14$ $\leq 10$	12,5 >15	1,3 1,1	0,8 0,65	—	—	—	—	4,0	15	
70—83	2,5 2,5	4,5 4,5	$\leq 12$ $\leq 10$	$\leq 14$ $\leq 10$	15 >20	1,4 1,2	0,8 0,7	—	—	—	—	5,0	20	
89—102	3,0 2,5	5,0 4,5	$\leq 10$ $\leq 12$	$\leq 10$ $\leq 10$	16 >20	1,5 1,3	0,9 0,8	—	—	—	—	5,0	20	
114—127	3,0 2,5	5,5 5,0	$\leq 10$ $\leq 12$	$\leq 10$ $\leq 10$	16 >20	1,6 1,4	1,0 0,8	—	—	—	—	6,0	35	
133—159	3,0 3,0	5,5 5,0	$\leq 10$ $\leq 10$	$\leq 10$ $\leq 10$	18 >20	1,8 1,6	1,1 1,0	—	—	—	—	6,0	25	
168—203	3,0 3,0	6,5 6,0	$\leq 10$ $\leq 10$	$\leq 10$ $\leq 10$	18 >20	2,0 1,8	1,2 1,1	—	—	—	—	8,0	30	

Продолжение табл. 34

Наружный диаметр трубы, мм	Углы схождения и развала кромок, ...°				Углы схождения и развала кромок, ...°				$P_0$ , кВт/(мм·м/мин) при сварке труб				$\Phi_{кр}$ , м/мин	
	$\alpha$		$\beta$		$\alpha$		$\beta$		с сердечником		без сердечника		Сталь	Сплавы алюминия
	Сталь		Сплавы алюминия		D/2d	Сталь	Сплавы алюминия	D/2d	Сталь	Сплавы алюминия				
220—245	3,5	$\leq 10$	6,5	$\leq 10$	$\geq 20$	2,3	1,4	—	—	—	—	8,0	30	
273—326	3,5	$\leq 10$	—	—	$\geq 25$	2,5 2,8	—	—	—	—	—	10,0	—	
377—426	3,5	$\leq 10$	—	—	$\geq 35$	2,8	—	—	—	—	—	10,0	—	
530	3,5	$\leq 10$	—	—	$\geq 50$	3,2 3,4 3,6	—	—	—	—	—	12,0	—	



с толщиной стенки 1,5 мм можно производить без ферритового сердечника. При этом скорость сварки  $v = 57$  м/мин несколько ниже заданной, но значительно выше  $v_{кр}$ , что вполне допустимо.

Выберем тип установки для сварки труб диаметром 203—530 мм с толщиной стенки от 3 до 10 мм при скорости 30—80 м/мин. Приведенная мощность  $P_0$  при сварке трубы диаметром 530 мм с использованием охватывающего индуктора на частоте 440 кГц равна  $P_0 = 3,6$  кВт/(мм·м/мин). Тогда мощность источника питания для получения скорости 30 м/мин при толщине стенки 10 мм будет  $P = P_0 \cdot 2dv = 3,6 \cdot 10 \cdot 30 = 1100$  кВт. Таким образом, установка с частотой 440 кГц и максимальной мощностью 1000 кВт не обеспечивает проектных скоростей при сварке толстостенных труб ( $2d = 8 \div 10$  мм) заданного сортамента.

Для сварки той же трубы с применением сварочного устройства частотой 10 кГц в соответствии с табл. 30 принимается  $P_0 = 4,2$  кВт/(мм·м/мин). Исходя из этого мощность источника питания будет  $P = 4,2 \cdot 10 \cdot 30 = 1260$  кВт. Выбирается установка типа ИС1-1500/10.

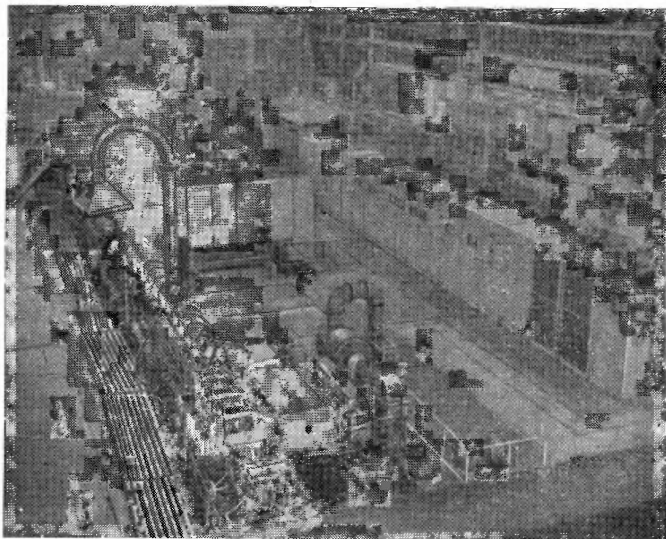


Рис. 92. Установка ВЧС1-400/0,44 в составе трубоэлектросварочного стана 20-76

**Трубоэлектросварочные агрегаты.** В настоящее время в СССР построено более 60 трубоэлектросварочных агрегатов для сварки труб малого и среднего диаметров. Среди них следует отметить следующие.

Агрегат 20-76 с высокочастотной установкой мощностью 400 кВт, частотой 440 кГц для сварки труб диаметром до 76 мм (рис. 92). Подвод тока — индукционный охватывающим индуктором. Скорость сварки до 120 м/мин.

Агрегат 102-220 с высокочастотной установкой мощностью 1000 кВт, частотой 440 кГц для сварки труб диаметром до 220 мм. Подвод тока — индукционный охватывающим индуктором. Скорость сварки до 50 м/мин.

Агрегат 102-220 с высокочастотной установкой мощностью 250 кВт, частотой 440 кГц для сварки труб из алюминиевых сплавов диаметром до 220 мм. Подвод тока — индукционный охватывающим индуктором. Скорость сварки до 80 м/мин.

Агрегат 159-530 для сварки труб диаметром 159—530 мм. Высокочастотная установка выполнена по схеме рис. 70 с преобразовательной подстанцией и состоит из четырех преобразователей мощностью по 500 кВт, частотой 8000 Гц и напряжением 1000 В. Конденсаторная батарея сварочного устройства имеет 24 конденсатора напряжением 1000 В, общей мощностью 7200 квар. Шинопровод сварочной головки выполнен из двух шин толщиной 3 мм, шириной 500 мм, изолированных полипропиленовой прокладкой толщиной 3 мм. Шинопровод легко изгибается, а специальный механизм позволяет изменять положение индуктора относительно места сварки. Оптимальным оказалось сварочное устройство с индукционным подводом тока внутренним индуктором. Индуктор устанавливается на подвижной штанге, на которой также установлен конечный выключатель.

Во время сварки при прохождении через шовообжимную клетку ленты, имеющей расслой, индуктор может быть сорван со штанги. Конечный выключатель в нужный момент останавливает агрегат, предупреждая поломку индуктора.

Индуктор имеет катушку длиной 220 мм из четырех-пяти витков и магнитопровод сечением 67—80 см<sup>2</sup>, длиной 600 мм. Режим нагрева кромок при использовании внутреннего индуктора будет оптимальным, если индуктор и кромки расположить с учетом следующих требований:

Расстояние переднего торца магнитопровода индуктора от оси шовообжимной клетки, мм . . . . .	75
Зазор между корпусом индуктора и внутренней поверхностью трубной заготовки, мм . . . . .	20—30
Угол схождения кромок, ° . . . . .	2,25—2,5
Ширина щели между кромками в месте токоподводов индуктора, мм . . . . .	33

Зазор между верхними углами кромок должен быть больше зазора между нижними кромками на 1—2 мм. Для всего диапазона диаметров свариваемых труб приведенная мощность равна 3,5—4,2 кВт/(мм·м/мин).

Главной причиной выхода внутренних индукторов из строя является перегрев пластин электротехнической стали в крайних пакетах под передним торцом катушки, где индукция максимальна. Применение компенсатора, особенно при сварке труб диаметром 273—426 мм, повышает их надежность.

Металлографические исследования сваренных труб показали, что в сварном шве наблюдается видманштеттова структура с размером зерна 3—4 балла; в околошовной зоне — троостосорбит, феррит с размером зерна 6—9 баллов и перлит; в исходном металле — феррито-перлитная смесь с размером зерна 6—7 баллов. Общая зона термического влияния составляет 7—8 мм.

В процессе наладки стана был опробован индукционный подвод тока охватывающим индуктором и внутренним с наружным магнитопроводом. При этом подтвердились отмеченные выше для этих типов индукторов достоинства и недостатки. Рассмотренный агрегат работает с 1965 г. до настоящего времени и его производительность доведена до 700 тыс. т труб в год.

## 16. Сварка металлических оболочек электрических кабелей

Целесообразность применения высокочастотной сварки в производстве кабельных оболочек обусловлена следующими факторами:

1) использованием в качестве основного материала для оболочек электрических кабелей алюминия и стали вместо дефицитного и дорогого свинца;

2) возможностью уменьшения толщины сварной оболочки по сравнению с прессованной (рис. 93) за счет отсутствия ощутимой разнотолщинности по диаметру (у прессованной оболочки разнотолщинность достигает 10—15%);

3) возможностью сварки практически любых металлов при неограниченных скоростях (при этом не выдвигаются специальные требования к качеству ленты и состоянию свариваемых кромок);

4) отсутствием специальной тепловой изоляции кабельного сердечника ввиду малого объема разогреваемого металла и высокой скорости охлаждения сварного шва [17].

Основное требование к кабельным оболочкам — герметичность. Как правило, кабельные магистрали работают в тяжелых условиях. В процессе эксплуатации подземные кабели помимо давления грунта испытывают дополнительную нагрузку от проходящего транспорта, а на мостах и в местах пересечения дорог подвергаются знакопеременным нагрузкам вследствие вибраций. Кроме того, при изменении окружающей температуры кабели могут получать продольные перемещения, результатом которых

является истирание о грунт или о трубы кабельной канализации. Оболочка защищает изоляцию и токопроводящие жилы кабеля от внешних механических воздействий при транспортировке, прокладке и эксплуатации, поэтому она должна иметь определенную прочность на сплющивание и разрыв, т. е. сохранять заданную форму при приложении внешних усилий. На сварном шве внутренней поверхности оболочки ограничена высота грата, так как при этом в большинстве случаев могут изменяться электрические характеристики кабеля.

Долговечность оболочки должна быть не ниже 25—30 лет. В настоящее время сварные оболочки применяются в конструкциях городских телефонных кабелей, кабелей дальней связи и контрольных. Это объясняется главным образом большой потребностью в кабельной продукции этого вида. Для удовлетворения этой потребности наиболее эффективен такой высокопроизводительный процесс, каким является высокочастотная сварка. Что касается сварных оболочек силовых кабелей, то до сих пор не исследована конструкция кабеля с оболочкой, имеющей внутренний грат. Кроме того, созданные агрегаты по производству сварных оболочек не приспособлены для условий наложения оболочки на сердечник силового кабеля.

Наибольшее распространение имеют кабели с металлической оболочкой диаметром 5—75 мм. Толщины оболочек диаметром до 35 мм приведены на рис. 93. С ростом диаметра оболочек до 75 мм толщина их увеличивается несущественно: стальной оболочки — до 0,6 мм, алюминиевой — до 2 мм.

Как и при сварке труб, отношение  $D/2d$  ограничивает нижний предел сварных оболочек при заданной толщине стенки (табл. 35).

Выбор оптимальной частоты тока источника питания и способа подвода тока к свариваемой заготовке определяется теми же условиями, что и при сварке прямошовных труб малых диаметров. Поэтому при наложении алюминиевых и стальных оболочек на сердечник без металлических экранов применяется ток частотой 440 кГц. При наложении стальной оболочки на сердечник с экраном из меди или алюминия резко меняется распределение тока на свариваемых кромках, значительно увеличивается ширина зоны разогрева. Это приводит к потере устойчивости кромок при осадке. Наиболее простой и экономичный способ повышения концентрации тока на кромках — повышение частоты тока источника питания. В этом случае применяется источник питания

Таблица 35. Предельные значения диаметров и толщины стенок сварных оболочек

Наружный диаметр, мм	Толщина стенки $2d_{\text{ст}}$ , мм	
	алюминиевой	стальной
8	—	0,2
10—12	1,0	0,3
16—20	1,2	0,4
25—30	1,5	0,5
30 и более	2,0	0,6

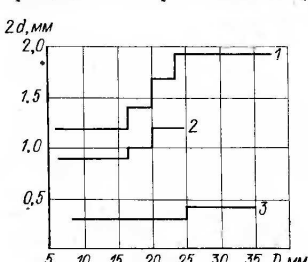


Рис. 93. Зависимость номинальной толщины металлических оболочек от диаметра кабеля  $D$ :

1 — алюминиевая прессованная; 2 — алюминиевая сварная; 3 — стальная гофрированная

с частотой 1760 кГц. Следует отметить, что для оболочек с толщиной стенки 0,2—0,8 мм сварка на частоте 1760 кГц предпочтительнее и при наложении оболочек без экрана, так как в этом случае легко достигается высокое качество сварного соединения в сочетании с малой величиной грата. Способ подвода тока в обоих случаях — индукционный охватывающим индуктором. Рассмотрим агрегат<sup>1</sup>, на котором осуществляется сварка оболочек.

**Схема агрегата для сварки оболочек.** Принципы наложения сварной кабельной оболочки и получения прямошовных труб из полосовой заготовки аналогичны. На агрегате металлическая

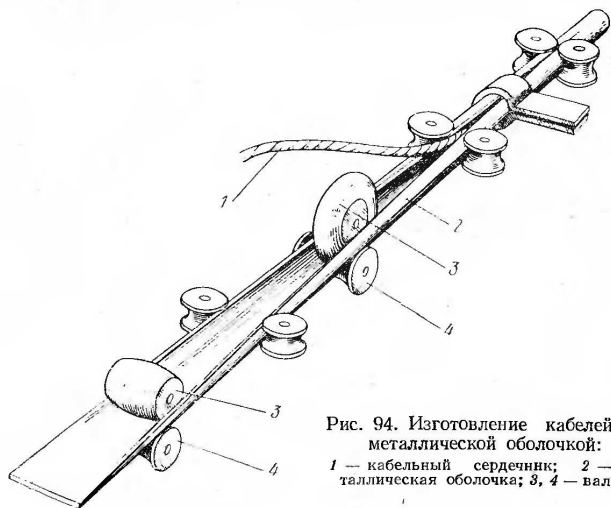


Рис. 94. Изготовление кабелей с металлической оболочкой:  
1 — кабельный сердечник; 2 — металлическая оболочка; 3, 4 — валки

лента вначале изгибается, приобретая корытообразную форму, а затем свертывается в цилиндрическую трубу с прямолинейным схождением кромок встык [23]. В корытообразную заготовку вводится кабельный сердечник 1, и окончательное формирование и сварка оболочки осуществляются вместе с кабельным сердечником (рис. 94).

Агрегат (рис. 95) работает следующим образом. Нарезанная по заданному размеру стальная или алюминиевая лента, из которой изготавливается оболочка, поступает на размотчик 2 (дополнительным операциям лента в дальнейшем не подвергается). С барабанного сдвоенного размотчика лента попадает в петлеобразователь 4, а затем — в формующее устройство 5. Когда она приобретает корытообразную форму, в нее вводится кабельный

<sup>1</sup> Агрегаты созданы и внедрены в производство ВНИИТВЧ, ВНИИметмашем и заводом «Москабель» на базе совместных разработок.

сердечник, поступающий с размотчика 1. Доформовку и сварку оболочки производят в сварочном устройстве 6. Наружный грат снимают с помощью резцового гратоснимателя 7, после чего сварной шов охлаждают в холодильнике.

Затем в зависимости от материала и диаметра производится или доводка оболочки до заданных геометрических размеров в калибровочном устройстве 8 или гофрирование в гофрирующем устройстве. Гофрированию подвергаются стальные оболочки всех размеров, а также алюминиевые при диаметре более 30 мм. Готовый кабель поступает на сдвоенное приемное устройство и наматывается на приемный барабан 10. Дальнейшие операции — контроль герметичности и электрических параметров, нанесение антикоррозионного покрытия — производятся вне агрегата.

Агрегат предназначен для работы в непрерывном режиме, что в сочетании с большой скоростью сварки обеспечивает высокую производительность. Непрерывность работы достигается тем, что, когда на отдельном барабане не остается ленты, агрегат работает за счет ее запаса в петлеобразователе. При этом концы рулонов свариваются на стыковочной машине 3. На ходу производится и соединение концов сердечника. Место соединения концов сердечника фиксируется, и производится разрезка кабеля с помощью летучих ножниц 9, а конец очередного кабеля заправляется в последующий барабан сдвоенного приемного устройства.

При сварке с рабочей скоростью (60—90 м/мин) соединении

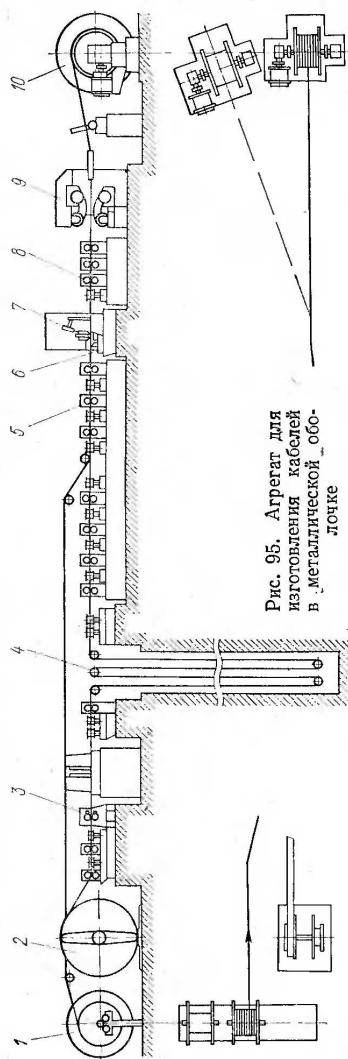


Рис. 95. Агрегат для изготовления кабелей в металлической оболочке

сердечника и заправку кабеля в барабан приемного устройства выполнить затруднительно. Поэтому во время этих операций предусмотрено снижение скорости сварки до 25—30 м/мин. Режим сварки оболочки поддерживается автоматически с помощью системы, описанной в гл. III.

При высокочастотной сварке свариваемые встык оболочки (особенно из стали) имеют тонкие стенки (до 0,3 мм), скорость сварки периодически уменьшается в 2—3 раза по сравнению с рабочей скоростью, для свариваемых оболочек применяется стандартная лента нормальной точности.

