

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Оборудование и технология сварочного производства»

# ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ СВАРКИ ДАВЛЕНИЕМ

*Методические рекомендации к практическим занятиям  
для студентов специальности  
1 36 01 06 «Оборудование и технология сварочного производства»  
дневной и заочной форм обучения*



Могилев 2016



## Содержание

1 Практическое занятие № 1. Расчет величины электрических сопротивлений зоны нагрева для контактной точечной сварки.	5
2 Практическое занятие № 2. Расчет параметров режима контактной точечной сварки различных материалов .....	8
3 Практическое занятие № 3. Расчет параметров вторичного контура машин для контактной точечной сварки .....	15
4 Практическое занятие № 4. Изучение принципиальных электрических схем машин для контактной сварки .....	29
Список литературы.....	32

# 1 Практическое занятие № 1. Расчет величины электрических сопротивлений зоны нагрева для контактной точечной сварки

## 1.1 Общие теоретические сведения

Контактная точечная сварка – разновидность контактной сварки, при которой соединение в виде точки образуется за счёт тепла, выделяющегося в деталях при протекании тока между торцами сжатых усилием  $F_{св}$  электродов (рисунок 1.1, а). К электродам подключена вторичная обмотка сварочного трансформатора ТС. Детали нагреваются протекающим сварочным током до образования зоны взаимного расплавления, называемой ядром сварного соединения [1, 2]. Полное количество теплоты, генерируемое между электродами при протекании переменного тока длительностью  $\tau_{св}$ , определяется законом Джоуля-Ленца:

$$Q_{ээ} = \int_0^{\tau_{св}} i^2(\tau) \cdot r_{ээ}(\tau) \cdot d\tau = \int_0^{\tau_{св}} i^2(\tau) \cdot [r_{дд}(\tau) + 2r_{д}(\tau) + 2r_{эд}(\tau)] \cdot d\tau, \quad (1.1)$$

где  $i(\tau)$  – мгновенные значения сварочного тока;

$r_{ээ}(\tau)$  – суммарное сопротивление участка «электрод–электрод» в моменты времени  $\tau \leq \tau_{св}$  (рисунок 1.1, б);

$r_{дд}(\tau)$  – сопротивление контакта «деталь–деталь»;

$r_{д}(\tau)$  – собственное сопротивление деталей;

$r_{эд}(\tau)$  – сопротивление контакта «электрод–деталь».

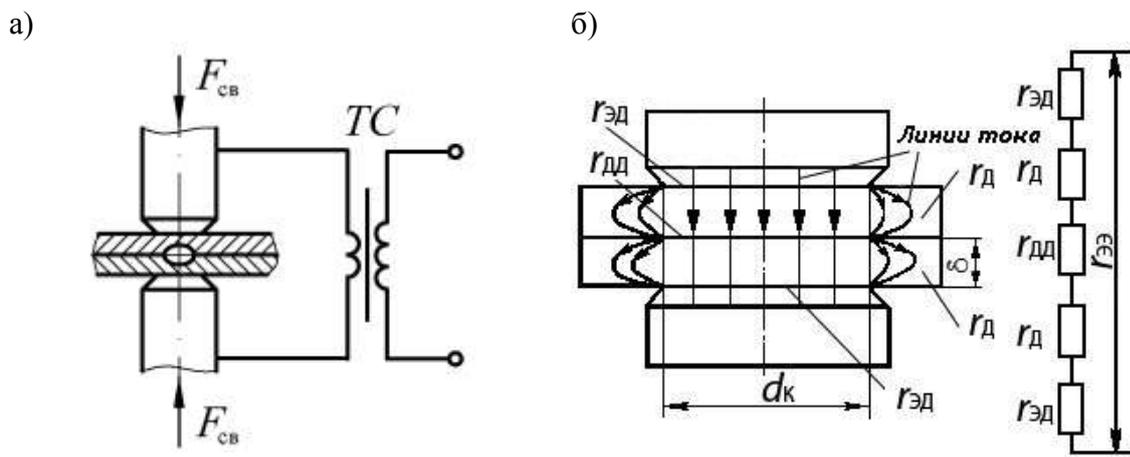


Рисунок 1.1 – Схема контактной точечной сварки (а) и общее сопротивление деталей при сварке (б)

Величина сопротивления участка «электрод–электрод»  $r_{ээ}$  и его распределение в зоне сварки существенно влияют на условия нагрева и температурное поле. При протекании сварочного тока сопротивление  $r_{ээ}$  существенно изменяется (рисунок 1.2).

Первый период процесса точечной сварки I характеризуется резким уменьшением сопротивления  $r_{\text{ЭЭ}}$  за счёт снижения контактных сопротивлений  $r_{\text{ДД}}$  и  $2r_{\text{ЭД}}$ , которое не компенсируется повышением  $2r_{\text{Д}}$  за счёт роста удельного электрического сопротивления  $\rho$  деталей при нагреве. Удельные электрические сопротивления различных металлов и сплавов в зависимости от температуры представлены в таблице 1.1 [3, 4].