Рассмотрим вариант наложения сварной оболочки на сердечник с экраном из алюминия или меди. Этот вариант наиболее характерен для кабелей со стальной оболочкой. Как и при сварке труб малого диаметра, необходимыми условиями для реализации процесса высокочастотной сварки тонкостенных изделий являются стабильность угла схождения, постоянство толщины оплавленного слоя кромок и их устойчивость при осадке. В конструкции агрегата предусмотрены механизмы и устройства, обеспечивающие стабильность режима сварки при наличии возмущений, вносимых спецификой свариваемого изделия.

К таким механизмам относится формирующее устройство, в котором формируется оболочка при прохождении ленты между приводными и не приводными вращающимися валками. Криволинейные поверхности валков в сопряжении образуют калибры открытого типа с проходными сечениями, соответствующими толщине изгибаемой заготовки (см. рис. 94). Вследствие колебаний толщины ленты и погрешностей инструмента наряду с пластическим изгибом ленты могут возникнуть местные изменения ее толщины, которые, как правило, ведут к образованию гофров на кромках и, следовательно, к нарушению режима сварки. В формирующем устройстве применена система слежения валков открытых калибров 3 и 4 за геометрическими и силовыми изменениями, происходящими в этих калибрах, благодаря чему удалось полностью устранить возможность образования гофров<sup>1</sup>.

Процесс сварки оболочки осуществляется в сварочной машине, схема которой показана на рис. 86. Машина обеспечивает получение качественного сварного соединения тонкостенных оболочек.

**Индуктор.** Наиболее технологичной для сварки трубных заготовок диаметром до 40—50 мм является конструкция многovitкового индуктора с электрической изоляцией. Для сварки кабельных оболочек применяются одновитковые индукторы (активные части которых не имеют изоляции) по следующим соображениям.

В многovitковой конструкции трудно избежать случайных межвитковых пробоев, возникающих при попадании мелких частиц металла из зоны сварки. При сварке оболочек пробой ведет, как правило, к образованию в сварном соединении мелкого сквоз-

ного непровара, так называемого «дефекта булавочного укола» и, как следствие, к браку всей свариваемой строительной длины кабеля (до 1000 м). Так как методами автоматического контроля не удается обнаружить этот дефект, то его поиск связан с большими затратами ручного труда.

Чтобы повысить устойчивость свариваемых кромок при осадке и уменьшить внутренний грат, необходимо повышать скорости нагрева как путем увеличения скорости сварки, так и путем уменьшения расстояния от индуктора до места схождения кромок. Поэтому индукторы, особенно при сварке кабельных оболочек малых диаметров ( $D \leq 20$  мм), делаются одновитковыми с клином (см. рис. 78, а). Применение ферритового сердечника при сварке кабельных оболочек нецелесообразно, так как оболочка должна быть заведомо большего диаметра, а для получения заданного диаметра ее нужно редуцировать в специальном стане<sup>1</sup>. Введение редуцирующего стана значительно усложняет агрегат, поэтому практического применения такие агрегаты не нашли.

#### **Шовообжимная и шовонаправляющие клетки сварочной машины.**

В шовообжимной клетке при сварке прямошовных труб малых диаметров давление осадки создается за счет разности периметров свариваемой заготовки и калибра валков клетки. Стабильность величины и давления осадки определяется отклонением ширины ленты, из которой формируется заготовка, и значением износа калибра валков. Кроме того, в двухвалковой шовообжимной клетке строго согласованное положение вертикальной плоскости свариваемых кромок зависит главным образом от осевого биения поверхностей валков, сопрягаемых с оболочкой. Но и при полной согласованности устойчивость кромок нарушается также от избыточного давления осадки. Доказано, что при сварке тонкостенных оболочек все возмущения ведут к существенным колебаниям давления осадки и периодическим смещениям кромок [40]. Стабильность качества сварного соединения в этих условиях нельзя гарантировать. Поэтому для сварки кабельных оболочек применена конструкция шовообжимной клетки (рис. 96), обеспечивающая заданные величину и давление осадки при соответствующих колебаниях ширины ленты и износе калибра шовообжимных валков<sup>2</sup>. В шовообжимной клетке данной конструкции кромки сформированной оболочки сводятся с необходимым давлением, поддерживаемым и регулируемым с помощью упругого элемента — пружины 1. Кроме того, предусмотрено регулирование и фиксация положения однозначных по осевому биению профилей валков 2 в вертикальной плоскости. Для повышения точности согласованного положения кромок в вертикальной плоскости шовообжимные валки связаны синхронизирующими шестернями 3. Применение пружины в конструкции узла решает еще одну важную задачу —

<sup>1</sup> Авт. свид. № 388805.

<sup>1</sup> Авт. свид. № 140928.

<sup>2</sup> Авт. свид. № 403466.

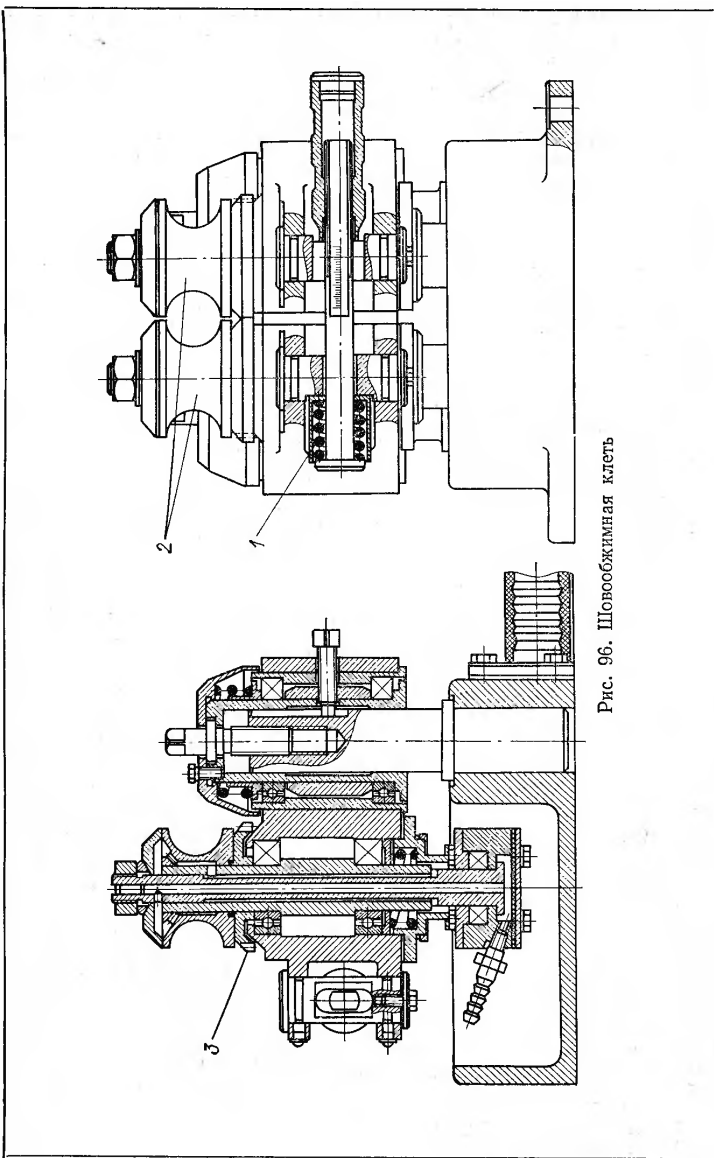


Рис. 96. Шовообжимная клетка

снижение усилий в зоне редуцирования при переходных и настроечных режимах без нагрева кромок. Это позволяет уменьшить размеры подшипникового узла и диаметр шовообжимных валков по сравнению с узлами, имеющими систему жесткой фиксации [см. формулы (88)—(91)], а также сократить расстояние от индуктора до места схождения кромок, что благоприятно сказывается на формировании сварного соединения.

Шовообжимные валки снабжены внутренним водяным охлаждением, чтобы исключить попадание охлаждающей жидкости на кабельный сердечник и предотвратить сбой в работе системы автоматического регулирования, которые появляются при попадании жидкости в очаг сварки. Используется шовонаправляющее устройство<sup>1</sup>, описанное в п. 15.

Задаваясь необходимыми исходными данными и используя табл. 36 и формулу  $P = p_0 2dv$ , можно определить предельные скорости сварки для заданного размера оболочки или потребляемую мощность сварочного устройства при заданной скорости сварки.

### 17. Сварка прямошовных труб большого диаметра

До настоящего времени трубы диаметром более 530 мм для магистральных водо-, нефте- и газопроводов в основном изготавливаются дуговой сваркой под слоем флюса из листов длиной до 12 м с формовкой заготовок на прессах или вальцах. Этот вид сварки малопроизводителен: скорость сварки до 4 м/мин, сварной шов образуется за два прохода. При первом проходе сваривается наружный шов, при втором — внутренний. Кроме того, велики расходы, связанные с производством флюса и электродной проволоки и устройством дорогостоящих вентиляционных систем, так как флюс при расплавлении во время сварки выделяет пары, вредные для здоровья человека.

При использовании т. в. ч. скорость сварки ограничивается только мощностью механического и высокочастотного оборудования стана, обеспечивается высокая свариваемость при производстве труб из низко- и сложнoleгированных сталей, отпадает необходимость в электродной проволоке и флюсах, улучшаются условия труда.

Работы по созданию технологии и оборудования для высокочастотной сварки труб большого диаметра ведутся в нескольких направлениях. Так, на Челябинском трубопрокатном заводе проведены исследования на экспериментальном стане 530-820 по сварке водо- и газопроводных труб, на Харьцызском трубном заводе пущен в опытно-промышленную эксплуатацию стан 1220-1620, сваривающий трубы диаметром 1220—1620 мм для магистральных газо- и нефтепроводов. Кроме того, на опытном

<sup>1</sup> Авт. свид. № 134785.

Таблица 36. Основные параметры устройств для высокочастотной сварки кабельных оболочек

Материал оболочки и его свойства	Размеры, мм						Угол схождения кромок $\alpha, \dots$	Приведенная мощность $(\text{кВт} \cdot \text{м} / \text{мин})$	Скорость сварки, м/мин		Тип сварочной установки		
	оболочки		сварочной машины		индуктора				рабочая	заправочная			
	$D_n$	$2d$	$D_B$	$a$	$D_n$	$b$							
Алюминий технический (Al $\geq 99,3\%$ ) $\sigma_B = 6+$ $\pm 10,5 \text{ кгс/мм}^2$ $\delta \geq 26\%$	10—12	1,0	65	35	15—18	12	30—35	1,8	70	25	ВЧС-160/0,44, ВЧС-160/0,44		
	14—18	1,0	80	38—40	20—26	12	35—40	1,6	80	25			
	20—25	1,0	90	40—45	28—35	12—14	40—42	1,5	90	25			
	30—40	1,2	100	45—50	38—50	16—18	50—60	1,4	90	25			
	50—60	1,5	120	60—75	58—70	16—18	70—80	1,6	80	25			
	60—75	2,0	150	85—100	70—85	20—22	80—90	1,8	70	25			
	Сталь низкоуглеродистая ( $C \leq 0,11\%$ ) $\sigma_B = 25+$ $\pm 40 \text{ кгс/мм}^2$ $\delta = 22\%$	8	0,2	55	35	12	10	26—28	3,2	50		20	ВЧС-160/1,76, ВЧС-100/1,76
		10—12	0,3	65	45—50	15—20	12	32—38	2,8	55		20	
		14—18	0,4	90	60—80	20—34	12—14	40—45	2,5	60		20	
		20—25	0,4	120	100—120	38—70	20	75—85	2,6	60		20	
30—40		0,5	150	120—140	70—85	20	85—95	2,8	55	20			
60—75		0,6											

Примечания: 1. Для сварки алюминиевой оболочки применяется индуктор с клином, для стальной — цилиндрический.  
2. Величины  $D_B, a, D_n, b$  и  $b$  показаны на рис. 86.

стане 300 во ВНИИТВЧ, а затем в УралНИТИ была доказана принципиальная возможность непрерывной формовки и высокочастотной сварки труб из двух заготовок (так называемых двухшовных труб).

**Опытный стан 530-820.** Первая попытка использовать высокочастотную сварку для изготовления труб диаметром 720 мм из заготовок конечной длины была сделана на опытном стане 530-820 при контактном подводе тока частотой 440 кГц [24, 29]. Источником питания служил ламповый генератор мощностью 630 кВт. Специально разработанное сварочное устройство снабжалось механизмом для опускания и подъема кондуктора и трансформатора. В механизме крепления кондуктора и трансформатора предусматривалась автоматическая регулировка, которая обеспечивала постоянное положение контактов относительно кромок при смещении стыка. Механическое оборудование стана состояло из двух подающих, одной шовообжимной и двух тянущих клетей и внутренней оправки.

Основная трудность, с которой сталкиваются при работе на опытном стане, — неустойчивость кромок на участках нагрева и осадки, которую удалось устранить при оптимальном размещении роликов внутренней оправки. Если роликовая обойма располагается по оси шовообжимной клетки, кромки могут сходить с вертикальным смещением одной из них (превышением), которое затем в процессе осадки не исправляется. Кроме того, даже если кромки в месте их схождения сведены правильно, превышение кромок может возникнуть на участке осадки за осью шовообжимной клетки. При размещении роликовой обоймы на расстоянии 30—40 мм перед осью шовообжимной клетки свариваемые кромки в месте схождения сводятся без превышения, однако в процессе осадки оно может образоваться. Если разместить роликовую обойму за шовообжимной клетью на том же расстоянии (30—40 мм), кромки в начале трубы сходятся с превышением, но после прохождения 0,5—1 м превышение ликвидируется. По-видимому, использование поддерживающих роликов за шовообжимной клетью при производстве тонкостенных труб из непрерывной ленты достаточно для того, чтобы значительно повысить устойчивость кромок.

При сварке труб из заготовок конечной длины ролики, расположенные за шовообжимной клетью, не обеспечивают устойчивости кромок переднего конца трубы. Для устранения превышения кромок в этом случае перед шовообжимной клетью, на минимальном расстоянии от ее оси, следует установить консольные ролики с зазором 10—15 мм. Оптимальное размещение роликов на внутренней оправке для сварки труб из заготовок конечной длины показано на рис. 97. При использовании трубных заготовок оптимальной геометрии, т. е. с кромками, подогнутыми внутрь, как требуется для дуговой сварки, примерно 85—90% сварных труб

не имели превышений или имели допустимые превышения (менее 1 мм). При использовании трубных заготовок, сформованных по специальной технологии с отогнутыми наружу кромками, как это требуется для высокочастотной сварки, около 96% сварных труб не имели превышений более 1 мм.

Другая трудность при работе на этом стане связана с тем, что при производстве труб из листов конечной длины начало и конец трубы остаются несваренными. Суммарная длина несваренных участков примерно равна удвоенному расстоянию от контактов до места схождения кромок. Так, при оптимальном

$l_{кр} = 160 \div 200$  мм суммарная длина несваренных участков составила 300—400 мм. Для уменьшения несваренных участков можно осуществлять сварку труб из листов, стыкованных в плетть. Для стыковки достаточно вручную сварить обе кромки по периметру на 150 мм с наружной стороны. Зачистка шва необязательна. Контакты на стыках не подгорают.

При сварке труб диаметром 720 мм с толщиной стенки 9 мм из стали марки Ст3 и 17ГС достигнута скорость 17—18 м/мин. Максимальная длина отрезаемых участков на переднем

конце трубы 100 мм и на заднем — 300 мм. Сварено 1500 т труб для водоводов из стали марки Ст3, которые удовлетворяли всем требованиям ГОСТ 10706—63, и сданы потребителю. Была также сварена опытная партия труб из стали марки 17ГС. На некоторых трубах сварное соединение подвергли локальной термической обработке. Качество сварных швов проверялось на трубах, изготовленных по режимам, указанным в табл. 37. Наружный грат удалялся непосредственно в линии стана механическим способом. Внутренний грат не удалялся. Трубы после сварки и локальной термической обработки подвергались калибровке при внутреннем давлении 94 кгс/см<sup>2</sup> и испытанию при давлении 74 кгс/см<sup>2</sup>, как это принято для газо- и нефтепроводных труб, сваренных по серийной технологии. Разрушение труб, сваренных высокочастотным методом, в процессе экспандирования и испытаний не наблюдалось.

Качество сварных соединений оценивалось по механическим свойствам: углу загиба  $\alpha$ , временному сопротивлению  $\sigma_v$  и удар-

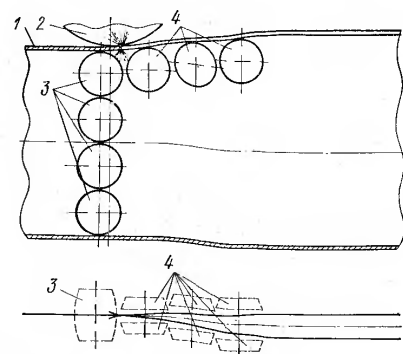


Рис. 97. Размещение роликов на внутренней оправке при сварке труб диаметром 720 мм и толщиной стенки 9—10 мм из листов конечной длины:

1 — труба; 2 — ролик шовосжимающей клетки; 3, 4 — ролики внутренней оправки

Таблица 37. Режимы сварки труб из стали марки 17ГС диаметром 720 мм и толщиной стенки 9 мм

Номер режима	Скорость сварки, м/мин	Давление в сварочной клетке, тс	Угол схождения кромок, ...°	Приведенная мощность $P_0$ , кВт/(мм·м/мин)	Температура нагрева шва при локальной термической обработке, °С
1	11,5	28	3,5	2,65	1150
2	11,5	28	3,5	2,65	Без обработки
3	9,5	33	4,5	3,46	1000
4	9,5	33	4,5	3,46	900—1000
5	9,5	33	4,0	3,21	1100—1150
6	10,5	28	3,0	3,03	Без обработки

ной вязкости  $a_n$ . Ударная вязкость определялась на образцах размером 5×10×55 мм с радиусом надреза 1 мм при температурах +20, —40, —60° С. Надрез наносился в сварном соединении (по центру шва) перпендикулярно поверхности трубы. Угол загиба и временное сопротивление определялись на плоских образцах шириной 20 мм, которые перед испытанием подвергали правке, внутренний грат удалялся. Результаты испытаний представлены в табл. 38. Как видно из таблицы, металл сварного соединения труб равнопрочен исходному металлу. Все образцы при растяжении разрушились по исходному металлу, вдали от шва. Значения ударной вязкости сварных соединений, хотя и ниже, чем для исходного металла, однако практически не уступают ударной вязкости сварных соединений, полученных электродуговой сваркой под слоем флюса. Угол загиба сварных соединений после высокочастотной сварки ниже, чем при дуговой сварке под флюсом. По нашему мнению, испытания на загиб по применяемой методике практически не отражают реальных условий работы сварного соединения в трубопроводах.

Конструктивная прочность и пригодность исследуемых труб для магистральных газопроводов оценивалась по расчетной сопротивляемости газопроводов хрупкому разрушению и по результатам гидравлических испытаний в полевых условиях<sup>1</sup>. Сопротивляемость газопроводов определялась из сопоставления потенциальной энергии, накопленной в стенке газопровода  $a_s$ , и энергии, необходимой для разрушения, которая оценивалась работой  $a_p$ , требуемой на распространение трещины. Эти исследования проводились на образцах, вырезанных из сварных готовых труб, размером 150×60×80 мм. Сварной шов с неудаленным внутрен-

<sup>1</sup> Работа по оценке сопротивляемости труб, сваренных высокочастотным методом, выполнена А. Н. Моношковым (УралНИТИ) и Г. В. Будкиным (ВНИИТВЧ).

Таблица 38. Механические свойства стальных труб диаметром 720 мм и толщиной стенки 9 мм, сваренных по режимам, приведенным в табл. 37

Исследуемый участок	Номер режима	Угол загиба $\alpha$ , ...°	Временное сопротивление $\sigma_B$ , кгс/мм <sup>2</sup>	Ударная вязкость $a_p$ , кгс·м/см <sup>2</sup> при температуре, °С		
				+20	-40	-60
Сварное соединение	1	65—180	59—61	4,9—6,7	2,5—5,9	0,5—4,2
		105	60,2	5,6	4,1	2,6
	2	55—125	54—63	5,9—8,5	2,0—7,3	2,2—5,9
		85	57,3	6,9	4,2	4,5
	3	50—90	59—64	—	0,5—8,3	0,5—7,3
		70	62,4	—	3,4	3,9
4	72—180	56—61	7,9—9,3	0,5—8,4	1,0—9,3	
	155	57,5	8,7	5,7	5,9	
5	60—180	61—64	—	1,0—5,4	0,5—7,3	
	128	62	—	4,0	3,2	
6	35—180	52—62	—	2,5—7,4	1,9—6,9	
	90	55,3	—	5,5	4,3	
Исходный металл	—	—	60—61	8,2—10,7	4,9—7,0	4,4—6,8
			60,3	9,2	6,4	5,5

Примечание. В числителе даны минимальные и максимальные значения, в знаменателе — средние значения для 5—24 образцов.

ним гратом располагался по центру образца параллельно меньшим сторонам, к которым приваривались специальные головки. Надрез на образцах выполнялся статическим вдавливанием на глубину 5 мм остро заточенного под углом 30° ножа из твердого сплава. Образцы испытывались в условиях статического и ударного нагружения при комнатной температуре на стандартной машине МУП-20 и на вертикальном копре при начальном запасе энергии падающего груза 600 кгс·м (масса груза 200 кг).

По осциллограммам усилие—время, полученным в процессе деформирования и разрушения образца, определялась работа  $a_p$  и средняя скорость распространения трещины  $v_p$  (рис. 98). Потенциальная энергия или ее эффективная часть  $a_s$ , рассчитанная для газопровода диаметром 720 мм и толщиной стенки 9 мм с рабочим давлением 55 кгс/см<sup>2</sup> показана также на рис. 98. Как видно из рисунка, характеристики материалов  $a_p$  для исходного металла и шва располагаются выше конструктивной характеристики  $a_s$ . Поэтому имеется запас надежности исследуемых труб по хрупкому разрушению. Кроме того, значения сопротивляемости распространению трещины в металле шва и в исходном металле

практически одинаковы. Об этом свидетельствуют внешний вид изломов образцов и общий характер распространения трещины. При статическом нагружении образцов как сварного соединения, так и исходного металла наблюдается смешанный характер изломов. Все образцы, испытанные на вертикальном копре, имеют хрупкий кристаллический излом. При испытании некоторых образцов с надрезом по центру шва трещина выходила из сварного шва и распространялась по исходному металлу, что свидетельствует о повышенных свойствах сварного шва.

Для гидравлических испытаний было отобрано пять труб, сваренных при различных режимах. Трубы испытывались по двум

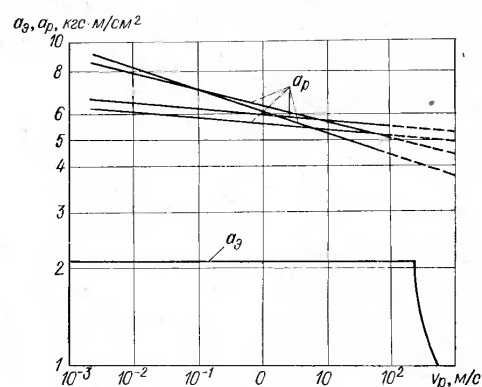


Рис. 98. Зависимости потенциальной энергии  $a_s$ , накопленной в стенке газопровода, и сопротивляемости материала для четырех образцов, определяемой работой распространения трещины  $a_p$ , от скорости ее распространения  $v_p$

схемам. Образцы труб, сваренных по режимам 3, 5 и 6 (см. табл. 37), длиной 4 м загнулись с обоих торцов сферическими днищами и нагружались внутренним давлением до разрушения. Разрушение всех трех труб произошло по исходному металлу вдали от продольного шва на расстояниях 400, 340 и 300 мм при максимальном разрушающем давлении 165, 160 и 185 кгс/см<sup>2</sup> соответственно (рис. 99, а).

На трубах, сваренных по режимам 1 и 4 (условно назовем трубы первой и четвертой), в центре шва наносился наждачным кругом искусственный надрез длиной 200 мм, глубиной 3 мм и шириной не более 4 мм. Такие трубы нагружали внутренним давлением до разрушения. Первая труба разрушилась при давлении 120 кгс/см<sup>2</sup>, а четвертая — 125 кгс/см<sup>2</sup>. Разрушение первой трубы (справа на рис. 99, б) началось от надреза. Зародившаяся



трещина, распространяясь в сторону переднего конца трубы, сразу вышла из сварного шва в исходный металл, двигаясь параллельно шву на расстоянии 3—5 мм, а затем удалилась от шва на 25 мм. С другой стороны надреза трещина длиной 100 мм распространялась первоначально по центру шва, а затем — по основному металлу параллельно шву на расстоянии 3—5 мм. Пройдя расстояние 300—350 мм, трещина изменила направление и пересекла

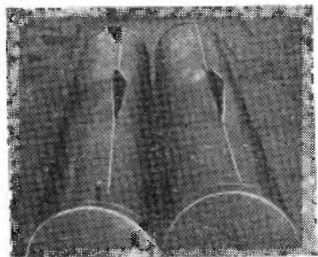
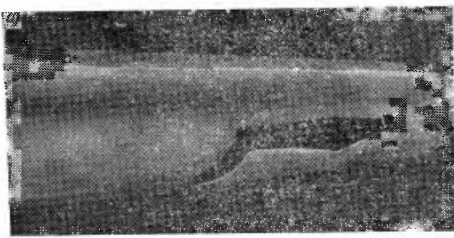


Рис. 99. Внешний вид разрушенных труб: а — без надреза; б — с надрезом в центре шва

сварной шов, затормозив движение в исходном металле. Суммарная протяженность трещины составила около 1400 мм при общей длине трубы 4000 мм. Разрушение четвертой трубы (слева на рис. 99, б) началось также от надреза и распространялось в обе стороны от него. Трещина, возникшая в месте надреза, вышла сразу в исходный металл, удалившись от сварного шва с одной стороны на 20 мм, с другой — на 35 мм. Общая протяженность разрушения 1300 мм.

Таким образом, сварные соединения труб, полученных при использовании токов высокой частоты, имеют высокую конструктивную прочность. Эта прочность выше прочности исходного металла. Сопrotивляемость хрупкому разрушению сварных соединений не уступает сопротивляемости исходного металла. Следовательно, трубы, изготовленные методом высокочастотной сварки,

пригодны для магистральных газопроводов, работающих под давлением 55 кгс/см<sup>2</sup>. Поскольку сварной шов, полученный методом высокочастотной сварки, так же как и шов, сваренный дуговым методом под слоем флюса, обладает низкой ударной вязкостью при низких температурах (—40 и —60°), необходима его последующая локальная термическая обработка.

**Стан 300.** Как отмечалось ранее, основное преимущество изготовления двухшовных труб большого диаметра заключается в том, что для них можно использовать ленту, ширина которой в два раза меньше ширины ленты, применяемой при производстве одношовных труб такого же диаметра. Это важно с точки зрения возможностей отечественной металлургической промышленности. Кроме того, способ двухшовной сварки, как показали исследования на стане 300, имеет ряд преимуществ.

При производстве прямошовных тонкостенных труб процесс формовки может нарушаться из-за потери устойчивости кромок вследствие гофрирования. Одним из путей повышения устойчивости кромок в процессе нагрева и формирования сварного соединения является получение прямошовных труб из двух лент, располагаемых перед началом деформации одна над другой на расстоянии, равном 2/3 высоты готового профиля. В формовочных клетях каждая из лент формируется по криволинейной траектории и превращается в полуцилиндр. Схождение свариваемых кромок осуществляется под углом 8—15°. При небольших расстояниях между последней формовочной клетью и шовообжимным узлом обеспечивается натяжение и стабильное положение кромок в процессе нагрева и осадки.

Использование этого способа дает возможность существенно уменьшить количество формовочных клеток и габариты стана. Кроме того, значительно упрощается технологический инструмент и сокращается его номенклатура. Учитывая эти преимущества, можно рекомендовать двухшовную сварку при производстве труб не только большого, но и среднего диаметров, например труб для орошаемого земледелия и строительства. В СССР в промышленных масштабах нашла применение технология производства двухшовных труб при изготовлении тонкостенных труб диаметром 273—325 мм. Схема агрегата<sup>1</sup> для производства таких труб представлена на рис. 100.

Как правило, трубы среднего диаметра сваривают с использованием охватывающего индуктора. Однако, если принять эту систему подвода тока (от одного источника питания) для сварки двухшовных труб, регулирование режима нагрева кромок каждого шва возможно осуществлять только с помощью механизмов стана. Такая система неудобна, поэтому в агрегате применена контактная система подвода тока с помощью скользящих контактов.

<sup>1</sup> Агрегаты разработаны и внедрены ЭЗТМ, УралНИТИ, Московским институтом стали и сплавов и ВНИИТВЧ.

Труба	Размеры, мм		Угол схождения кромок $\alpha, \dots$	Приведенная мощность $P_0$ , кВт/(мм·м/мин)	Рабочая скорость сварки $v$ , м/мин		
	D	2d				Сварочная машина	Кондуктор
273	2-3	1000-1200	50	1,8-2,2	2,1-2,2		
299	2-3	1000-1200	50	1,8-1,9	2,1-2,2		
325	3-4	1000-1200	50	2,0-2,1	2,3-2,5		

Примечания: 1. Величины D<sub>в</sub>, a, h и b показаны на рис. 100. 2. Использовался сегментный ферритовый сердечник длиной 500 мм.

Питание каждого из двух кондукторов производится от своего источника ВЧС2-160/0,44 или ВЧС4-160/0,44.

Сварочная машина агрегата включает шестивалковую шовообжимную клетку и кондукторы. Так как агрегаты обычно используются для производства тонкостенных труб, ферритовые сердечники применяются редко. При формовке не требуется дополнительная шовоуправляющая клетка. Ее роль выполняет последняя клетка формовочного стана. Основные данные сварочной машины агрегата приведены в табл. 39.

Исследования, проведенные на опытных станах 530-820 и 300, во ВНИИТВЧ и в ИЭС им. Е. О. Патона, опыт применения этой технологии при производстве труб среднего диаметра позволяют перейти в дальнейшем к производству методом высокочастотной сварки труб диаметром 530—1220 мм из двух рулонных лент и диаметром 1220 мм — из двух заготовок конечной длины<sup>1</sup> (двух листов). Предполагается строительство стана для высокочастотной сварки двухшовных труб диаметром более 530 мм, построен и принят в опытно-промышленную эксплуатацию стан для труб диаметром 1220—1620 мм. Разработана технология производства на этом стане газо- и нефтепроводных труб большого диаметра с предварительной сваркой технологического шва токами высокой частоты. По-видимому, такая технология явится переходным этапом. Она позволит усовершенствовать механическое и высокочастотное оборудование

и со временем перейти к сварке труб ответственного назначения только токами высокой частоты.

Работы по созданию технологии производства газо- и нефтепроводных труб с использованием высокочастотной сварки технологического шва проводятся в США, Японии, Иране и других странах.

**Трубоплавильный агрегат 1220-1620<sup>1</sup>.** Предназначен для производства труб диаметром 1220—1620 мм с толщиной стенки от 8 до 20 мм из двух полуцилиндров, формуемых на валковых формовочных станах. В состав агрегата входит стан для высокочастотной сварки технологического шва с использованием двух внутренних индукторов. Сварочное устройство каждого индуктора получает питание от преобразовательных станций мощностью 2000 кВт, частотой тока 10 кГц, состоящих из восьми преобразователей типа ОПЧ-250-10 (см. рис. 70). Общая мощность 4000 кВт. Индукторы размещаются на внутренней оправке перед шовообжимной клеткой. Компенсатор у индукторов общий. Площадь сечения магнитопровода 94 см<sup>2</sup>.

Механическое оборудование стана состоит из заталкивателя, сборочного устройства, двух подающих, шовообжимной и двух тянущих клетей, холодильника и овализирующей клетки. Внутри трубной заготовки расположена оправка. Процесс сварки производится следующим образом. Предварительно сформированная трубная заготовка в форме полуцилиндра поступает по рольгангу в сборочное устройство. Здесь заготовка переворачивается в верхнее положение. На ее место в сборочное устройство подается вторая заготовка. Специальным селектором вторая заготовка подбирается так, чтобы ее длина отличалась от длины первой заготовки не более чем на  $\pm 10$  мм.

Гидравлические зажимы сборочного устройства придают заготовкам необходимые форму и положение. Толкатель заталкивает заготовки в подающие клетки, которые продвигают их в восьми-валковую шовообжимную клетку, где их кромки сводятся под углом 3—5°. В процессе дальнейшего движения кромки заготовок

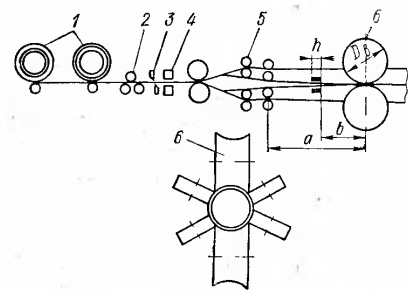


Рис. 100. Агрегат для сварки труб из двух лент:

1 — рулоны ленты; 2 — правильная машина; 3 — ножницы для обрезки концов; 4 — установка для сварки концов рулонов; 5 — формовочная машина; 6 — шовообжимная клетка

<sup>1</sup> Авт. свид № 350545.

<sup>2</sup> Агрегат разработан ЭЗТМ, ВНИИТВЧ, ВНИТИ и ИЭС им. Е. О. Патона.

нагреваются индукторами и при осадке в шовообжимной клетки свариваются. Сваренная часть трубы поступает в холодильник, где шов охлаждается до температуры 300—400° С, затем в овализирующей клетке трубе придается форма вертикального овала, необходимая для того, чтобы при переварке шва дуговым способом под слоем флюса труба приняла круглую форму (рис. 101).

При эксплуатации стана 1220-1620 производилась сварка труб из стали марки 17Г2АФ с односторонней разделкой. Была достигнута проектная скорость сварки (12—13 м/мин) для труб диаметром 1420 мм и толщиной стенки 16,5 мм. Сварка производилась при следующем режиме: мощность 1050 кВт; напряжение на индукторе 830 В; приведенная мощность 5,05 кВт/(мм·м/мин).



Рис. 101. Труба диаметром 1220 мм, толщиной стенки 12 мм на выходе из стана 1220-1620 после высокочастотной сварки технологического шва

При такой же потребляемой мощности сваривались трубы диаметром 1220 мм и толщиной стенки 12 мм из стали марки Ст3 при скорости сварки 15—18 м/мин и приведенной мощности 4,85—5,18 кВт/(мм·м/мин).

Электрическая схема высокочастотного оборудования позволяла питать индукторы как от двух электрически не связанных станций мощностью по 2000 кВт, так и от объединенной (общей) подстанции мощностью 4000 кВт. Работа при питании от общей подстанции не дала положительного результата из-за того, что невозможно раздельно регулировать мощность на каждом индукторе.

При питании от двух станций с неодинаковыми частотами из-за взаимного влияния одного индуктора на другой напряжение на элементах высокочастотного оборудования колеблется. При этом частота модуляции равна разности частот станций и состав-

ляет примерно 4—5 Гц, а глубина модуляции — до 12—15% от соответствующих амплитуд напряжений. Колебания напряжения на индукторах не приводят к снижению качества технологического шва, однако могут снизить качество рабочих швов.

В результате исследований удалось найти способ несколько снизить глубину модуляции напряжения на индукторе и устранить ее для напряжений на конденсаторной батарее и преобразователе за счет включения последовательно с индукторами  $I1$  и  $I2$  обмоток трансформатора  $L1$  и  $L2$  (рис. 102). Взаимная индуктивность  $M$  между обмотками  $L1$  и  $L2$  выбирается такой, чтобы э. д. с., наведенные в обмотке индуктора и последовательно

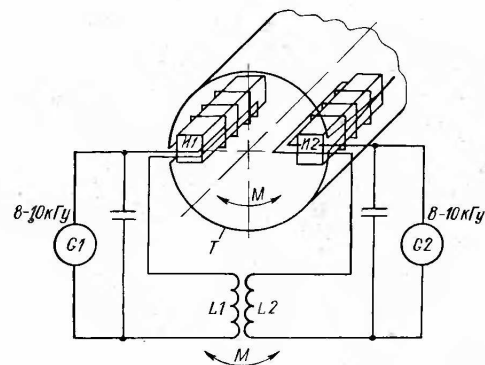


Рис. 102. Схема компенсации взаимного влияния индукторов при сварке двухшовных труб

с ним включенной обмотке трансформатора, были равны по значению и взаимно уничтожались. Наилучшие результаты были получены при большой разности частот станций. Так, при питании одного из индукторов от преобразователя частотой 8 кГц, а второго — 10 кГц глубина модуляции напряжения на индукторах даже при высокой добротности контуров менее 10%. Расчетом подтверждено, что модуляция напряжения на индукторе с частотой 2 кГц не снижает качества сварного соединения.

В результате исследований была отработана технология, при которой технологический шов удовлетворяет предъявляемым требованиям. Если выдавленный при высокочастотной сварке технологического шва наружный грат заполняет менее трети разделки, то грат снимать не обязательно, так как его наличие не ухудшает качества сварного соединения при переварке технологического шва дуговой сваркой под слоем флюса.