Таблица 1.1 – Удельное электрическое сопротивление металлов

Металл	$T_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$	Удельное электрическое сопротивление металлов $\rho$ , мкОм·см при температуре нагрева, $^\circ\text{C}$						
		20	100	200	400	700	800	900
Сталь 08кп	1525	14,7	17,8	25,2	44,8	89,8	107,3	112,4
Сталь 40Х	1425	27,8	32,4	40,5	71,7	133	–	–
Сталь 12Х18Н10Т	1425	72	79	86	98	111,7	115	118
Медь	1083	1,7	2,3	3	4,8	–	7,5	9,6
Алюминий	600	2,7	3,9	4,8	8	–	–	–
Титан	1725	48	75	106	133	–	145	150

При расчёте тепловых процессов точечной сварки в качестве сопротивления  $r_{\text{ЭЭ}}$  можно рассматривать сопротивление двух свариваемых деталей в конце нагрева  $r_{\text{ЭЭК}} = 2r_{\text{ДК}}$  (рисунок 1.2). На рисунке 1.3 приведена схема расчета электрического сопротивления двух деталей  $2r_{\text{ДК}}$  в момент выключения сварочного тока. При этом принимаются следующие допущения:  $r_{\text{ДД}} = 0$ ,  $r_{\text{ЭД}} = 0$ , фактическая площадь касания деталей равна контурной площади ( $S_{\text{Ф}} = S_{\text{К}}$ ) [1].

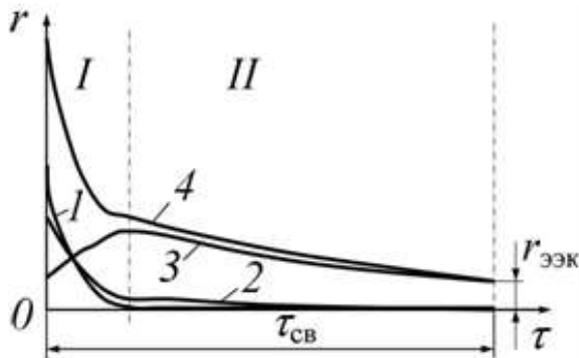


Рисунок 1.2 – Характер изменения сопротивлений участка «электрод–электрод» при протекании сварочного тока: 1 –  $r_{\text{ДД}}$ ; 2 –  $2r_{\text{ЭД}}$ ; 3 –  $2r_{\text{Д}}$ ; 4 –  $r_{\text{ЭЭ}}$

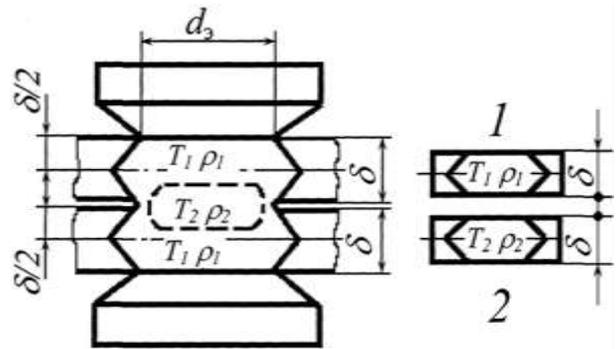


Рисунок 1.3 – Схема расчета электрического сопротивления двух деталей в момент выключения сварочного тока

При расчете по данной схеме сопротивление  $2r_{\text{ДК}}$  представляют как сопротивление двух условных пластин 1 и 2 одинаковой толщины, каждая из которых нагрета до температуры  $T_1$  и  $T_2$ .

$$2r_{\text{дк}} = \frac{4 \cdot A \cdot k_p \cdot \delta(\rho_1 + \rho_2)}{\pi \cdot d_{\text{э}}^2}; \quad (1.2)$$

$$\rho_1 = \rho_0(1 + \alpha \cdot T_1); \quad \rho_2 = \rho_0(1 + \alpha \cdot T_2), \quad (1.3)$$

где  $d_{\text{э}} = 2\delta + 3$  – диаметр контакта «электрод–деталь», мм;

$\delta$  – толщина пластины, мм;

$k_p$  – коэффициент, учитывающий неравномерность нагрева деталей, принимается для сталей и титана  $k_p = 0,85$ , для алюминиевых и магниевых сплавов  $k_p = 0,9$ ;

$A$  – коэффициент, учитывающий шунтирование тока в массу деталей, при сварке деталей толщиной  $0,8 \dots 3,0$  мм  $A \approx 0,8$ ;

$\rho_0, \rho_1, \rho_2$  – удельные электрические сопротивления соответственно для температур  $T_0 = 20$  °С,  $T_1$  и  $T_2$ , температуры  $T_1$  и  $T_2$  принимаются в зависимости от материала деталей (таблица 1.2).

## 1.2 Порядок выполнения работы

1 Варианты заданий приведены в таблице 1.2.

2 Определить диаметр контакта «электрод–деталь»  $d_{\text{э}}$ .

3 По указанной методике определить величину сопротивления зоны нагрева  $2r_{\text{дк}} = r_{\text{ээ}}$ .

4 Сделать выводы по результатам расчетов.