## 18. Сварка спиральношовных труб большого диаметра

Спиральношовные трубы большого диаметра, применяемые для магистральных нефте- и газопроводов, изготавливаются методом дуговой сварки под слоем флюса. Поскольку этому способу присущи недостатки, рассмотренные в п. 17, делаются попытки разработки новых способов сварки, в том числе и с применением высокой частоты.

Исследование процессов высокочастотной сварки спиральношовных труб большого диаметра проводилось на опытном стане 530

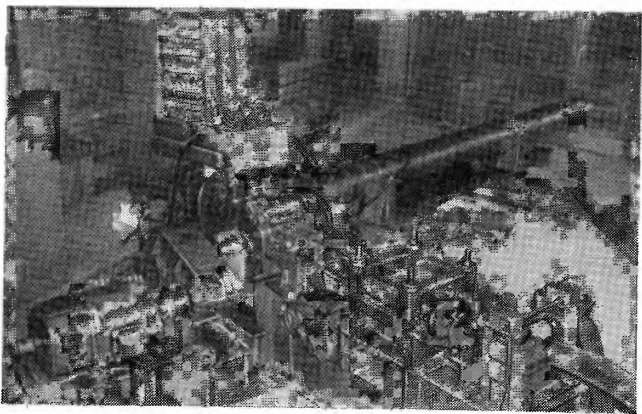


Рис. 103. Опытный стан 530 для сварки спиральношовных труб диаметром 530 мм и толщиной стенки 3 и 5 мм

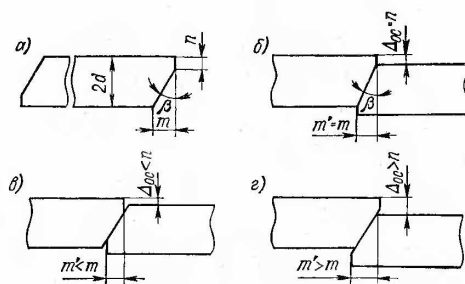
для производства труб диаметром 530 мм и толщиной стенки 3 и 5 мм (рис. 103). При этом была уточнена геометрия кромок и взаимное их расположение в месте схождения (рис. 104), отработан режим нагрева при соединении кромок внахлестку со скосом. Величина притупления  $n$  кромки была выбрана равной величине оптимальной осадки  $\Delta_{oc}$  для заданных толщин и частот сварочного тока. Угол скоса кромок  $\beta$ , определяющий заданное значение нахлестки  $m$ , изменялся в пределах от 20 до 70°.

При увеличении угла  $\beta$  повышаются  $m$  и мощность, необходимая для сварки. При этом возрастает неравномерность нагрева кромок по ширине нахлестки: острые углы кромок перегреваются, а тупые — недогреваются. Поэтому качество сварного соединения вблизи углов ухудшается. При изменении нахлестки, например из-за серповидности ленты, изменяются температура нагрева и

осадка. Это влияние тем сильнее, чем меньше угол  $\beta$ . Наилучшие результаты получены, когда  $\beta = 45 \div 60^\circ$  и  $n = 1 \div 1,5$  мм.

При оптимальной геометрии кромок, характеризуемой величинами  $n$  и  $\beta$ , были получены сварные трубы, из которых вырезались образцы для испытаний на загиб и растяжение. Образцы разрушались по основному металлу. Образцы труб длиной 1,5 м подвергались гидравлическим испытаниям. При испытаниях на швах образцов обнаруживались микротечи, количество которых возрастало с увеличением давления. Все образцы труб, сваренных при оптимальных режимах, включая и трубы, имеющие микротечи, разрушались при расчетных давлениях по образующей трубы,

Рис. 104. Геометрия кромок и их взаимное расположение: а — кромка; б — варианты расположения кромок



а не по шву. Образцы сварного шва, вырезанные из труб, имеющих микротечи, разрушались также по исходному металлу.

По нашему мнению, плотный шов не удалось получить из-за нестабильного притупления кромок по длине ленты, колебаний нахлестки и температуры сварки труб. Поэтому для получения качественного стабильного соединения по длине сварного шва необходимо стан оснастить устройством для более качественной разделки кромок и системами для стабилизации температур нагрева и нахлестки. В настоящее время проводятся работы по усовершенствованию оборудования стана в соответствии с этими рекомендациями.

Аналогичные работы ведутся и за рубежом. Так, фирма «Маннесман Меер» (ФРГ) ознакомила делегацию советских специалистов с работами по созданию процесса производства спиральношовных труб, при котором технологический шов сваривается высокочастотным способом. Пока эти работы не нашли промышленного применения, хотя специалисты фирмы считают перспективным применение высокочастотной сварки при изготовлении спиральношовных труб.

### 19. Сварка стальных тонкостенных<sup>1</sup> спиральношовных труб

Тонкостенные трубы, для которых  $D/2d > 100 \div 250$ , нужны, например, для сельского хозяйства, нефтепромыслов, промышленной вентиляции и др. Обычно такие трубы изготавливались на станах спиральношовной сварки с соединением кромок встык или внахлестку дуговой или контактной роликовой сваркой. При этом скорость сварки невелика: при дуговой сварке она не превышает 2,5 м/мин, а при контактной — 4 м/мин. Контактной сваркой можно получать качественные трубы только из холоднокатаной травленной ленты без следов ржавчины или смазки. Такая подготовка ленты значительно удорожает процесс производства и препятствует широкому применению его в промышленности.

Технология высокочастотной сварки спиральношовных тонкостенных труб с контактным подводом тока (рис. 105) разработана в 1963—1965 гг. [12]. Как и при сварке спиральношовных труб большого диаметра, качество соединения зависит от геометрии свариваемых кромок на участках нагрева и осадки. При сварке спиральношовных тонкостенных труб геометрия кромок регулироваться не может, и поэтому для обеспечения оптимальных условий сварки необходимо особое внимание уделять выбору исходных параметров формовки: углу формовки и ширине ленты, используемой для изготовления труб [9].

**Формовка трубной заготовки.** При сварке спиральношовных труб применяется одно- или двухрадиусная схема формовки. В случае однорадиусной схемы (рис. 106, а) лента шириной  $b$  под углом формовки  $\varphi$  поступает в формовочное устройство, где формируется по диаметру  $D = 2r$ . В точках  $D$  и  $A$  к кромкам ленты и трубы подводятся контакты сварочного устройства. На участках  $AB$  и  $BD$  кромки разогреваются и свариваются, обжимаясь между внутренним и наружным шовообжимными роликами. Зазор  $2h$  между кромками равен расстоянию между точками  $A$  и  $D$ , равноудаленными от точки схождения  $B$  на длину кромок  $l_{кр}$ .

Для упрощения математических выкладок при углах формовки  $\varphi \geq 20^\circ$  и  $l_{кр} < r/(2 \sin \varphi)$  можно с достаточной степенью точности принять, что схождение кромок происходит в плоскости  $E-E$ , перпендикулярной к поверхности формируемой ленты и расположенной под углом  $\varphi$  к оси выходящей трубы. Тогда на участке  $AB$  кромка трубы формируется не по спирали, а по участку эллипса с полуосями: малой  $r$  и большой  $a = r/\sin \varphi$ .

Радиус кривизны эллипса в точке  $B$  будет  $r_s = a^2/r = r/\sin^2 \varphi$ . Тогда  $\psi = l_{кр}/r_s = l_{кр} \sin^2 \varphi/r$ .

Угол между кромкой ленты и касательной к кромке трубы резко меняется в зависимости от расстояния до точки сварки. Поэтому для характеристики режима сварки используют зазор, который определится из треугольника  $ABD$ :

$$2h = AD = \sqrt{r_s^2(1 - \cos \psi)^2 + r_s^2(\psi - \sin \psi)^2}. \quad (92)$$

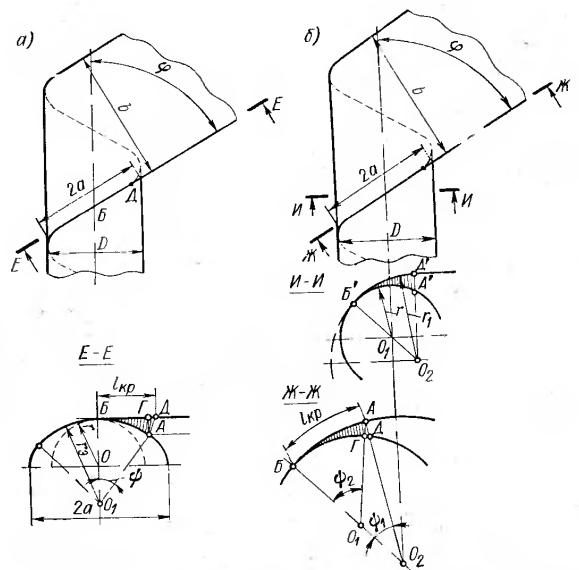


Рис. 106. Схемы однорадиусной (а) и двухрадиусной (б) формовок спиральношовных труб

Эта формула при  $\psi \leq 45^\circ$  может быть упрощена:

$$2h = r_s (1 - \cos \psi)$$

или

$$2h = r (1 - \cos \psi) / \sin^2 \varphi, \quad (93)$$

т. е. зазор  $2h$ , определенный по формуле (93), равен отрезку  $AG$  — перпендикуляру, опущенному из точки  $A$  кромки трубы на кромку плоскопоступающей ленты. Из сравнения результатов расчета зазора по формулам (92) и (93) видно, что при  $\psi \leq 45^\circ$  ошибка упрощения составляет не более 4%, что вполне допустимо для инженерных расчетов.

<sup>1</sup> Работа выполнена ВНИИметмаш и ВНИИТВЧ.

Для приближенных вычислений, если  $\psi \leq 30^\circ$  и  $\sin(\psi/2) \approx \psi/2$ , можно принять

$$2h = l_{кр}^2 \sin^2 \varphi / (2r). \quad (94)$$

Разница в значениях  $2h$ , полученных по формулам (92) и (94), не превышает 6%. Текущий угол между кромкой ленты и касательной к кромке трубы

$$\gamma = 4h/l_{кр}. \quad (95)$$

При однорадиусной формовке труб различного диаметра из ленты шириной  $b$  и при постоянном  $l_{кр}$  максимальная величина зазора между кромками под контактами будет достигнута при  $\varphi \approx 54^\circ 44'$ . При увеличении угла формовки свыше  $54^\circ 44'$  зазор уменьшается за счет увеличения радиуса трубы, а при уменьшении угла формовки он снижается из-за резкого уменьшения кривизны эллипса.

Результаты анализа расчета по формуле (94) показали, что при формовке труб из ленты одной ширины и постоянном расстоянии от контактов до точки схождения кромок можно получить наиболее равномерные условия нагрева кромок при углах формовки от  $30$  до  $75^\circ$ . В диапазоне углов формовки от  $40$  до  $65^\circ$  геометрия кромок на участке нагрева будет практически постоянной, именно этот диапазон можно рекомендовать для высокочастотной сварки спиральношовных труб.

При перестройке стана с одного диаметра труб на другой и сохранении  $b/D = \text{const}$  и  $\varphi = \text{const}$ , если зазор  $2h$  не должен меняться более, чем в  $1,5$ — $1,7$  раза,  $D_{\max}/D_{\min} \leq 1,7$ . Ширину полосы рекомендуется выбирать из отношения  $b/D = 2 \div 2,2$ .

При двухрадиусной формовке спиральношовных труб (рис. 106, б) лента поступает в формовочное устройство в горизонтальной плоскости до точки  $D'$ , а далее до точки  $B'$  движется по радиусу  $r_1$ , плавно сопрягаемому с радиусом трубы  $r$ . Для инженерных расчетов при  $\psi_2 \leq 30^\circ$  зазор  $2h$  и текущий угол  $\gamma$  по аналогии с формулами (94) и (95) получим:

$$2h = [l_{кр} \sin^2 \varphi / (2r)] (k_0 - 1) / k_0; \quad (96)$$

$$\gamma = 4h/l_{кр}, \quad (97)$$

где  $k_0 = r_1/r$  — коэффициент.

Из анализа выражений (94)—(97) видно, что при двухрадиусной формовке можно уменьшить зазоры, а следовательно, и углы между кромками по сравнению с однорадиусной формовкой в  $(k_0 - 1)/k_0$  раз. Таким образом, применение двухрадиусной формовки можно рекомендовать при производстве труб малого диаметра (до  $150$  мм) и отношении  $b/D \leq 1,5$ , т. е. когда изменение величин  $2h$  и  $\gamma$  происходит наиболее интенсивно.

Рассмотрим пример выбора основных параметров стана для высокочастотной сварки тонкостенных спиральношовных труб диаметром от  $150$  до  $350$  мм. Так как диаметр труб достаточно большой, примем однорадиусную формовку. При сварке труб диаметром  $200$ — $500$  мм, используя ленту шириной  $400$  и  $500$  мм, можно, как показали расчеты (рис. 107), обеспечить оптимальные условия нагрева, если  $2h = 12 \div 15$  и  $2h = 9 \div 11$  мм соответственно. При формовке труб диаметром менее  $200$  мм зазор между кромками будет резко уменьшаться. При ширине ленты  $300$  мм обеспечиваются достаточно хорошие условия нагрева при сварке труб диаметром  $150$ — $350$  мм, так как  $2h = 13 \div 19$  мм, но производительность стана ниже в  $1,66$  раза, чем при ленте с  $b = 500$  мм. При постоянном угле формовки обеспечиваются менее стабильные условия нагрева, так как  $2h = 10 \div 20$  мм. Кроме того, усложняется конструкция стана и затрудняется обеспечение стана металлом из-за большой номенклатуры ленты.

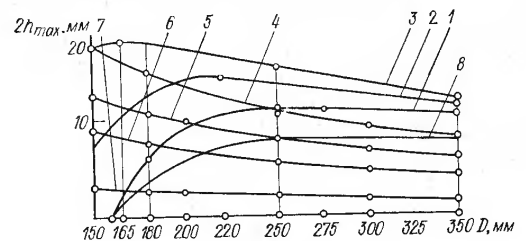


Рис. 107. Зависимость зазора  $2h_{\max}$  от диаметра свариваемой трубы  $D$ , ширины ленты  $b$  и расстояния от контактов до места сварки  $l_{кр}$  (все размеры в миллиметрах):

1 —  $b = 500$ ,  $l_{кр} = 70$ ; 2 —  $b = 400$ ,  $l_{кр} = 70$ ; 3 —  $b = 300$ ,  $l_{кр} = 70$ ; 4 —  $b = 2D$ ,  $l_{кр} = 70$ ; 5 —  $b = 2D$ ,  $l_{кр} = 60$ ; 6 —  $b = 2D$ ,  $l_{кр} = 50$ ; 7 —  $b = 2D$ ,  $l_{кр} = 30$ ; 8 —  $b = 500$ ,  $l_{кр} = 60$ .

На основании анализа расчетов можно рекомендовать для труб диаметром  $150$ — $250$  мм ленту шириной  $300$  мм, а для труб диаметром  $250$ — $350$  мм — шириной  $500$  мм. При этом повышается производительность, упрощается конструкция стана, снижаются его масса и время на перестройку, связанную с переходом с одного диаметра труб на другой, и обеспечиваются оптимальные условия для получения качественного сварного соединения.

**Особенности токоподвода.** При сварке спиральношовных труб кромки трубы и полосы находятся в неодинаковых магнитных полях и поэтому греются неодинаково: кромка полосы перегревается. Для выравнивания температуры нагрева кромок были опробованы два способа. При первом способе контакт, передающий сварочный ток к кромке трубы, устанавливается на  $20$ — $30$  мм дальше от оси шовообжимных валков, чем контакт, скользящий по кромке полосы. При этом увеличивается время нагрева кромки трубы и, несмотря на то, что интенсивность ее нагрева остается прежней, разница температур нагрева кромок трубы и полосы уменьшается. По второму, как оказалось более универсальному, способу контакт, передающий ток к кромке трубы, устанавливается как можно ближе к краю кромки трубы с зазором  $2$ — $4$  мм между

кромкой полосы и этим токоподводом, а контакт, подводящий ток к кромке полосы, — на расстоянии 15—25 мм от края полосы. При этом снижается интенсивность нагрева кромки полосы и уменьшается разница температур нагрева кромок.

**Трубоэлектросварочный агрегат 150-350.** Первый промышленный стан для производства труб диаметром 150—350 мм из ленты шириной 150—300 мм и толщиной 0,8—1,5 мм со скоростью сварки до 30 м/мин при выходе готовой трубы со скоростью 15 м/мин был введен в эксплуатацию в 1965 г. В линии стана установлены: разматыватель рулонов, ножницы для обрезки концов, стык-сварочное устройство, профилировочно-подающая машина, обеспечивающая подачу ленты в формовочное устройство, высокочастотная установка ВЧС-160/0,44 и выходной рольганг для приема сварной трубы. Профилировочно-подающая машина обеспечивает подгибку кромок ленты, при которой получается более гладкая наружная поверхность. При изменении ширины ленты или перестройке стана на другой диаметр труб изменяется угол формовки, что достигается поворотом профилировочно-подающей машины вокруг вертикальной оси, проходящей через ось шовообжимных валков.

В процессе наладки режимов сварки установлено, что для стабильности процесса сварки и стойкости скользящих контактов большое значение имеет угол между направлением движения кромки в точке касания контакта и линией, проходящей через эту точку и ось поворота контакта (угол  $\alpha$  на рис. 64). Наилучшие условия для работы скользящего контакта обеспечиваются, если угол  $\alpha = 0$ , однако при этом угле трудно выполнить конструкцию кондуктора. Обычно ось поворота контакта лежит выше линии направления движения кромки ( $\alpha > 0$ ). Для этого случая усилие поджатия скользящего контакта к кромке, обеспечивающее электрический контакт (пренебрегая трением в шарнирном соединении), можно определить по формуле

$$N = aF_{\text{пр}}/[c(\cos \alpha + k \sin \alpha)], \quad (98)$$

где  $F_{\text{пр}}$  — усилие пружины;  $a$  — плечо приложения усилия  $F_{\text{пр}}$ ;  $c$  — расстояние от соприкосновения контакта и кромки до оси его поворота;  $k$  — коэффициент трения пары контакт—кромка.

В процессе работы кондуктора коэффициент  $k$  изменяется и приводит к колебаниям усилия поджатия контакта к кромке. Так как колебания усилия  $N$  нежелательны, угол  $\alpha$  должен быть выбран так, чтобы  $N_{\text{min}}/N_{\text{max}} \geq 0,9$ , тогда

$$k \leq 0,111/\text{tg } \alpha. \quad (99)$$

Приняв  $k > 0,1$ , что справедливо для большинства материалов, получим  $\alpha < 45^\circ$ . Результаты расчета допустимого значения

коэффициента трения для различных углов  $\alpha$  по формуле (99) приведены ниже:

$\alpha$	0	5	10	15	20
$k$	Нет ограничений	1,26	0,63	0,41	0,31
$\alpha$	25	30	35	40	45
$k$	0,24	0,19	0,16	0,13	0,111

Опытная эксплуатация промышленного стана 150-350 показала, что при производстве труб из холоднокатаной ленты угол  $\alpha = 50 \div 55^\circ$  не обеспечивает устойчивой работы скользящих контактов: часты случаи отрыва контакта от кромки под действием момента, создаваемого усилием трения. Между контактом и кромкой возникает дуга, что приводит к выходу из строя контакта и прожогу кромки (в момент отрыва контакта усилие трения падает и под действием пружины контакт снова опускается на кромку и т. д.). При  $\alpha = 40 \div 45^\circ$  скользящие контакты работают более стабильно, однако их стойкость невелика. Поэтому рекомендуется  $\alpha$  выбирать не более  $30 \div 35^\circ$  при сварке труб из холоднокатаной и не более  $25 \div 30^\circ$  — из горячекатаной ленты.

Наладка механизмов стана и высокочастотного оборудования производилась при сварке труб диаметром 182 мм из холоднокатаной обрезной рулонной ленты шириной 200 мм и толщиной  $1,2 \pm \pm 0,5$  мм. Допуск по ширине ленты для большинства рулонов составлял  $\pm 0,8$  мм. Материал ленты — сталь марки МСТ-1. Скорость сварки изменялась от 12 до 22 м/мин.

Внутренний и наружный шовообжимные ролики выполняются водоохлаждаемыми. Усилие поджатия роликов при сварке трубы диаметром 180 мм и толщиной стенки 1,2 мм составляло 150—200 кгс. Диаметр внутреннего ролика 90 мм, наружного — 120 мм. Для получения качественного сварного соединения необходимо ролики устанавливать так, чтобы их оси обязательно лежали в плоскости, нормальной к касательной к кромкам в точке их схождения. Линия пересечения плоскости, в которой лежат оси роликов, и вертикальной плоскости, проходящей через центр нахлестки, должна пересекаться с осью трубы. При таком расположении осей направления движения роликов и кромок в месте их схождения совпадают. Если оси установлены неточно и направления движения роликов и кромок не совпадают, разогретый металл кромок смещается и качество сварного соединения по его длине нестабильно.

Шовообжимные ролики при сварке находятся в непосредственном соприкосновении с разогретыми до высокой температуры кромками; т. е. период разогрева поверхностных слоев металла роликов сменяется периодами охлаждения. Это приводит к возникновению в роликах знакопеременных температурных напряжений, которые снижают их стойкость.

Были опробованы сменные обоймы шовообжимных роликов, изготовленные из различных материалов: сталей 45, 40Х, ШХ15 и латуни Л62. Стойкость обойм из стали 45 наибольшая — 3—4

смены без переточки. Рекомендуется шовообжимные ролики очищать от капель металла два раза в смену и производить их переточку один раз в три смены.

Для выравнивания температуры нагрева кромок трубы и ленты контакт, скользящий по кромке ленты, устанавливался на расстоянии 10—15 мм от края, а контакт, скользящий по кромке трубы, — на 6—7 мм. Расстояние контактов от оси шовообжимных валков — 47—55 мм. При таком расположении контактов было сварено более 1 млн. м труб со скоростью 25—30 м/мин. Продолжительность работы контактов составляла примерно 10—50 км сварного шва.

При сварке спиральношовных труб происходит интенсивная передача энергии от трубной заготовки к формовочной улитке и шовообжимным роликам. Поэтому в начале работы для обеспечения принятой скорости сварки необходима несколько большая мощность. По мере разогрева формующего устройства теплопередача снижается и мощность, потребляемая от сети, уменьшается.

В установившемся режиме работы стана методом калориметрирования измерялась мощность, выделяющаяся в водоохлаждаемых узлах сварочного устройства. Так, потери на аноде ламп составляли 46,6, в охлаждаемых узлах лампового генератора — 4,9, сварочном устройстве — 17,14 кВт. Если принять, что в шинах, не охлаждаемых водой, и в каркасах потеря мощности равняется примерно 5 кВт, то мощность, выделяющаяся в кромках, примерно равна 53 кВт. Тогда к. п. д. установки составит 39,5%. Мощность, выделяющаяся в кромках, расходуется на нагрев трубы, улитки (4,18 кВт), обжимных роликов (16,08 кВт) и, кроме того, уносится эмульсией, используемой для уменьшения трения между лентой и улиткой. При скорости выхода трубы 6,8 м/мин контактной термопарой была измерена температура трубы в сечении, где температура шва и тела трубы одинакова и равнялась примерно 100° С. Мощность в трубе равнялась 28,7 кВт. Таким образом, в кромках трубной заготовки с учетом потерь в улитке и роликах выделяется мощность 49—53 кВт.

Мощность, выделяемая в кромках, распределяется неравномерно. Как следствие этого, температура нагрева углов кромок максимальна и составляет 1300—1400° С. При удалении от угла температура нагрева падает. В средней части нахлестки температуры кромок трубы и ленты примерно одинаковы и составляют 1000—1200° С. В точке, лежащей против угла второй кромки, температура нагрева ниже сварочной (700—800° С). Такая асимметрия температурных полей приводит к раскатке (без сварки) края кромки по более холодному металлу. При этом качественная сварка обеспечивается только в средней части нахлестки, где температура кромок примерно одинакова. Такая зона сварки занимает 1,5—3,0 мм, т. е. 50—75% от величины нахлестки. Для улучшения качества сварного соединения казалось бы целесообразным уменьшить нахлестку до 2—3 мм. Это привело бы также

к увеличению скорости сварки. Однако качество исходной ленты и отсутствие устройств для стабилизации нахлестки позволяют снизить этот параметр только до 3—5 мм.

Металлографические исследования показывают, что микроструктура металла на раскатанных кромках — крупнозернистая (видманштеттова), имеются поры и микротрещины. По мере удаления в глубь шва структура становится все более близкой к структуре исходного металла (участок нормализации с мелким зерном), а непосредственно в зоне сварки имеется участок перекристаллизации (старые зерна феррита, между которыми расположены новые, более мелкие зерна). Образцы сварного соединения, вырезанные поперек шва, выдерживают перегиб на 180° и испытания на разрыв при напряжениях 0,85—0,95 от предела прочности исходного металла. Разрыв образцов происходит в местах концентрации напряжений в зоне термического влияния, обусловленных наличием рисок и задиrow на трубе, как правило, неизбежно появляющихся в формовочном устройстве втулочного типа. Наличие таких поперечных концентраторов напряжений не приводит к снижению прочности всей трубы, так как ее разрыв происходит не от осевых, а от радиальных напряжений, в два раза превышающих осевые.

При соблюдении технологического процесса трубы, полученные высокочастотной сваркой кромок внахлестку, полностью отвечают техническим требованиям, предъявляемым к быстроразборным трубопроводам типа РТ-180, которые по агротехническим требованиям должны работать при рабочем давлении до 12 кгс/см<sup>2</sup> и испытываться при давлении 20 кгс/см<sup>2</sup> на гидравлическом прессе.

После успешного внедрения нескольких станов 150-350 для высокочастотной сварки тонкостенных спиральношовных труб в промышленную эксплуатацию были созданы станы 250-1000 и 168-426. Стан 250-1000 предназначен для сварки осеботонкостенных труб диаметром до 1000 мм с толщиной стенки до 2 мм при скорости сварки до 40 м/мин. Применен контактный подвод тока. Эти трубы используются в качестве обечаек при изготовлении железобетонных труб. В комплект стана входит высокочастотная установка мощностью 160 кВт, частотой тока 440 кГц. Такая мощность установки выбрана в соответствии с экспериментальными графиками, приведенными на рис. 108.

На стане 168-426 свариваются трубы диаметром до 426 мм с толщиной стенки до 4,5 мм при скорости сварки до 30—40 м/мин. Стан укомплектован высокочастотной установкой мощностью 630 кВт, частотой тока 440 кГц. Применен контактный подвод тока. Конструкция сменных контактов, используемых на станах 168-426, приведена на рис. 65. Сменные контакты имеют различную стойкость. Например, стойкость наконечников (рис. 65, а) доходит до 50 км при сварке труб из холоднокатаной ленты с передаваемой мощностью 160 кВт (ток 2,5 кА), а стойкость наконечников, показанных на рис. 65, б, в, — соответственно до 10 и



30 км при сварке труб из горячекатаной ленты с мощностью 330 кВт (ток 3,5 кА).

Сварные спиральношовные трубы, полученные на стане с высокочастотным нагревом, используются для целей орошения.

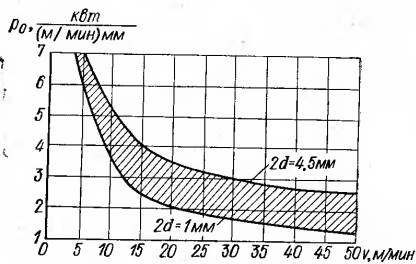


Рис. 108. Зависимость приведенной мощности  $P_0$  от скорости сварки спиральношовных труб  $v$

Проводятся работы по усовершенствованию технологии высокочастотной сварки и оценивается работоспособность этих труб в трубопроводах ответственного назначения. В дальнейшем такие трубы предполагается использовать при строительстве нефтепроводов.

## 20. Сварка оребренных труб

В теплообменных аппаратах применяются трубы с развитой наружной поверхностью, т. е. с прямыми и спиральными ребрами. Такие трубы изготавливаются методом прессования. При этом способе низка производительность и высоки капитальные затраты, невозможно получить трубы с тонкостенными ребрами. Приварка ребер к трубам дуговой сваркой под слоем флюса в среде углекислого газа малопродуктивна и, кроме того, зона термического влияния в теле трубы настолько велика, что создается опасность разупрочнения трубы.

При высокочастотной приварке ребер к трубам обеспечивается высокая производительность, минимальная зона термического влияния, высокое качество сварного соединения при использовании различных материалов. В связи с этим в СССР и за рубежом ведутся работы по использованию высокочастотного нагрева при приварке ребер к трубам.

**Приварка прямых ребер<sup>1</sup>.** Примером трубы с прямыми ребрами может служить плавниковая труба. Она представляет собой трубу с двумя прямыми, лежащими в одной плоскости, — ребрами. Принципиальная схема сварки плавниковых труб приведена

на рис. 109. Труба подается в шовообжимную клетку, где к ней с помощью валков поджимаются два ребра прямоугольной формы. Между поверхностями трубы и ребра поддерживается угол, равный примерно 10—15°. К кромке ребра и поверхности трубы с помощью скользящих или катящихся контактов подводится ток частотой 440 кГц, который концентрируется в тонких слоях, разогревая их. При последующем обжатии ребро и труба свариваются.

Из-за различной конфигурации трубы и ребра (плавника) наблюдается неодинаковый нагрев свариваемых поверхностей: свариваемая поверхность ребра обычно перегревается, что приводит к снижению качества сварного соединения. В связи с этим были опробованы четыре приема выравнивания температуры нагрева свариваемых поверхностей ребра и трубы:

1) увеличением расстояния от контакта, передающего ток к трубе, до места схождения ребра и трубы (рис. 110, а);

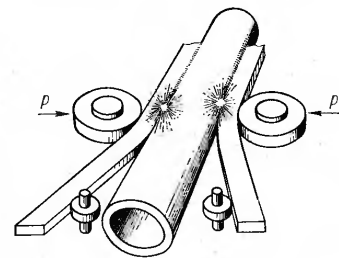


Рис. 109. Схема высокочастотной сварки плавниковых труб

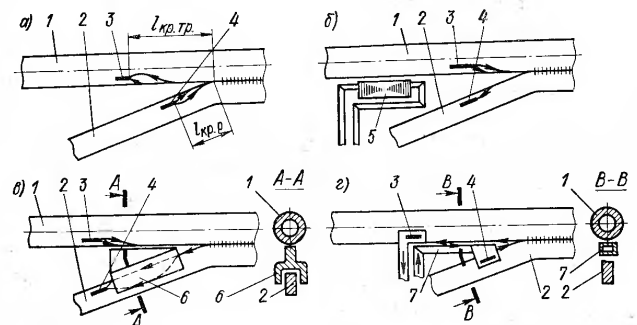


Рис. 110. Приемы выравнивания температуры нагрева при сварке плавниковых труб:

1 — труба; 2 — ребро; 3 — контакт, скользящий по трубе; 4 — контакт, скользящий по ребру; 5 — дополнительный индуктор для подогрева трубы; 6 — пассивный концентратор; 7 — активный концентратор

2) предварительным подогревом свариваемой поверхности трубы с помощью специальной установки (рис. 110, б);

<sup>1</sup> Технология и высокочастотное оборудование для приварки прямых ребер разработаны В. Л. Кулжинским и Н. Л. Мирским (ВНИИТВЧ) и Э. С. Слепаком (ЦНИИТмаш).

3) использованием пассивного концентратора <sup>1</sup>, повышающего температуру нагрева трубы и снижающего температуру нагрева ребра (рис. 110, в);

4) применением активного концентратора <sup>2</sup>, повышающего температуру нагрева трубы (рис. 110, г).

Используя первый прием, не удалось достигнуть повышения температуры нагрева трубы. Второй прием также полностью не решает поставленную задачу. Стенка трубы прогревается насквозь, и зона термического влияния получается значительно шире толщины ребра, т. е. на трубе имеются по два участка разупрочнения по переходной зоне со стороны каждого из ребер. Поэтому при оребрении труб из стали марки 12Х1МФ необходима дополнительная операция — нормализация всей трубы.

Размещение пассивного концентратора 6 (рис. 110, в) в зазоре между трубой 1 и ребром 2 более перспективно. Он выполняется из меди и стороной, обращенной к свариваемой поверхности трубы, имитирует ребро. На противоположной стороне пассивного концентратора выполнен паз, в который пропускается ребро. При подведении тока к ребру и трубе в концентраторе наводится ток, который за счет эффекта близости повышает плотность тока на поверхности трубы и понижает ее на ребре. Следовательно, пассивный концентратор обеспечивает более благоприятные условия сварки ребра и трубы. Одновременно несколько увеличивается приведенная мощность.

Этот прием выравнивания температур нагрева целесообразен только при большой длине концентратора и малом зазоре между ним и трубой. Однако при большой длине концентратора удлиняется время и увеличивается глубина нагрева, что нежелательно, а при малом зазоре снижается надежность процесса из-за возможности возникновения пробоев. Ток, наведенный в пассивном концентраторе, при увеличении зазора уменьшается, поэтому его влияние на распределение тока, идущего по трубе, падает не только из-за ослабления эффекта близости вследствие увеличения зазора, но и из-за уменьшения тока, наведенного в концентраторе.

Использование пассивного концентратора не дает качественного сварного соединения в случае производства оребренных труб (профилей) из трудносвариваемых материалов. Активный концентратор выравнивает температуры нагрева свариваемых поверхностей ребра и трубы. При этом контакт на трубе устанавливается на значительно большем расстоянии от места сварки, чем на ребре. Активный концентратор, являющийся частью кондуктора, располагается в щели между ребром и трубой на минимальном расстоянии от ее поверхности, ограничиваемом пробивным напряжением. При подаче напряжения на токоподводы ток ча-

стотой 440 кГц течет по активному концентратору 7, через скользящий контакт 4 переходит на ребро, доходит до места схождения трубы и ребра и по свариваемой поверхности трубы 1 возвращается к контакту 3. На свариваемой поверхности трубы, в непосредственной близости от места схождения с ребром, ток концентрируется за счет эффекта близости, который проявляется в результате протекания встречного тока по ребру, а под концентратором — за счет взаимодействия со встречным током концентратора. Эффективность активного концентратора зависит от его длины и величины зазора между концентратором и трубой.

Таким образом, регулируя длину активного концентратора, по которому протекает полный сварочный ток, и положение скользящих контактов на трубе и ребре, можно получить оптимальные условия для высокочастотной сварки плавниковых труб. При скорости сварки 10—20 м/мин труб диаметром 32 и 38 мм и толщиной стенок 5 и 4 мм из стали марки 12Х1МФ с ребром размерами 6×8 мм из той же стали приведенная мощность равна 4,4 и 2,7 кВт/(мм·м/мин), т. е. на 10—30% больше, чем при сварке симметричных систем. Это объясняется повышенными потерями мощности из-за теплопроводности от нагретых слоев трубы в соседние ненагретые. Наблюдается весьма незначительная зависимость приведенной мощности от толщины стенок трубы.

Для получения качественного сварного соединения плавниковых труб по всей толщине ребра необходимо поддержание строго постоянного режима сварки, близкого к оптимальному. Отклонение от оптимального режима снижает качество сварного соединения в зоне углов ребра.

В процессе испытания на разрыв термообработанные трубы диаметром 38 мм, толщиной стенки 4 мм разрушались при давлении 372,2—375 кгс/см<sup>2</sup> ( $\sigma = 9,6 \div 10$  кгс/мм<sup>2</sup>) после 1000—1470 ч работы. Образец плавниковой трубы диаметром 32 мм, толщиной стенки 5 мм, подвергнутый комплексному действию такого же внутреннего давления (соответствующего  $\sigma = 8$  кгс/мм<sup>2</sup>) и изгиба при температуре 600°С, разрушился через 260 ч работы. Образцы, которые испытывались на отрыв ребра от трубы, разрушались при  $\sigma = 10$  кгс/мм<sup>2</sup> и 600°С. Из труб диаметром 38 мм и толщиной стенки 4 мм изготовлены элементы опытного пароперегревателя котла. Эти трубы, оребренные методом высокочастотной сварки, более трех лет работают без разрушений. На рис. 111 показан образец плавниковой трубы.

**Приварка спиральных ребер.** Технология и контактная система для приварки к трубам спиральных ребер созданы ИЭС им. Е. О. Патона. Принципиальная схема процесса показана на рис. 112. Трубе 1, к которой приваривается ребро, с помощью специальных механизмов придается движения: поступательное вдоль и вращательное вокруг оси. Под углом к образующей поверхности трубы подается лента 2, которая узкой гранью поджимается к трубе с помощью специального ролика 4. Перед местом

<sup>1</sup> Авт. свид. № 287722.

<sup>2</sup> Авт. свид. № 346055.

схождения ребра и поверхности трубы образуется щель, аналогичная щели между кромками трубы и ленты при сварке спиральношовных труб. На расстоянии 40—50 мм от места схождения ребра и трубы с помощью скользящих контактов 3 подводится ток частотой 440 кГц. Ток разогревает поверхности ребра и трубы, которые при последующем обжатии свариваются.