Таблица 1.2 – Варианты заданий

Вариант	Толщина пластины $\delta$ , мм	Материал деталей	$T_2 = T_{\text{пл}}$ , °С	$T_1 = (0,7 \dots 0,8)T_{\text{пл}}$ , °С
1	0,5	Низкоуглеродистая сталь 08кп	1525	1200
2	1	Сталь 08кп	1525	1200
3	1,5	Сталь 08кп	1525	1200
4	2	Сталь 08кп	1525	1200
5	2,5	Сталь 08кп	1525	1200
6	3	Сталь 08кп	1525	1200
7	3,5	Сталь 08кп	1525	1200
8	4	Сталь 08кп	1525	1200
9	5	Сталь 08кп	1525	1200
10	6	Сталь 08кп	1525	1200
11	0,5	Среднеуглеродистая сталь 40Х	1425	1140
12	1	Сталь 40Х	1425	1140
13	1,5	Сталь 40Х	1425	1140
14	2	Сталь 40Х	1425	1140
15	3	Сталь 40Х	1425	1140
16	0,5	Коррозионно-стойкая сталь 12Х18Н10Т	1425	1140
17	1	Сталь 12Х18Н10Т	1425	1140

Продолжение таблицы 1.2

18	1,5	Сталь 12Х18Н10Т	1425	1140
19	2	Сталь 12Х18Н10Т	1425	1140
20	3	Сталь 12Х18Н10Т	1425	1140
21	0,5	Титановый сплав ОТ4	1725	1380
22	1	Титановый сплав ОТ4	1725	1380
23	1,5	Титановый сплав ОТ4	1725	1380
24	2	Титановый сплав ОТ4	1725	1380
25	3	Титановый сплав ОТ4	1725	1380
26	0,5	Алюминиевый сплав Д16АТ	630	450
27	1	Д16АТ	630	450
28	1,5	Д16АТ	630	450
29	2	Д16АТ	630	450
30	3	Д16АТ	630	450

## 2 Практическое занятие № 2. Расчет параметров режима контактной точечной сварки различных материалов

### 2.1 Общие теоретические сведения

Основные параметры режима точечной сварки:

- форма и размеры электродов;
- величина сварочного тока  $I_{СВ}$  и время его протекания  $\tau_{СВ}$ ;
- сварочное усилие  $F_{СВ}$ ;
- ковочное усилие  $F_{КОВ}$ ;
- время приложения ковочного усилия  $\tau_{КОВ}$ .

Для примера приведем методику расчета сварочного тока для контактной точечной сварки листов внахлестку. Расчет величины сварочного тока осуществляется на основе уравнения теплового баланса [1].

$$Q_{\Sigma\Sigma} = Q_1 + Q_2 + Q_3, \quad (2.1)$$

где  $Q_{\Sigma\Sigma}$  – полное количество теплоты, затрачиваемое на образование сварной точки, Дж;

$Q_1$  – энергия, затрачиваемая на нагрев до температуры плавления  $T_{ПЛ}$  столбика металла высотой  $2\delta$  и диаметром основания, равным диаметру контакта «электрод–деталь»  $d_Э$  (рисунок 2.1), Дж;

$Q_2$  – теплота, расходуемая на нагрев металла в виде окружающего ядро кольца шириной  $x_2$ , Дж. Среднюю температуру кольца принимают равной  $T_{ПЛ}/4$ , ширина кольца рассчитывается по формуле

$$x_2 = 4\sqrt{a_M \cdot \tau_{СВ}}; \quad (2.2)$$

$Q_3$  – потери теплоты в электроды, которые учитываются нагревом условного цилиндра высотой  $x_3$  до средней температуры, равной  $T_{пл}/8$ , Дж. Высота цилиндра рассчитывается по формуле

$$x_3 = 4\sqrt{a_{\text{Э}} \cdot \tau_{\text{СВ}}}, \quad (2.3)$$

где  $a_{\text{М}}$ ,  $a_{\text{Э}}$  – коэффициенты температуропроводности свариваемого металла и материала электродов,  $\text{см}^2/\text{с}$ .

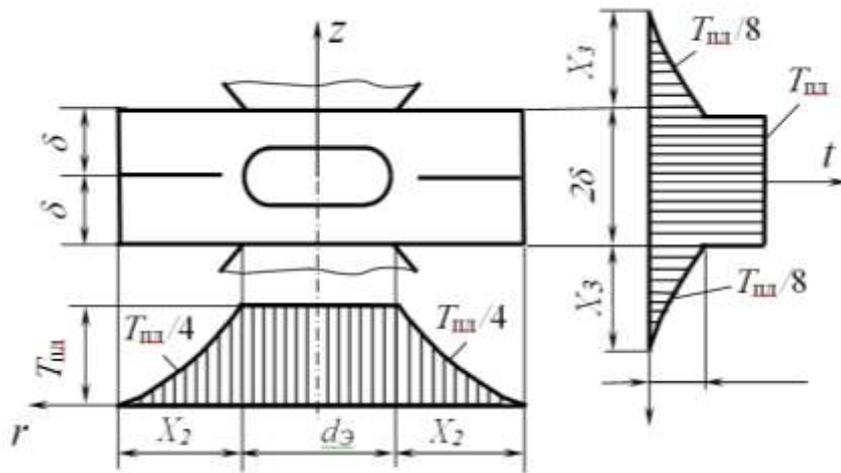


Рисунок 2.1 – Расчетная схема нагрева металла при точечной сварке

Составляющие уравнения теплового баланса рассчитываются по формулам:

$$Q_1 = 2 \cdot \delta \cdot c_{\text{М}} \cdot \gamma_{\text{М}} \frac{\pi \cdot d_{\text{Э}}^2}{4} T_{\text{пл}}; \quad (2.4)$$

$$Q_2 = 2 \cdot \kappa_1 \cdot \pi \cdot x_2 \cdot (d_{\text{Э}} + x_2) \cdot \delta \cdot c_{\text{М}} \cdot \gamma_{\text{М}} \frac{T_{\text{пл}}}{4}; \quad (2.5)$$

$$Q_3 = 2 \cdot \kappa_2 \frac{\pi \cdot d_{\text{Э}}^2}{4} \cdot x_3 \cdot c_{\text{Э}} \cdot \gamma_{\text{Э}} \frac{T_{\text{пл}}}{8}; \quad (2.6)$$

где  $\delta$  – толщина свариваемого металла, см;

$c_{\text{М}}$ ,  $c_{\text{Э}}$  – теплоемкость свариваемого металла и материала электрода соответственно, Дж/(г·°С);

$\gamma_{\text{М}}$ ,  $\gamma_{\text{Э}}$  – плотность свариваемого металла и материала электрода соответственно, г/см<sup>3</sup>;

$d_{\text{Э}}$  – диаметр контакта электрода с деталью, см;

$T_{\text{пл}}$  – температура плавления материала свариваемой детали, °С;

$\kappa_1$  – коэффициент, учитывающий, что средняя температура кольца несколько ниже средней температуры  $T_{\text{пл}}/4$ ,  $\kappa_1 = 0,8$ ;

$k_2$  – коэффициент, учитывающий форму электрода; при цилиндрическом электроде  $k_2 = 1$ , при коническом  $k_2 = 1,5$ , при сферическом электроде  $k_2 = 2$ .

Теплофизические характеристики наиболее распространенных конструкционных материалов приведены в таблице 2.1 [3, 4].

Сварочный ток рассчитывают по закону Джоуля-Ленца:

$$I_{CB} = \sqrt{\frac{Q_{ЭЭ}}{m_R \cdot 2r_{ДК} \cdot \tau_{CB}}}, \quad (2.7)$$

где  $m_R$  – коэффициент, учитывающий изменение  $r_{ЭЭ}$  в процессе протекания сварочного тока. Для низкоуглеродистых сталей  $m_R = 1$ , алюминиевых и магниевых сплавов  $m_R = 1,15$ , коррозионно-стойких сталей  $m_R = 1,2$ , сплавов титана  $m_R = 1,4$ ;

$Q_{ЭЭ}$  – количество теплоты, рассчитанное по формулам (2.1 – 2.6);

$2r_{ДК}$  – сопротивление двух свариваемых деталей в момент выключения сварочного тока,  $2r_{ДК} = r_{ЭЭК}$  (см. рисунок 1.2);

$\tau_{CB}$  – время протекания сварочного тока.

Таблица 2.1 – Некоторые теплофизические характеристики материалов

Материал	$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	$c$ , Дж/(г·°С)	$a$ , см <sup>2</sup> /с	$T_{пл}$ , °С
Сталь 08кп	7,86	0,71	0,1	1530
Сталь 30ХГСА	7,85	0,48	0,104	1480
Сталь 12Х18Н10Т	7,86	0,54	0,054	1440
Сталь ХН60ВТ	8,8	0,44	0,025	1400
Алюминий АЕ, А1	2,7	1,0	0,83	657
Алюминиевый сплав АМг	2,78	0,82	0,45	620
Латунь Л62	8,5	0,418	0,26	905
Титановый сплав ОТ4	4,6	0,58	0,04	1660
Бронза БрОЦ-4,5-3	8,8	0,43	0,22	1045
Бронза БрОФ-6,5-0,5	8,65	0,5	0,15	995
Бронза БрБ2	8,23	0,419	0,243	955
Медь М1	8,94	0,43	0,96	1083

На практике  $r_{ЭЭ}$  может быть также определено опытным путем при сварке образцов: для точечной сварки низкоуглеродистой стали толщиной от 1 до 7 мм данные представлены в таблице 2.2, для некоторых других металлов и сплавов – в таблице 2.3 [1].