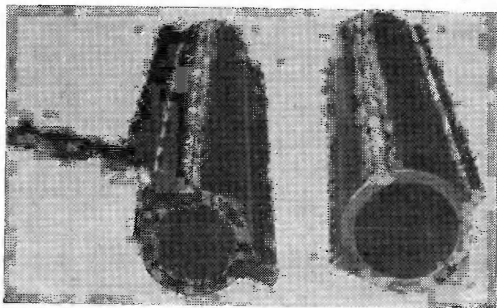


Рис. 111. Плавниковая труба

В технологии приварки спиральных ребер к трубам так же, как и при сварке любых несимметричных систем, важны выбор и отработка приема выравнивания температуры свариваемых

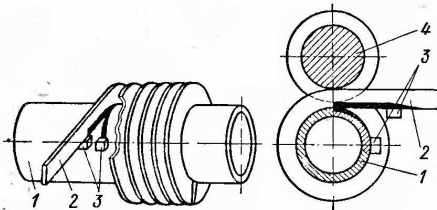


Рис. 112. Схема изготовления труб со спиральным ребром

поверхностей ребра и трубы. Поскольку требования к качеству сварного соединения таких труб не столь высоки, как, например, при сварке продольного шва профиля или плавниковых труб, удовлетворительное качество получено за счет некоторого увеличения расстояния от контакта на трубе до места ее схождения с ребром.

## 21. Перспективы применения высокочастотной сварки

Высокочастотная сварка металлов на первом этапе была введена в трубозлектросварочное производство и производство оболочек кабеля. При высокочастотной сварке труб условия нагрева и теплопередачи на обеих свариваемых кромках одинаковы, и для получения равной температуры на кромках контакты и индуктор размещаются симметрично. На втором этапе высокочастотная сварка была применена для изготовления несимметричных систем (незамкнутого профиля, оребренных труб и т. д.).

Приводим краткий обзор процессов, в которых высокочастотная сварка до сих пор не нашла применения, но целесообразность ее использования очевидна. Все эти процессы характеризуются повышенной трудностью достижения оптимальной температуры на обоих изделиях, создания оборудования, решения организационных вопросов.

### Сварка биметаллических полос.

Для изготовления ножовочных полотен и других изделий целесообразно использовать полосу, изготовленную из двух элементов, имеющих различные свойства. Часть полотна, на которой нарезаются зубья, должна быть изготовлена из твердой износостойчивой стали. Вторую часть полотна можно выполнять из дешевой низкоуглеродной стали. Такую биметаллическую полосу можно сваривать т. в. ч. из двух полос различных сталей. Толщина полос должна быть одинаковой, а ширина может быть различной. Принципиальная схема высокочастотной сварки биметаллических полос представлена на рис. 113.

Полосы 1 и 2, подготовленные для высокочастотной сварки, протягиваются приводными валками 5 через шовосжимающую клетку, состоящую из шовосжимающих валков 3 и валков 4, удерживающих от смещения. Перед шовосжимающей клеткой между полосами создается угол 2—7°. На расстоянии 20—100 мм на полосы устанавливаются контакты 6, которые подводят к полосам ток.

Интенсивность нагрева каждой из кромок регулируется за счет изменения положения контактов. Контакт на более широкой полосе должен быть установлен на большем расстоянии от места сварки. Разрабатывается также устройство для регулировки тока узкой полосы при постоянном токе широкой полосы.

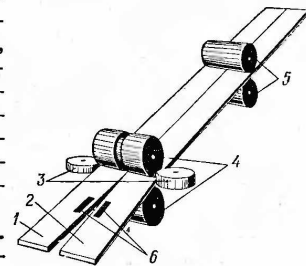


Рис. 113. Принципиальная схема сварки биметаллических полос

Установки для сварки полос созданы и эксплуатируются в США. Ведутся работы по созданию технологии и оборудования для сварки биметаллических и триметаллических полос и в СССР. Кроме того, в СССР опытные установки для сварки полос используются в экспериментах с целью исследования свариваемости низколегированных и сложнoleгированных сталей значительной толщины в случаях, когда организация эксперимента при сварке реального изделия затруднительна.

**Изготовление биметаллической проволоки.** В электротехнической и других отраслях промышленности используется большое количество биметаллической проволоки с различным сочетанием металлов: сталь и медь, сталь и алюминий, алюминий и медь и др. Для изготовления такой проволоки используется многократная прокатка биметаллической заготовки или напрессование поверхностного слоя на движущуюся проволоку. Первый процесс очень сложен и трудоемок, второй позволяет изготавливать биметаллическую проволоку с поверхностным слоем из алюминия.

Применение высокочастотной сварки при изготовлении биметаллической проволоки представляется целесообразным. Принципиальная схема этого процесса во многом напоминает схему высокочастотной сварки оболочек кабеля. Проволока, предназначенная для сердечника, разматывается из бунта, и передний конец ее с помощью стыковочной машины приваривается к заднему концу проволоки предыдущего бунта. Для обеспечения непрерывности процесса определенное количество проволоки накапливается в петлевом устройстве. Затем проволока проходит через внутренний калибр валков формовочного устройства, сварочной машины, редуцирующего и калибровочного станок и наматывается на барабан с готовой продукцией.

Лента, служащая для изготовления наружной оболочки биметаллической проволоки, разматывается из рулона, стыкуется с лентой предыдущего рулона, проходит через петлевое устройство, создавая в нем необходимый запас для обеспечения непрерывности процесса, и поступает в формовочный стан. В формовочном стане лента сворачивается в трубную заготовку, как это делается на трубозлектросварочных станках. При этом проволока, заправленная в агрегат, ранее оказывается внутри трубной заготовки. Затем трубная заготовка вместе с сердечником поступает в сварочную машину, где ее кромки нагреваются т. в. ч., сдавливаются с помощью валков и свариваются. Сваренная труба поступает в редуцирующий стан, где последовательно уменьшаются ее диаметр и толщина стенки. Скорость движения трубы все время нарастает и на выходе становится равной скорости движения проволоки. В калибровочном стане наружная труба плотно обжимается на внутренней проволоке.

Размеры свариваемой наружной трубы выбираются из условий рациональных режимов сварки и редуцирования. Наличие токопроводящего сердечника, расположенного внутри трубной

заготовки, повышает ток шунтирования, замыкающийся по периметру внутри трубной заготовки. Кроме того, изменения положения проволоки внутри трубной заготовки могут приводить к колебаниям режима нагрева. Однако эти трудности носят принципиальный характер и могут быть преодолены.

**Непрерывная печная сварка труб с предварительным подогревом кромок токами высокой частоты.** В трубной промышленности широко распространен способ производства труб на непрерывных станах печной сварки. Непрерывно движущаяся полоса в газовых печах нагревается по всей ширине до температуры 1350—1400° С, затем формируется в трубную заготовку и при обжатии кромок сваривается в трубу. Этот процесс характеризуется высокой производительностью (до 600 м/мин), низкими требованиями к качеству исходной полосы. Трубы, изготовленные на станах непрерывной печной сварки, имеют самую низкую себестоимость. Однако, ввиду того что полоса нагрета до высокой температуры на всю ширину, не представляется возможным обеспечить в стыке достаточное усилие осадки. Поэтому качество сварного соединения получается невысоким. Трубы используются только при низких давлениях. Кроме того, нагрев больших поверхностей до сварочной температуры приводит к значительным потерям металла на угар и окалину и требует больших затрат энергии.

Для изготовления труб печной сваркой можно нагревать т. в. ч. до высокой температуры только кромки заготовки. Весь остальной металл достаточно нагреть до 1000—1100° С, чтобы обеспечить формовку трубной заготовки на существующем оборудовании и редуцирование сваренной трубы.

Известны два варианта выполнения печной сварки труб с предварительным подогревом кромок.

1. Подогрев кромок полосы током частотой 2,5; 8 или 10 кГц на участке между печью и формовочным станом с помощью линейных индукторов.

2. Подогрев кромок трубной заготовки током частотой 8, 10 или 440 кГц на участке между формовочным станом и шовосжимающей клетью с помощью охватывающих индукторов.

Оба варианта опробованы: на Таганрогском металлургическом заводе — током частотой 10 кГц с линейными и охватывающими индукторами и на Челябинском трубопрокатном заводе — током частотой 440 кГц с охватывающим индуктором. Получены хорошие результаты. Однако процесс внедрения задерживается из-за трудности достижения устойчивости кромок и обеспечения достаточной работоспособности высокочастотного оборудования в условиях печных станок.

**Дуговая сварка под слоем флюса с предварительным подогревом кромок токами высокой частоты.** Дуговая сварка под слоем флюса металла большой толщины в настоящее время является по существу единственным способом производства труб

большого диаметра, изготовления корпусов кораблей, емкостей и т. д.

Недостатком этого процесса является низкая скорость сварки и большой объем нагреваемого дугой металла кромок свариваемого изделия. Скорость сварки может быть существенно повышена, а объем нагреваемого металла снижен, если свариваемые кромки предварительно подогреть током частотой 8—10 или 440 кГц. Так, американская фирма «Корбайт» получила положительные результаты при дуговой сварке под слоем флюса металлических плит толщиной до 20 мм. Предварительный подогрев осуществлялся током частотой 500 кГц. Мощность лампового генератора составляла 280 кВт. Передача энергии к кромкам осуществлялась с помощью скользящих контактов, установленных на расстоянии 150—170 мм от зоны сварки. Сварка плит толщиной 20 мм была выполнена двухдуговой головкой за один проход со скоростью 7 м/мин. Ширина шва была максимальной (22—24 мм) в верхней части, со стороны поступления высокочастотной энергии и энергии дуги и постепенно снижалась к низу до 8—10 мм.

В СССР работы по созданию технологии дуговой сварки с предварительным подогревом т. в. ч. ведет ИЭС им. Е. О. Патона.

**Наплавка изношенного инструмента с предварительным подогревом наплавляемой поверхности токами высокой частоты.** В последние годы износившийся инструмент (валки, элементы штампов, валы, подшипники скольжения) ремонтируют с использованием дуговой наплавки. Сущность способа заключается в том, что на износившиеся поверхности детали наплавляется слой металла, толщина которого несколько выше толщины износа. Затем деталь подвергается механической обработке и термообработке. Скорость наплавки ограничена из-за того, что и нагрев инструмента, и расплавление электрода осуществляются за счет мощности дуги. Производительность наплавки можно существенно повысить, если износившуюся поверхность детали перед наплавкой нагреть с помощью т. в. ч. до температуры, близкой к температуре плавления. Глубина разогрева металла может быть небольшой, и расход электроэнергии будет незначителен.

Если же глубину разогрева существенно увеличить, можно не только наплавить, но и переплавить слой металла, толщина которого зависит от частоты тока, используемого при подогреве, времени, а также режима дуговой наплавки. Представляется целесообразным использовать этот процесс для дуговой перепарки технологического шва, полученного методом высокочастотной сварки.

**Одновременная стыковая высокочастотная сварка изделий конечной длины.** В 1970-е годы зарубежные фирмы начали уделять серьезное внимание созданию технологии и оборудования для стыковой высокочастотной сварки изделий конечной длины. При этом способе свариваемые изделия устанавливаются с зазором, обеспечивающим отсутствие пробоев. С одной стороны с по-

мощью специальных зажимов к кромкам изделий подводится ток высокой частоты. С другой стороны кромки замыкаются между собой. При такой схеме токи на кромках имеют встречное направление. Это обеспечивает благоприятное действие эффекта близости, концентрирующего ток на свариваемых поверхностях. Возможны и другие способы передачи тока к свариваемым кромкам. После нагрева кромок до сварочной температуры полосы сжимаются и свариваются, а токоподводы автоматически отсоединяются.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Значения функции  $F\left(\frac{x \pm \xi}{2\sqrt{at}}\right)$  [35]

$\frac{x \pm \xi}{2\sqrt{at}}$	$F\left(\frac{x \pm \xi}{2\sqrt{at}}\right)$	$\frac{x \pm \xi}{2\sqrt{at}}$	$F\left(\frac{x \pm \xi}{2\sqrt{at}}\right)$	$\frac{x \pm \xi}{2\sqrt{at}}$	$F\left(\frac{x \pm \xi}{2\sqrt{at}}\right)$	$\frac{x \pm \xi}{2\sqrt{at}}$	$F\left(\frac{x \pm \xi}{2\sqrt{at}}\right)$
0,00	—	0,67	1,926	1,34	1,274	2,01	1,124
0,01	112,9	0,68	1,904	1,35	1,270	2,02	1,123
0,02	54,47	0,69	1,883	1,36	1,266	2,03	1,121
0,03	37,60	0,70	1,863	1,37	1,263	2,04	1,120
0,04	28,23	0,71	1,844	1,38	1,260	2,05	1,119
0,05	22,60	0,72	1,825	1,39	1,256	2,06	1,118
0,06	18,82	0,73	1,807	1,40	1,252	2,07	1,117
0,07	16,15	0,74	1,789	1,41	1,249	2,08	1,116
0,08	14,14	0,75	1,772	1,42	1,245	2,09	1,115
0,09	12,58	0,76	1,756	1,43	1,242	2,10	1,113
0,10	11,32	0,77	1,739	1,44	1,239	2,11	1,112
0,11	10,30	0,78	1,724	1,45	1,236	2,12	1,111
0,12	9,449	0,79	1,709	1,46	1,233	2,13	1,110
0,13	8,732	0,80	1,694	1,47	1,229	2,14	1,109
0,14	8,112	0,81	1,679	1,48	1,226	2,15	1,108
0,15	7,577	0,82	1,665	1,49	1,223	2,16	1,107
0,16	7,113	0,83	1,652	1,50	1,221	2,17	1,106
0,17	6,700	0,84	1,639	1,51	1,217	2,18	1,105
0,18	6,335	0,85	1,626	1,52	1,215	2,19	1,104
0,19	6,009	0,86	1,614	1,53	1,212	2,20	1,103
0,20	5,716	0,87	1,602	1,54	1,210	2,21	1,102
0,21	5,452	0,88	1,591	1,55	1,207	2,22	1,102
0,22	5,211	0,89	1,579	1,56	1,204	2,23	1,101
0,23	4,991	0,90	1,568	1,57	1,202	2,24	1,101
0,24	4,790	0,91	1,557	1,58	1,199	2,25	1,099
0,25	4,607	0,92	1,547	1,59	1,197	2,26	1,098
0,26	4,438	0,93	1,536	1,60	1,194	2,27	1,097
0,27	4,280	0,94	1,526	1,61	1,192	2,28	1,096
0,28	4,135	0,95	1,517	1,62	1,190	2,29	1,095
0,29	3,999	0,96	1,508	1,63	1,187	2,30	1,095
0,30	3,873	0,97	1,498	1,64	1,185	2,31	1,094
0,31	3,755	0,98	1,489	1,65	1,183	2,32	1,093
0,32	3,647	0,99	1,480	1,66	1,181	2,33	1,092
0,33	3,542	1,00	1,472	1,67	1,179	2,34	1,091
0,34	3,445	1,01	1,463	1,68	1,176	2,35	1,091
0,35	3,355	1,02	1,455	1,69	1,174	2,36	1,090
0,36	3,268	1,03	1,447	1,70	1,172	2,37	1,089
0,37	3,186	1,04	1,440	1,71	1,170	2,38	1,088
0,38	3,110	1,05	1,432	1,72	1,168	2,39	1,088
0,39	3,038	1,06	1,425	1,73	1,166	2,40	1,087
0,40	2,969	1,07	1,418	1,74	1,165	2,41	1,086
0,41	2,905	1,08	1,411	1,75	1,163	2,42	1,085
0,42	2,842	1,09	1,404	1,76	1,161	2,43	1,085
0,43	2,784	1,10	1,396	1,77	1,159	2,44	1,084
0,44	2,726	1,11	1,390	1,78	1,157	2,45	1,083
0,45	2,674	1,12	1,384	1,79	1,156	2,46	1,083
0,46	2,623	1,13	1,378	1,80	1,154	2,47	1,082
0,47	2,574	1,14	1,372	1,81	1,152	2,48	1,081
0,48	2,533	1,15	1,366	1,82	1,150	2,49	1,081
0,49	2,482	1,16	1,360	1,83	1,149	2,50	1,080
0,50	2,441	1,17	1,354	1,84	1,147	2,51	1,079
0,51	2,399	1,18	1,349	1,85	1,146	2,52	1,079
0,52	2,360	1,19	1,343	1,86	1,145	2,53	1,078
0,53	2,323	1,20	1,337	1,87	1,143	2,54	1,078
0,54	2,288	1,21	1,333	1,88	1,142	2,55	1,077
0,55	2,252	1,22	1,327	1,89	1,140	2,56	1,076
0,56	2,219	1,23	1,323	1,90	1,139	2,57	1,076
0,57	2,187	1,24	1,318	1,91	1,137	2,58	1,075
0,58	2,157	1,25	1,313	1,92	1,136	2,59	1,075
0,59	2,127	1,26	1,309	1,93	1,134	2,60	1,074
0,60	2,099	1,27	1,304	1,94	1,133	2,61	1,073
0,61	2,072	1,28	1,299	1,95	1,131		
0,62	2,045	1,29	1,295	1,96	1,130		
0,63	2,019	1,30	1,290	1,97	1,129		
0,64	1,994	1,31	1,286	1,98	1,128		
0,65	1,971	1,32	1,282	1,99	1,126		
0,66	1,948	1,33	1,278	2,00	1,125		

Продолжение приложения 1

$\frac{x \pm \xi}{2\sqrt{at}}$	$F\left(\frac{x \pm \xi}{2\sqrt{at}}\right)$	$\frac{x \pm \xi}{2\sqrt{at}}$	$F\left(\frac{x \pm \xi}{2\sqrt{at}}\right)$	$\frac{x \pm \xi}{2\sqrt{at}}$	$F\left(\frac{x \pm \xi}{2\sqrt{at}}\right)$	$\frac{x \pm \xi}{2\sqrt{at}}$	$F\left(\frac{x \pm \xi}{2\sqrt{at}}\right)$
2,62	1,073	2,69	1,069	2,76	1,066	2,83	1,062
2,63	1,072	2,70	1,069	2,77	1,065	2,84	1,062
2,64	1,072	2,71	1,068	2,78	1,065	2,85	1,062
2,65	1,071	2,72	1,068	2,79	1,064	2,86	1,061
2,66	1,071	2,73	1,067	2,80	1,064	2,87	1,061
2,67	1,070	2,74	1,067	2,81	1,063	2,88	1,060
2,68	1,070	2,75	1,066	2,82	1,063	2,89	1,060

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Примеры расчетов электрических параметров кромок и индукторов

Расчет электрических параметров любой системы передачи тока к кромкам следует начинать с расчета электрических параметров кромок при контактном подводе тока.

Расчет параметров кромок при контактном подводе тока. Рассчитаем электрические параметры свариваемых кромок при сварке труб из низкоуглеродистой стали с  $D = 0,219$  м,  $2d = 0,007$  м со скоростью  $v = 1$  м/с. Исходные данные:  $f = 440$  кГц, температура сварки  $T_0 = 1500^\circ\text{C}$ , угол схождения кромок  $\alpha = 3^\circ$ , длина нагреваемых кромок  $L_{кр} = 0,165$  м, зазор между внутренним магнитопроводом и кромками  $b_1 = 0,01$  м. Наружный магнитопровод не применяется. Теплофизические свойства стали при  $T = 800^\circ\text{C}$  (средней для диапазона от  $20$  до  $1500^\circ\text{C}$ ):  $\lambda = 41,87$  Вт/(м·°C),  $a = 6,25 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с,  $\rho_k = 118 \cdot 10^{-8}$  Ом·м [ $\gamma = 1/\rho = 1/(118 \cdot 10^{-8})$  (Ом·м)<sup>-1</sup>].

Определим максимальный зазор между кромками на участке нагрева

$$2h_{\max} = 2L_{кр} \sin(\alpha/2) = 2 \cdot 0,165 \cdot 0,026 = 0,0086 \text{ м};$$

максимальный относительный зазор  $(h/d)_{\max} = 0,0043/0,0035 \approx 1,23$ ; относительный зазор между магнитопроводом и кромками  $b_1/d = 0,01/0,0035 \approx 2,85$ ;

отношение диаметра к толщине кромок  $D/2d = 0,219/0,007 \approx 31,5$ .

Поскольку это отношение довольно мало, коэффициент  $k_{R \text{ ср}}$  находим с учетом кривизны кромок по графику рис. 42, на котором приведена зависимость  $k_R$  от  $h/d$  для параллельных кромок. Для кромок, сходящихся под углом, средний коэффициент определяем как  $k_R$  для средней величины зазора, равной половине  $(h/d)_{\max}$ , т. е.  $k_{R \text{ ср}} = 0,4$ .

Найдем горячую глубину проникновения по формуле (8) при  $\mu = 1$ :

$$\Delta_k = \sqrt{2 \cdot 118 \cdot 10^{-8} / (2 \cdot 3,14 \cdot 440 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 1)} = 0,83 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

С учетом  $\Delta_k$  определим активные сопротивления стальных кромок: при  $T = 800^\circ\text{C}$  и  $h/d = 0$  или  $b/d = 0$  по формуле

$$R_0 = \frac{\rho_k}{\Delta_k} \frac{2L_{кр}}{2d} = \frac{118 \cdot 10^{-8}}{0,83 \cdot 10^{-3}} \frac{2 \cdot 0,165}{0,007} = 0,067 \text{ Ом};$$

для реальных зазоров по формуле (49)

$$R_{кр} = R_0 k_{R \text{ ср}} = 0,067 \cdot 0,4 = 0,0268 \text{ Ом}.$$

Рассчитаем внешнюю индуктивность кромок по формуле (65), взяв значения  $R_{mI}$ ,  $R_{mII}$ ,  $R_{mIII}$  из графика рис. 43:

$$L_{\text{вн. ср}} = 1/[6 + 12,3 + 11,3 \cdot 10^5] \approx 3,37 \cdot 10^{-7} \text{ Г/м}.$$

Найдем индуктивное сопротивление кромок по формуле

$$X_{кр. вн} = \omega L_{вн. ср} l_{кр} = 2 \cdot 3,14 \cdot 440 \cdot 10^3 \cdot 3,37 \cdot 10^{-7} \cdot 0,165 = 0,153 \text{ Ом.}$$

Для определения параметра  $\xi/(2\sqrt{at})$  рассчитаем время нагрева

$$t = l_{кр}/v = 0,165/1 = 0,165 \text{ с.}$$

Тогда при  $\xi \approx \Delta_k$

$$\xi/(2\sqrt{at}) = 0,83 \cdot 10^{-3}/(2\sqrt{6,25 \cdot 10^{-6} \cdot 0,165}) \approx 0,411.$$

Определим по приложению 1 функцию  $F[\xi/(2\sqrt{at})] = F(0,411) = 2,9$ .

Удельная мощность, необходимая для разогрева поверхности кромок ( $x = 0$ ) до температуры  $T_0$  при  $h/d = 0$  или  $b/d = 0$ , рассчитывается по формуле

$$p_0 = \frac{2\lambda T_0}{\xi \{F[\xi/(2\sqrt{at})] - 1\}} = \frac{2 \cdot 41,87 \cdot 1500}{0,83 \cdot 10^{-3} (2,9 - 1)} \approx 80 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2,$$

а мощность кромок с учетом реальных зазоров  $h/d$  и  $b/d$  при  $\mu = 1$  и  $kP_{ср} = 1,58$  (коэффициент взят по графику рис. 46) будет равна

$$P_{кр} = p_0 2l_{кр} 2dkP_{ср} = 80 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 0,165 \cdot 0,007 \cdot 1,58 = 291 \cdot 10^3 \text{ Вт.}$$

Тогда ток кромок

$$I_{кр} = \sqrt{P_{кр}/R_{кр}} = \sqrt{291 \cdot 10^3/0,0268} = 3,3 \cdot 10^3 \text{ А.}$$

При сварке труб из ферромагнитного материала для определения сопротивления и мощности следует умножить  $R_{кр}$  и  $P_{кр}$  на коэффициент  $k_{мср} = 1,15$ , найденный по графику рис. 49 в зависимости от отношения  $I_{кр}/2d = 3,3 \times 10^3/0,007 = 47 \cdot 10^3 \text{ А/м}$ :

$$R_{кр \mu} = 0,0268 \cdot 1,15 = 0,031 \text{ Ом;}$$

$$P_{кр \mu} = 291 \cdot 10^3 \cdot 1,15 = 335 \cdot 10^3 \text{ Вт.}$$

Определим индуктивное сопротивление с учетом магнитного потока внутри кромок

$$X_{кр} \approx X_{кр. вн} + R_{кр \mu} = 0,153 + 0,031 = 0,184 \text{ Ом;}$$

полное сопротивление кромок

$$Z_{кр \mu} = \sqrt{X_{кр}^2 + R_{кр \mu}^2} = \sqrt{0,184^2 + 0,031^2} = 0,186 \text{ Ом;}$$

напряжение на кромках

$$U_{кр} = I_{кр} Z_{кр \mu} = 3,3 \cdot 10^3 \cdot 0,186 = 614 \text{ В.}$$

При сварке с контактным подводом тока полученных параметров достаточно для расчета элементов сварочных устройств по методике, приведенной в работах [8, 14, 30].

Расчет электрических параметров кромок при индукционном подводе тока охватывающим индуктором. Проведем расчет для индуктора с размерами: диаметр катушки  $D_{и} = 0,25 \text{ м}$ , длина ее  $a_{и} = 0,2 \text{ м}$  и для трубы с диаметром  $D = 0,219 \text{ м}$ . Длина нагреваемых кромок  $l_{кр} = 0,2 \text{ м}$  принимается равной расстоянию от торца катушки до места схождения кромок. Она несколько больше, чем при контактном подводе тока, так как ближе не удается разместить индуктор. Параметры кромок с  $l_{кр} = 0,2 \text{ м}$ , рассчитанные по приведенной выше методике, следующие:  $R_{кр \mu} = 0,0313 \text{ Ом}$ ;  $X_{кр} = 0,259 \text{ Ом}$ ;  $U_{кр} = 693 \text{ В}$ ;  $Z_{кр \mu} = 0,261 \text{ Ом}$ ;  $P_{кр \mu} = 372 \cdot 10^3 \text{ Вт}$ ;  $I_{кр} = 3,44 \cdot 10^3 \text{ А}$ .

Определим индуктивные сопротивления, обусловленные магнитным потоком: в зазоре между индуктором и заготовкой по формуле (76)

$$X_S = 2 \cdot 3,14 \cdot 440 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \frac{3,14 (0,25^2 - 0,219^2)}{4 \cdot 0,2} \approx 0,2 \text{ Ом;}$$

во внешнем пространстве по формуле (77)

$$X_{вн} = 0,2 \cdot 0,9/(1 - 0,9) = 1,8 \text{ Ом,}$$

где  $k_{м} = 0,9$  определен по графику рис. 54 для  $D_{и}/D = 0,25/0,219 = 1,14$  и  $a_{и}/D = 0,2/0,219 = 0,91$ .

Напряженность магнитного поля на поверхности заготовки под индуктором найдем по формуле  $H_e = I_{кр}/a_{и} = 3,44 \cdot 10^3/0,2 = 17,2 \cdot 10^3 \text{ А/м}$ . По значению  $H_e$  определим  $\mu_e = 90$  (рис. 6). Тогда холодную глубину проникновения для стали с  $\rho_x = 20 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  получим по формуле (8)

$$\Delta_e = \sqrt{2 \cdot 20 \cdot 10^{-8}/(2 \cdot 3,14 \cdot 440 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 90 \cdot 1)} = 0,032 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Далее определим активное сопротивление трубной заготовки по формуле (79):

$$R_{тн} = 1,37 \cdot 20 \cdot 10^{-8} \cdot 3,14 \cdot 0,219/(0,032 \cdot 10^{-3} \cdot 0,2) = 0,0295 \text{ Ом.}$$

Коэффициент использования мощности, выделившейся в трубе, равен

$$\eta_{и} = R_{кр \mu}/(R_{кр \mu} + R_{тн}) = 0,0313/(0,0313 + 0,0295) = 0,51;$$

активное сопротивление одновиткового индуктора ( $\rho_{и} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ) по формуле (78)

$$R_{и} = 2 \cdot 10^{-8} \cdot 3,14 \cdot 0,25/(0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,2) = 0,734 \cdot 10^{-3} \text{ Ом,}$$

где  $\Delta_{и} = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  взята по табл. 1;

эквивалентное индуктивное сопротивление индуктора по формуле (80)

$$X_{и.э} = [1,8 (0,259 + 0,2)]/(1,8 + 0,259 + 0,2) = 0,365 \text{ Ом;}$$

приведенное сопротивление трубной заготовки со щелью

$$R'_{т.кр} = \frac{R_{кр \mu} + R_{тн}}{[1 + (X_{кр} + X_S)/X_{вн}]^2} = \frac{0,031 + 0,0295}{[1 + (0,259 + 0,2)/1,8]^2} = 0,0387 \text{ Ом;}$$

эквивалентное активное сопротивление индуктора

$$R_{и.э} = R_{и} + R'_{т.кр} = 0,734 \cdot 10^{-3} + 0,0387 = 0,0394 \text{ Ом;}$$

электрический к. п. д. индуктора

$$\eta = R'_{т.кр}/(R_{и} + R'_{т.кр}) = 0,0387/(0,734 \cdot 10^{-3} + 0,0387) = 0,983;$$

мощность, подведенная к индуктору,

$$P_{и} = P_{кр \mu}/(\eta_{и} \eta) = 372 \cdot 10^3/(0,51 \cdot 0,983) = 735 \cdot 10^3 \text{ Вт;}$$

ток индуктора

$$I_{и} = \sqrt{P_{и}/R_{и.э}} = \sqrt{735 \cdot 10^3/0,0394} = 4,32 \cdot 10^3 \text{ А;}$$

эквивалентное полное сопротивление индуктора

$$Z_{и.э} = \sqrt{R_{и.э}^2 + X_{и.э}^2} = \sqrt{0,0394^2 + 0,365^2} = 0,366 \text{ Ом;}$$

напряжение на индукторе

$$U_{и} = I_{и} Z_{и.э} = 4,32 \cdot 10^3 \cdot 0,366 = 1580 \text{ В.}$$

Расчет электрических параметров кромок при индукционном подводе тока внутренним индуктором. Трубы диаметром 0,219 м можно успешно сваривать также при частоте тока 10 кГц. Для передачи тока при этих частотах целесообразно применять внутренний индуктор. Рассчитаем электрические параметры внутреннего индуктора, приняв  $l_{кр} = 0,18 \text{ м}$  (внутренний индуктор можно располагать и ближе к месту схождения кромок, однако при  $l_{кр} < 0,18 \text{ м}$  кожух магнитопровода прогорает),  $a_{и} = 0,3 \text{ м}$ ,  $D_{и.вн} = 0,175 \text{ м}$ . Длина внутреннего и наружного магнитопроводов  $l = 0,6 \text{ м}$ , длина выступающих за катушку концов на участке нагрева  $l_{м} = 0,1 \text{ м}$  и с другой стороны катушки —  $l_{м1} = 0,2 \text{ м}$ . Эквивалентный

диаметр внутреннего магнитопровода  $D_{\text{вн}} = 0,1$  м. Зазоры между кромками и внутренним магнитопроводом  $b_1 = 0,04$  м, а между кромками и наружным магнитопроводом  $b_2 = 0,02$  м. Максимальный зазор между кромками  $2h_{\text{max}} = 0,0094$  м, средний зазор  $2h_{\text{ср}} = 0,0047$  м ( $h_{\text{ср}} = 0,00235$  м).

Как и в предыдущих примерах, произведем сначала расчет электрических параметров ферромагнитных кромок для контактного подвода тока на частоте 10 кГц, используя коэффициенты для ярко выраженного поверхностного эффекта, так как на боковых поверхностях  $\mu \gg 1$  и  $\Delta_e \gg d$ :

$$R_{\text{кр} \mu} = 4,45 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad X_{\text{кр. вн}} = 2,83 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad P_{\text{кр} \mu} = 942 \cdot 10^3 \text{ Вт}; \\ X_{\text{кр}} = 7,28 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad Z_{\text{кр} \mu} = 8,52 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad I_{\text{кр} \mu} = 14,9 \cdot 10^3 \text{ А}.$$

Найдем удельные магнитные сопротивления воздушных промежутков между воображаемым элементом цилиндрической поверхности, соединяющим внутренние углы кромок ( $D_{\text{вн}} = 0,205$  м), и выступающими за катушку концами магнитопроводов по графику рис. 43, а, исходя из средних значений зазора между кромками:

для переднего конца

$$h_{\text{ср}}/b_1 = 0,00235/0,04 = 0,0588 \text{ и } R_{\text{млн}} = 9,2 \cdot 10^5 \text{ м/Г};$$

для заднего конца (если  $\alpha = 3^\circ$ )

$$[(l_{\text{кр}} + a_{\text{н}} + l_{\text{м}}/2) \sin(\alpha/2)]/b_1 = [(0,18 + 0,3 + 0,2/2) 0,0262]/0,04 \approx 0,38 \text{ и } R_{\text{млн}} = 5,1 \cdot 10^5 \text{ м/Г}.$$

Полное магнитное сопротивление двух промежутков с учетом их длины

$$R_{\text{мл}} = R_{\text{млн}}/[(l_{\text{м}} + l_{\text{кр}})/2] + R_{\text{млс}}/l_{\text{м}} = \\ = 9,2 \cdot 10^5/[(0,1 + 0,18)/2] + 5,1 \cdot 10^5/0,2 = 91,2 \cdot 10^5 \text{ 1/Г}.$$

Определим индуктивное сопротивление, обусловленное магнитным сопротивлением  $R_{\text{мл}}$ ,

$$X_0 = \omega/R_{\text{мл}} = 2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 10^3/91,2 \cdot 10^5 = 6,88 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$$

индуктивное сопротивление кромок, обусловленное внешним полем,

$$X'_{\text{кр. вн}} = \frac{\omega}{\omega/X_{\text{кр. вн}} - R_{\text{млн}}/[(l_{\text{м}} + l_{\text{кр}})/2]} = \\ = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 10^3}{2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 10^3/2,83 \cdot 10^{-3} - 9,2 \cdot 10^5/[(0,1 + 0,18)/2]} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$$

индуктивное сопротивление кромок с учетом потока в нагретом слое

$$X'_{\text{кр}} = X'_{\text{кр. вн}} + R_{\text{кр} \mu} = 4 \cdot 10^{-3} + 4,45 \cdot 10^{-3} = 8,45 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$$

индуктивное сопротивление рассеяния одновиткового индуктора ( $W = 1$ )

$$X_S = \omega L_S = (\omega \mu_0/4\pi) D_{\text{м}} \varphi (D_{\text{м}}/a_{\text{н}}; D_{\text{вн}}/D_{\text{м}}) = \\ = (2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}/4 \cdot 3,14) 0,1 \cdot 7 = 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$$

коэффициент  $\varphi(D_{\text{м}}/a_{\text{н}}; D_{\text{вн}}/D_{\text{м}}) = \varphi(0,1/0,3; 0,205/0,1) = \varphi(0,333; 2,05) = 7$  берем по графикам рис. 55.

Зная ток кромок, определим  $H_e = I_{\text{кр}}/a_{\text{н}} = 14,9 \cdot 10^3/0,3 \approx 50 \cdot 10^3$  А/м и по кривой рис. 6 найдем  $\mu_e = 33$ . Тогда по формуле (8)  $\Delta_e = 0,388 \cdot 10^{-3}$  м и активное сопротивление по формуле (79)

$$R_{\text{тл}} = 1,37 \cdot 20 \cdot 10^{-8} \cdot 3,14 \cdot 0,205/(0,388 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3) = 1,52 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}.$$

Коэффициент использования мощности, выделяющейся в трубе,

$$\eta_{\text{н}} = R_{\text{кр} \mu}/(R_{\text{кр} \mu} + R_{\text{тл}}) = 4,45 \cdot 10^{-3}/(4,45 \cdot 10^{-3} + 1,52 \cdot 10^{-3}) = 0,743.$$

Расчитаем параметры одновиткового индуктора, предварительно найдя глубину проникновения тока в медь ( $\Delta_{\text{н}} = 0,7 \cdot 10^{-3}$  м).