Таблица 2.2 – Величина  $r_{ЭЭ}$  при точечной сварке низкоуглеродистой стали

$\delta$ , мм	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5	6	7
$r_{ЭЭ} \cdot 10^{-6}$ , Ом	128	112	98	89	82	75,5	69,5	61,5	56	52,5

Таблица 2.3 – Величина  $\Gamma_{ЭЭ}$  при контактной сварке металлов и сплавов

Материал	$\Gamma_{ЭЭ}$ , мкОм (в конце процесса сварки)										
	Толщина металла, мм										
	Точечная сварка						Шовная сварка				
	0,3	0,5	1	1,5	2	3	0,3	0,5	1	1,5	2
Сталь 08кп	150	135	115	100	90	75	110	95	80	70	50
Сталь 30ХГСА	165	145	125	110	100	90	145	130	105	85	65
Нержавеющая сталь 12Х18Н10Т	215	185	150	130	120	110	188	162	130	115	105
Жаропрочный сплав ВЖ98	230	200	165	140	125	115	210	180	150	128	113
Сталь Х15Н5Д2Т	195	165	135	120	110	100	170	145	115	105	95
Титановый сплав ОТ4	240	210	165	145	133	120	224	195	154	135	124
Латунь Л62	76	48	30	24	20	18	46	29	18	15	12
Медный сплав БрБ2	90	63	40	32	27	23	54	38	24	19	16
Алюминиевый сплав Д16АТ	18	16	13	11	10	8	–	14	11	10	8

Время протекания сварочного тока  $\tau_{СВ}$  определяют по эмпирическим формулам или таблицам рекомендованных режимов сварки, например, с использованием рекомендаций [1, 5] (таблица 2.4).

Таблица 2.4 – Основные параметры режима контактной точечной сварки низкоуглеродистых сталей

Толщина металла $\delta$ , мм	Время протекания сварочного тока $\tau_{СВ}$ , с	Сварочное усилие $F_{СВ}$ , кН	Ковочное усилие $F_{КОВ}$ , кН	Время проковки $\tau_{КОВ}$ , с	Диаметр литого ядра $d_{я}$ , мм
0,5	0,08...0,1	1,5	1,5	0,8	4,0
1,0	0,12...0,16	2,5	2,5	1,0	4,5
1,2	0,12...0,2	3,5	3,5	1,1	5,0
1,5	0,16...0,25	4,5	4,5	1,2	6,0
2,0	0,2...0,32	6,5	13,0	1,8	7,0
3,0	0,3...0,48	9,5	19,0	2,5	9,0
4,0	0,7...1,0	14,0	28,0	3,5	12,0
6,0	1,2...1,6	20,0	40,0	6,0	16,0

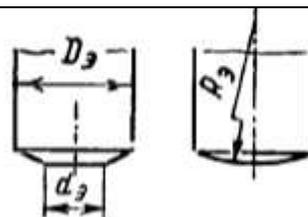
Режимы точечной сварки характеризуются также формой и размерами рабочих поверхностей электродов. Могут применяться электроды со сферической (радиусом  $R_{Э}$ ) и конической (с диаметром контактной поверхности  $d_{Э}$ ) рабочими поверхностями (таблица 2.5) [4].

Под технологической свариваемостью понимают способность металлов образовывать прочные соединения без существенного ухудшения их технических свойств в самом соединении и в околошовной зоне.

В результате оценки свариваемости должен быть выбран оптимальный для заданного материала изделия термомеханический цикл сварки.

Таблица 2.5 – Рекомендуемые размеры электродов

Толщина детали	Размеры электродов, мм		
	$D_э$	$d_э$	$R_э$
0,5	12	4	25...50
0,8	12	5	50...75
1,0	12	5	75...100
1,2	16	6	75...100
1,5	16	7	100...150
2,0	20	8	100...150
3,0	25	10	150...200
4,0	25	12	200...250



Удельное электросопротивление  $\rho_0$  и теплопроводность  $\lambda$  в значительной степени определяют жесткость режима сварки. При малых  $\rho_0$  и большой  $\lambda$  выбирают жесткий режим. Такой режим применяется при сварке алюминиевых и магниевых сплавов, меди и её сплавов. Для сварки коррозионно-стойких сталей, имеющих большое  $\rho_0$  и невысокую  $\lambda$ , выбирают мягкий режим с малой силой сварочного тока и большим временем его протекания. При жестких режимах сварки количество теплоты, передаваемое в окружающий сварную точку металл и электроды, меньше, чем при мягких режимах. При жестких режимах расход энергии ниже, чем при использовании мягких режимов.

Коэффициенты линейного расширения и температуропроводности влияют на остаточные деформации.

В результате комплексного анализа свойств и свариваемости, конструкционные материалы можно условно разделить на группы [1].

**Низкоуглеродистые стали**, имеющие низкую чувствительность к термическому циклу и выплескам, успешно варят как на мягких, так и на жестких режимах. Применяют при этом две циклограммы: с постоянным сварочным усилием и с повышенным ковочным усилием (рисунок 2.2).

**Среднеуглеродистые стали** обладают более высокими  $\rho_0$  и сопротивлением деформации. Они склонны к закалке и кристаллизационным трещинам. В литом ядре и околочечной зоне при неблагоприятных параметрах режима точечной сварки образуется твердый и хрупкий мартенсит.

При сварке сталей этой группы применяются мягкие режимы с временем протекания сварочного тока в 4...5 раз большим, чем при сварке низкоуглеродистых сталей. Полезен также предварительный подогрев (рисунок 2.3, а) или последующая термообработка (рисунок 2.3, б).

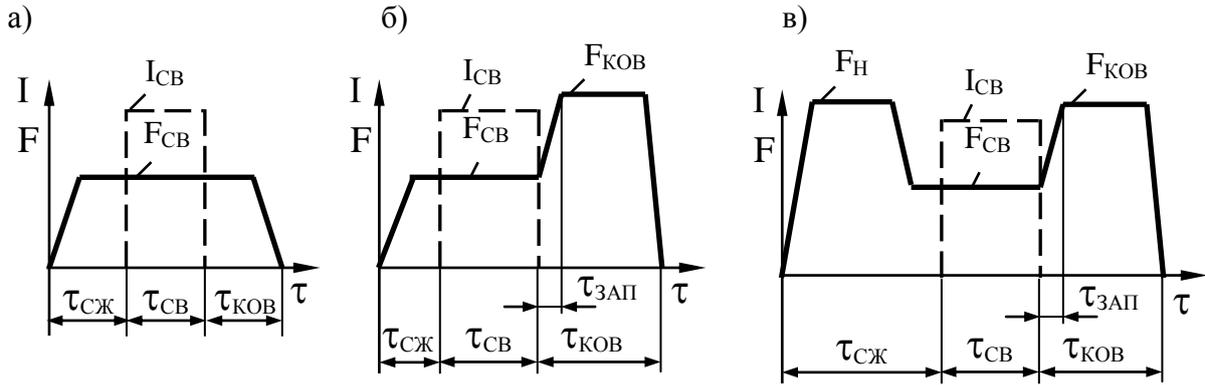


Рисунок 2.2 – Циклограммы процессов точечной сварки: а – с постоянным усилием сжатия; б – с повышенным ковочным усилием; в – с повышенными предварительным сжатием и ковочным усилием

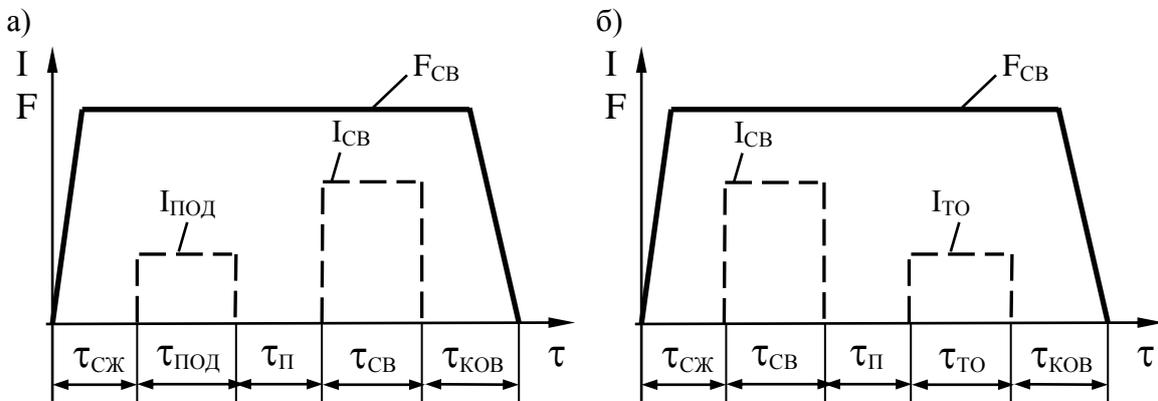


Рисунок 2.3 – Циклограммы процесса сварки с предварительным подогревом (а) и последующей термообработкой (б)

Усилие сжатия  $F_{CB}$  увеличивают в 1,5...2 раза по сравнению со сваркой низкоуглеродистых сталей.

При сварке сталей толщиной свыше 2 + 2 мм часто применяют циклограмму процесса с увеличенным ковочным усилием и тремя импульсами тока: подогрева  $I_{ПОД}$ , сварки  $I_{CB}$  и термообработки  $I_{ТО}$ .

Параметры режимов с предварительным подогревом и последующей термообработкой выбираются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \tau_{ПОД} &= \tau_{ТО} = (1,5...1,8) \cdot \tau_{CB}; \\ \tau_{П} &= (1,1...1,5) \cdot \tau_{CB}; \\ I_{ПОД} &= I_{ТО} = (0,7...0,8) \cdot I_{CB}; \end{aligned} \quad (2.8)$$

**Высокоуглеродистые стали** при изготовлении сварных конструкций применяются редко. Сварку этих сталей надо осуществлять на мягких режимах сварки или на режимах, предусматривающих предварительный подогрев и последующую термообработку (см. рисунок 2.3).

Сварка на очень мягком режиме при ограниченном времени проковки уменьшает скорость охлаждения за счет разогрева большой зоны металла вокруг сварной точки, что для некоторых марок сталей позволяет получить соединение с достаточной пластичностью. Однако такой режим вызывает большие остаточные деформации, снижает производительность и увеличивает расход электроэнергии.

**Низколегированные стали** (содержание легирующих элементов Mn, Ni, Cr, Si, Ti, Zr, Nb, Mo и других до 2,5 %) соединяют точечной сваркой на тех же режимах, что и среднеуглеродистые стали.