Активное сопротивление по формуле (78)

$$R_{\text{н}} = 2 \cdot 10^{-8} \cdot 3,14 \cdot 0,175/(0,7 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3) = 0,0505 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$$

коэффициент приведения

$$C = 1/(1 + X'_{\text{кр. вн}}/X_0) = 1/(1 + 4,0 \cdot 10^{-3}/6,88 \cdot 10^{-3}) = 0,633;$$

эквивалентное индуктивное сопротивление

$$X'_{\text{н.э}} = X_S + CX'_{\text{кр}} = 4,4 \cdot 10^{-3} + 0,633 \cdot 8,45 \cdot 10^{-3} = 9,75 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$$

приведенное к индуктору сопротивление трубной заготовки

$$R'_{\text{тл}} = (R_{\text{кр} \mu} + R_{\text{тл}}) C^2 = (4,45 \cdot 10^{-3} + 1,52 \cdot 10^{-3}) \times \\ \times 0,633^2 = 2,39 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$$

эквивалентное активное сопротивление индуктора

$$R'_{\text{н.э}} = R_{\text{н}} + R'_{\text{тл}} = 0,0505 \cdot 10^{-3} + 2,39 \cdot 10^{-3} = 2,44 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$$

электрический к. п. д.

$$\eta = R'_{\text{тл}}/(R_{\text{н}} + R'_{\text{тл}}) = 2,39 \cdot 10^{-3}/(0,0505 \cdot 10^{-3} + 2,39 \cdot 10^{-3}) = 0,98;$$

мощность индуктора

$$P_{\text{н}} = P_{\text{кр}}/\eta_{\text{н}}\eta = 942 \cdot 10^3/0,743 \cdot 0,98 = 1290 \cdot 10^3 \text{ Вт};$$

ток индуктора

$$I'_{\text{н}} = \sqrt{P_{\text{н}}/R'_{\text{н.э}}} = \sqrt{1290 \cdot 10^3/2,44 \cdot 10^{-3}} = 23 \cdot 10^3 \text{ А};$$

полное сопротивление индуктора

$$Z'_{\text{н.э}} = \sqrt{R'^2_{\text{н.э}} + X'^2_{\text{н.э}}} = \sqrt{(2,44 \cdot 10^{-3})^2 + (9,75 \cdot 10^{-3})^2} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$$

напряжение на индукторе

$$U'_{\text{н}} = I'_{\text{н}} Z'_{\text{н.э}} = 23 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 230 \text{ В}.$$

Найдем количество витков индуктора при напряжении источника питания 1000 В:  $W = 1000/230 \approx 4$ .

Определим параметры четырехвиткового индуктора:

$$R_{\text{н.э}} = W^2 R'_{\text{н.э}} = 16 \cdot 2,44 \cdot 10^{-3} = 0,039 \text{ Ом};$$

$$X_{\text{н.э}} = W^2 X'_{\text{н.э}} = 16 \cdot 9,75 \cdot 10^{-3} = 0,156 \text{ Ом};$$

$$Z_{\text{н.э}} = W^2 Z'_{\text{н.э}} = 16 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 0,16 \text{ Ом};$$

$$I_{\text{н}} = I'_{\text{н}}/W = 23 \cdot 10^3/4 = 5,75 \cdot 10^3 \text{ А};$$

$$U_{\text{н}} = U'_{\text{н}} W = 230 \cdot 4 = 920 \text{ В}.$$

Расчет электрических параметров кромок при индукционном подводе тока внутренним индуктором с компенсатором. При увеличении диаметра трубы, например до 0,53 м, можно использовать коаксиально расположенный индуктор с  $D_{\text{н. нар}} = 0,486$  м с теми же зазорами между катушкой и внутренней поверхностью трубы, какие были приняты при расчете индуктора для сварки трубы с  $D = 0,219$  м. При этом сопротивление трубы возрастает примерно в два с половиной раза,  $\eta_{\text{н}}$  упадет до 0,536, а мощность увеличится на 40%. Сварку трубы с  $D = 0,53$  м можно осуществить и прежним индуктором с  $D_{\text{н. нар}} = 0,175$  м и  $D_{\text{м}} = 0,1$  м, но его необходимо сместить от оси трубы к нагреваемым кромкам.



При этом мощность потерь в трубе резко упадет, но увеличатся рассеяние индуктора и мощность потерь в магнитопроводе. В общем балансе эти потери не играют большой роли, но снижают стойкость магнитопровода. Для уменьшения рассеяния применяют компенсатор, который вместе со смещенным к кромкам индуктором заполняет почти все поперечное сечение трубы.

Рассчитаем электрические параметры того же внутреннего индуктора, что и в предыдущем примере, но при сварке трубы с  $D = 0,53$  м с компенсатором (наружный диаметр  $D_k = 0,466$  м и  $b_n = 0,2$  м). Для расчета используем данные:  $l_{кр} = 0,18$  м,  $a_n = 0,3$  м,  $D_{и.нар} = 0,175$  м;  $D_{и} = 0,1$  м;  $D_{вн} = 0,516$  м;  $l_m = 0,1$  м;  $l_{m1} = 0,2$  м;  $b_1 = 0,04$  м;  $b_2 = 0,02$  м;  $2r_{max} = 0,0094$  м.

Так как положение индуктора относительно кромок и его размеры такие же, как и в предыдущем примере, примем следующие значения:

$R_n = 0,0505 \cdot 10^{-3}$  Ом;  $R_{m1} = 91,2 \cdot 10^5$  1/Г;  $R_{кр\mu} = 4,45 \cdot 10^{-3}$  Ом;  $X'_{кр} = 8,45 \cdot 10^{-3}$  Ом;  $X_0 = 6,88 \cdot 10^{-3}$  Ом;  $P_{кр\mu} = 942 \cdot 10^3$  Вт;  $I_{кр} = 14,9 \cdot 10^3$  А.

Активное сопротивление трубной заготовки рассчитаем, приняв, что ток на ее внутренней поверхности под индуктором течет в виде полосы шириной  $a_n = 0,3$  м, а под компенсатором — шириной, увеличивающейся симметрично в обе стороны по линейному закону от  $a_n$  до значения, равного длине компенсатора. Поскольку система симметричная, разобьем половину периметра трубной заготовки на пять зон (табл. П1).

Т а б л и ц а П 1. Основные параметры зон

Зоны	Длина $l$ , м	Ширина $a$ , м	Напряженность магнитного поля на поверхности $H_e \cdot 10^{-3}$ , А/м	Относительная проницаемость $\mu_e$	Глубина проникновения $\Delta_e \cdot 10^3$ , м
I	0,1	0,3	50	33	0,388
II	0,1775	0,3635	41	40	0,353
III	0,1775	0,49	30,5	53	0,306
IV	0,1775	0,617	24,2	65	0,277
V	0,1775	0,7445	20	76	0,256

Определив напряженность магнитного поля по формуле  $H_e = I_{кр}/a$ , найдем по рис. 6 для каждой зоны соответствующие  $\mu_e$  и по формуле (8)  $\Delta_e$  (табл. П1). Тогда по формуле (79) найдем активное сопротивление полной трубы как удвоенную сумму сопротивлений всех участков ( $\rho_x = 20 \cdot 10^{-8}$  Ом·м):

$$R_{тц} = 2 \cdot 1,37 \cdot 20 \cdot 10^{-8} [0,1/(0,388 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3) + 0,1775/(0,333 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3635) + 0,1775/(0,306 \cdot 10^{-3} \cdot 0,49) + 0,1775/(0,277 \cdot 10^{-3} \cdot 0,617) + 0,1775/(0,256 \cdot 10^{-3} \cdot 0,7445)] = 2,95 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Воспользовавшись формулами, приведенными в предыдущем примере, рассчитаем  $\eta_n = 0,6$ ;  $\eta = 0,993$ ;  $P_n = 1580 \cdot 10^3$  Вт.

Приняв средний зазор  $b_{1cp} = 0,025$  м между внутренней поверхностью трубы и располагаемыми внутри нее индуктором и компенсатором, найдем индуктивное сопротивление рассеяния одновиткового индуктора

$$X_S = 2\pi f L_{S1} b_{1cp} = 2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 2,9 \cdot 10^{-6} \cdot 0,025 = 4,55 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

(индуктивность рассеяния  $L_{S1} = 2,9 \cdot 10^{-6}$  Г/м получена по графикам рис. 56 в зависимости от отношений

$$a_n/D_{вн} = 0,3/0,516 = 0,58 \text{ и } b_n/D_{вн} = 0,2/0,516 = 0,388.$$

Рассчитаем параметры одновиткового индуктора при коэффициенте приведения  $C = 0,633$ ;  $R'_{н.э} = 2,94 \cdot 10^{-3}$  Ом;  $X'_{н.э} = 9,83 \cdot 10^{-3}$  Ом;  $Z'_{н.э} = 10,25 \times 10^{-3}$  Ом;  $I'_{н} = 23,1 \cdot 10^3$  А;  $U'_{н} = 237$  В.

При напряжении питания 1000 В число витков индуктора должно быть равно  $W = 4$ . Параметры четырехвиткового индуктора приведены в табл. П2. Как видно из таблицы, при увеличении длины нагреваемых кромок (и в том же примере на 0,035 м) почти не увеличивается их активное, но существенно повышается индуктивное сопротивление. Повышаются также ток кромок и необходимая для разогрева кромок до сварочной температуры мощность. При индукционном подводе тока для сварки трубы диаметром 0,219 м эта мощность возрастает примерно в два раза по сравнению с мощностью при контактном подводе тока. Из-за рассеяния ток одновиткового индуктора примерно на 30% больше тока, наведенного в кромках, а напряжение повышается примерно в два раза.

Т а б л и ц а П 2. Результаты расчета электрических параметров кромок и индукторов при сварке труб с  $2d = 0,007$  м,  $v = 1$  м/с,  $\alpha = 3^\circ$

Элементы системы сварочное устройство — кромки	Длина кромок, мм	Сопротивление, Ом			Ток, $I \cdot 10^{-3}$ , А	Напряжение, В	Мощность, кВт
		активное	индуктивное	полное			
$f = 440$ кГц							
Кромки:							
при контактном подводе тока	0,165	0,0310	0,184	0,186	3,30	614	335
при индукционном подводе тока	0,200	0,0313	0,259	0,261	3,44	693	372
Одновитковый охватывающий индуктор ( $D = 0,219$ м)	0,200	0,0394	0,365	0,366	4,32	1580	735
$f = 10$ кГц							
Кромки при индукционном подводе тока	0,18	0,00445	0,00728	0,00852	14,9	127	942
Четырехвитковый внутренний индуктор:							
без компенсатора ( $D = 0,219$ м)	0,18	0,039	0,156	0,16	5,75	920	1290
с компенсатором ( $D = 0,53$ м)	0,18	0,0470	0,157	0,164	5,78	950	1580

При сварке труб диаметром 0,219 м с использованием внутреннего индуктора и частоте 10 кГц мощность, передаваемая в кромки, значительно (примерно в 2,5 раза) больше, чем при сварке с охватывающим индуктором и частоте 440 кГц. Ток кромок возрастает в 4,3 раза, напряжение падает в пять раз. Активная мощность увеличивается в 1,8 раза, а полная мощность уменьшается примерно на 25%. С увеличением диаметра свариваемых труб мощность, выделяющаяся в трубе, при использовании охватывающего индуктора возрастает пропорционально диаметру, а при использовании внутреннего индуктора изменяется значительно меньше.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аснин И. М. Расчет электромагнитных полей. Л., ВЭТА, 1939. 164 с.
2. Богатов Н. А., Локшин М. З., Лунин И. В. Высокочастотная сварка прямошовных труб в промышленности.— В кн.: Применение токов высокой частоты в электротермии. Л., «Машиностроение», 1968, с. 237—244.
3. Вигдорович Ю. Б., Юхно Н. Я. Полупроводниковый управляемый выпрямитель с тиристорным управлением на первичной стороне анодного трансформатора.— «Труды ВНИИТВЧ», 1972, вып. 12, с. 142—147.
4. Володин В. П. Поверхностная индукционная закалка. М., Оборонгиз, 1947. 290 с.
5. Гельман А. С. Основы сварки давлением. М., «Машиностроение», 1970. 312 с.
6. Глуханов Н. П., Богданов В. Н. Сварка металлов при высокочастотном нагреве. М.—Л., Машгиз, 1962. 191 с.
7. Головкин Р. В., Лунин И. В. Радиочастотная сварка прямошовных труб. М., Металлургиздат, 1961. 75 с.
8. Донской А. В., Рамм Г. С., Вигдорович Ю. Б. Высокочастотные электротермические установки с ламповыми генераторами. Л., «Энергия», 1974. 208 с.
9. Епихин Л. А., Иванов В. Н. Выбор основных параметров формовки при высокочастотной сварке спиральношовных труб.— «Труды ВНИИТВЧ», 1973, вып. 13, с. 155—162.
10. Иванов В. Н. К расчету активного и индуктивного сопротивлений кромок и активной мощности при радиочастотной сварке труб.— «Труды ВНИИТВЧ», 1966, вып. 7, с. 58—75.
11. Иванов В. Н. Расчет параметров нагрузки при радиочастотной сварке труб с использованием двух магнитопроводов.— «Труды ВНИИТВЧ», 1966, вып. 7, с. 76—93.
12. Иванов В. Н., Епихин Л. А. Радиочастотная сварка тонкостенных спиральношовных труб на опытно-промышленном стане 100—350. — «Труды ВНИИТВЧ», 1968, вып. 9, с. 53—65.
13. Казаков А. Р., Локшин М. З. Исследование температурно-скоростных параметров зоны пластического деформирования при высокочастотной сварке алюминиевых труб.— В кн.: Технология легких сплавов. М., ВИЛС, 1973, вып. 4, с. 77—81.
14. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей. Л., «Энергия», 1970. 415 с.
15. Кубашевский О., Гопкинс Б. Окисление металлов и сплавов. Пер. с англ., М., Изд-во иностр. лит., 1955. 311 с.
16. Кудрявцев А. Р., Иванов В. Н. Расчет параметров кромок трубной заготовки при высокочастотной сварке труб.— «Труды ВНИИТВЧ», 1972, вып. 12, с. 93—106.
17. Лакерник Р. М. Симметричные высокочастотные кабели дальней связи в алюминиевой и стальной оболочках. М., Информэлектро, 1974. 64 с.
18. Локшин М. З., Лунин И. В., Соломоник Е. Я. Производство сварных полуфабрикатов из легких сплавов за рубежом. М., Цветметинформация, 1968, ч. 1, 71 с.; ч. 2, 81 с.
19. Локшин М. З., Лунин И. В. Сварка труб. Алюминиевые сплавы. Производство полуфабрикатов из алюминиевых сплавов. Справочное руководство. М., «Металлургия», 1971. 496 с.
20. Локшин М. З. Исследование, разработка и промышленное внедрение процесса производства прямошовных труб из алюминиевых сплавов. Автореф. канд. дис., М., ВИЛС, 1973. 19 с.
21. Нейман Л. Р. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах. М.—Л., Госэнергоиздат, 1949. 190 с.
22. Нейман Л. Р., Демирчан К. С. Теоретические основы электротехники. Л., «Энергия», 1967. Т. 1, 522 с.; Т. 2, 408 с.
23. Особенности радиочастотной сварки алюминиевой оболочки кабелей.— «Сварочное производство», 1963, № 8, с. 20—22. Авт.: Ю. П. Елѣва, А. Р. Казаков, Р. М. Лакерник и др.
24. Паникаров М. И., Кудрявцев А. Р. Замер температуры в стыке кромок при высокочастотной сварке труб.— В кн.: Производство сварных труб. М., 1972, вып. 1, с. 47—51.
25. Пейсахович В. А., Червинский В. И. Метод расчета электромагнитной системы для высокочастотной сварки труб и профилей.— «Тезисы докладов 8-й Всесоюзной конференции по применению токов высокой частоты в электротермии 15—17 апреля 1975 г.» Л., 1975, ч. 1, с. 63—64.
26. Пейсахович В. А., Червинский В. И. Расчет параметров магнитных сердечников для высокочастотной сварки.— В кн.: Технология легких сплавов. М., ВИЛС, 1976, № 8, с. 36—41.
27. Применение высоковольтного управляемого тиристорного выпрямителя для питания высокочастотных генераторов.— «Труды ВНИИТВЧ», 1975, вып. 15, с. 158—164. Авт.: А. Г. Шварцман, С. Л. Безуглый, В. П. Котляр и др.
28. Рагникова А. И. Метод исследования электрических параметров нагрузки сварочных устройств с индукционным подводом тока.— «Тезисы докладов 8-й Всесоюзной конференции по применению токов высокой частоты в электротермии 15—17 апреля 1975 г.» Л., 1975, ч. 1, с. 80.
29. Радиочастотная сварка труб большого диаметра конечной длины на опытном стане 820 ЧТПЗ.— «Труды ВНИИТВЧ», 1968, вып. 9, с. 74—77. Авт.: В. Н. Богданов, Т. Я. Ольхович, Ю. А. Медников и др.
30. Разработка и внедрение согласующих трансформаторов с незамкнутым магнитопроводом для сварочных установок мощностью 400—1000 кВт.— «Тезисы докладов 7-й Всесоюзной конференции по применению токов высокой частоты в электротермии 15—17 апреля 1975 г.» Л., 1975, ч. 1, с. 62—63. Авт.: И. В. Лунин, П. М. Огнец, В. А. Пейсахович и др.
31. Разработка способа и устройства для высокочастотной сварки конструкционных сталей.— «Применение токов высокой частоты в электротермии (Тезисы докладов 7-й Всесоюзной конференции 25—27 мая)». Л., 1971, с. 46—47. Авт.: Л. Н. Лоховинин, И. В. Лунин, В. И. Червинский и др.
32. Сварка металлов.— «Труды ВНИИТВЧ», 1967, вып. 8, с. 37—52. Авт.: В. Н. Богданов, Б. А. Мартынов, И. В. Лунин и др.
33. Скачко Ю. Н. Расчет тепловых процессов при радиочастотной сварке.— «Автоматическая сварка», 1964, № 2, с. 11—18.
34. Скачко Ю. Н. Электромагнитные параметры сварочной цепи при радиочастотной сварке.— «Автоматическая сварка», 1965, № 10, с. 41—47.
35. Слухоцкий А. Е., Рыскин С. Е. Индукторы для индукционного нагрева машиностроительных деталей. Л., «Энергия», 1974. 264 с.
36. Таблицы физических величин. Справочник под ред. акад. И. К. Кикоина. М., Атомиздат, 1976. 1006 с.
37. Тихомиров В. Г. К расчету трансформатора для индукционного нагрева.— «Труды ВНИИТВЧ», 1963, вып. 4, с. 131—136.
38. Устройство с вращающимися контактными роликами для радиочастотной сварки труб.— «Электротермия», 1966, № 50, с. 8—20. Авт.: В. Н. Богданов, В. Н. Иванов, В. Л. Кулжинский и др.
39. Устройство с контактным подводом тока для высокочастотной сварки труб.— «Труды ВНИИТВЧ», 1972, вып. 12, с. 135—141. Авт.: В. Н. Иванов, В. Л. Кулжинский, Г. А. Громов и др.
40. Чередищенко Г. М. Разработка, исследование и внедрение нового технологического процесса и оборудования для изготовления сварных металлических оболочек кабелей. Автореф. канд. дисс. М., ВНИИметмаш, 1975. 23 с.
41. Шапов А. Н., Бодажков В. А. Проектирование и эксплуатация высокочастотных установок. Л., «Машиностроение», 1974. 280 с.
42. Шварцман А. Г. Определение минимальной температуры предварительного нагрева трубной заготовки из конструкционной стали перед сваркой.— «Электротермия», 1971, вып. 106, с. 15—18.
43. Штери З. Ю., Кржижановский Р. Е. Теплофизические свойства неметаллических материалов. Справочная книга. Л., «Энергия», 1973. 336 с.