**Стали аустенитного класса** (12X18H10T, 04X18H10T и др.) отличаются высокой прочностью и пластичностью. Они обладают высоким  $\rho_0$  и малой  $\lambda$ . Поэтому при сварке этих сталей ток существенно меньше, чем при сварке низкоуглеродистых сталей.

При сварке сталей толщиной до 2 мм применяют циклограмму с постоянным сварочным усилием, а при сварке металла толщиной более 2 мм – с повышенным ковочным усилием.

**Жаропрочные стали и сплавы** (ХН75МБТЮ, ХН70Ю, ХН38ВТ и др.), а также сплавы повышенной жаропрочности (ХН70ВМТЮФ, ХН56ВМТЮ и др.) отличаются большим  $\rho_0$  и невысокой  $\lambda$ . Поэтому сварочный ток составляет 60...70 % от тока при сварке низкоуглеродистых сталей. Время протекания тока соответственно увеличивают в 2...4 раза, а усилие сжатия – в 2,5...4 раза. Чаще всего используют циклограммы, представленные на рисунках 2.2, а, б. Применяются электродные материалы с повышенной твердостью (до 240 МПа).

**Титановые сплавы** имеют высокое  $\rho_0$ , поэтому при их сварке ток снижают на 30...40 % по сравнению со сваркой низкоуглеродистых сталей. Они обладают хорошей свариваемостью как на мягких, так и на жестких режимах. Чаще всего используется циклограмма, представленная на рисунке 2.2, а.

**Алюминиевые и магниевые сплавы** характеризуются малым  $\rho_0$ , большой  $\lambda$  и высоким коэффициентом линейного расширения. Поверхность алюминиевых сплавов покрыта тугоплавкой оксидной пленкой, которую перед сваркой необходимо удалять. Сварку выполняют на жестких режимах электродами со сферической поверхностью. Применяется циклограмма с повышенным ковочным усилием (см. рисунок 2.2, б).

## 2.2 Пример расчета

Определить силу тока при точечной сварке листов из низкоуглеродистой стали толщиной 4 мм электродами с диаметром рабочей поверхности 12 мм и временем сварки 1 с. Температура ликвидуса стали – 1500 °С, для стали  $c_M = 0,67$  Дж/(г·°С), для меди  $c_Э = 0,38$  Дж/(г·°С); для стали  $\gamma_M = 7,8$  г/см<sup>3</sup>, для меди  $\gamma_Э = 8,9$  г/см<sup>3</sup>; для стали  $a_M = 0,09$  см<sup>2</sup>/с, для меди

$a_{\text{Э}} = 0,8 \text{ см}^2/\text{с}$  [1]. Сопротивление листов к концу процесса сварки  $r_{\text{ЭЭ}} = 69,5 \text{ мкОм}$  (см. таблицу 2.2).

$$Q_1 = 2 \cdot \delta \cdot c_M \cdot \gamma_M \frac{\pi \cdot d_{\text{Э}}^2}{4} T_{\text{пл}} = 2 \cdot 0,4 \cdot 0,67 \cdot 7,8 \frac{3,14 \cdot 1,2^2}{4} 1500 = 7092 \text{ Дж} \approx 7 \text{ кДж};$$

$$Q_2 = 2 \cdot \kappa_1 \cdot \pi \cdot x_2 \cdot (d_{\text{Э}} + x_2) \cdot \delta \cdot c_M \cdot \gamma_M \frac{T_{\text{пл}}}{4} =$$

$$= 2 \cdot 0,8 \cdot 3,14 \cdot 1,2 \cdot (1,2 + 1,2) \cdot 0,4 \cdot 0,67 \cdot 7,8 \frac{1500}{4} = 11348 \text{ Дж} \approx 11,3 \text{ кДж};$$

$$x_2 = 4 \sqrt{a_M \cdot \tau_{\text{СВ}}} = 4 \sqrt{0,09 \cdot 1} = 1,2 \text{ см};$$

$$Q_3 = 2 \cdot \kappa_2 \frac{\pi \cdot d_{\text{Э}}^2}{4} \cdot x_3 \cdot c_{\text{Э}} \cdot \gamma_{\text{Э}} \frac{T_{\text{пл}}}{8} = 2 \cdot 1,5 \frac{3,14 \cdot 1,2^2}{4} 3,6 \cdot 0,38 \cdot 8,9 \frac{1500}{8} =$$

$$= 7745 \text{ Дж} \approx 7,7 \text{ кДж};$$

$$x_3 = 4 \sqrt{a_{\text{Э}} \cdot \tau_{\text{СВ}}} = 4 \sqrt{0,8 \cdot 1} = 3,6 \text{ см};$$

$$Q_{\text{ЭЭ}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 7 + 11,3 + 7,7 = 26 \text{ кДж};$$

$$I_{\text{СВ}} = \sqrt{\frac{Q_{\text{ЭЭ}}}{m_R \cdot 2r_{\text{ДК}} \cdot \tau_{\text{СВ}}}} = \sqrt{\frac{26000}{1 \cdot 69,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1}} = 19341 \text{ А} \approx 19,3 \text{ кА}.$$

### 3 Практическое занятие № 3. Расчет параметров вторичного контура машин для контактной точечной сварки

#### 3.1 Общие теоретические сведения

Вторичный контур каждой контактной машины включает в себя вторичный виток сварочного трансформатора, соединенного с конструктивными элементами машины, предназначенными для подведения сварочного тока к электродам, т. е. к месту сварки.

В качестве примера на рисунке 3.1 представлен сварочный контур контактной точечной машины. Основными его элементами являются электроды 1, непосредственно подводящие ток к свариваемым деталям и передающие необходимые усилия для их сжатия; электрододержатели 2, служащие для закрепления электродов; хоботы 3, соединенные с механизмами, обеспечивающими необходимые усилия сжатия свариваемых деталей; гибкие шины 4, соединяющие контактные плиты трансформатора с подвижными элементами контура; сварочный трансформатор 5 [5]. Полезный вылет  $L_{\text{НОМ}}$  и раствор  $H_{\text{НОМ}}$  выбираются в зависимости от габаритов свариваемых деталей.  $P$  – давление, передаваемое электродам со стороны силового привода сжатия,  $U_1$  – напряжение на первичной обмотке сварочного трансформатора.

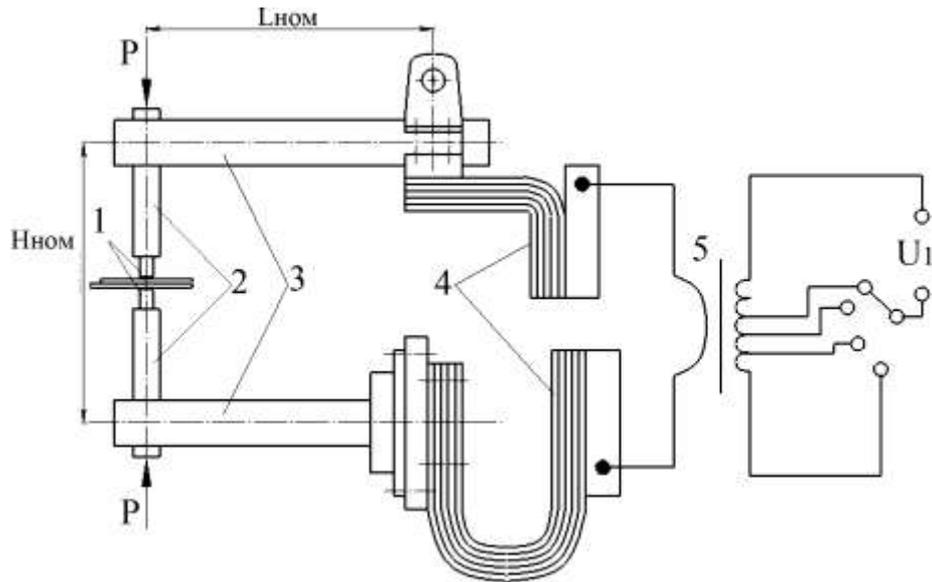


Рисунок 3.1 – Вторичный контур одной из машин контактной точечной сварки

Материал электродов для контактной сварки выбирается, исходя из требований, обусловленных специфическими условиями работы электродов: значительным нагревом с одновременным сжатием, тепловыми напряжениями, возникающими внутри электрода вследствие неравномерного нагрева, и др. Перегрев, окисление, деформация, смещение, подплавление электродов при нагреве усиливают их износ. Нагартованную медь из-за низкой температуры рекристаллизации применяют редко. Легирование меди хромом, бериллием, алюминием, цинком, кадмием, цирконием, магнием мало снижает ее электропроводность, но повышает твердость в нагретом состоянии. Никель, железо, и кремний вводятся в медь для упрочнения электродов. Сплавы в сравнении с чистой медью являются в 3...6 раз более стойкими, и их расход в 6...8 раз меньше (таблица 3.1) [4].

Минимальное требуемое сечение любого  $i$ -го элемента вторичного контура контактной машины  $q_i$  выбирается прежде всего исходя из температуры допустимого нагрева данного элемента, а затем корректируется в зависимости от требуемых конструктивных форм.

Температура нагрева  $i$ -го элемента обуславливается плотностью тока  $J_i$ , соответствующей длительному, или расчетному значению тока при ПВ = 100 %. В таблице 3.2 приведены рекомендуемые плотности тока в элементах вторичного контура в зависимости от материала элемента и условий его охлаждения [5].

Сечение  $i$ -го элемента  $q_i$  рассчитывается по формуле

$$q_i = \frac{I_{2дл}}{J_i}, \quad (3.1)$$

где  $I_{2дл}$  – расчетный длительный вторичный ток при ПВ = 100 %.

Таблица 3.1 – Материалы электродов для контактной сварки

Материал для электродов контактной сварки, марка	Содержание легирующих элементов, % массы	$\rho$ , мкОм·м	Основное назначение
Медь М1	99 Cu	0,0178	Электроды и ролики для сварки алюминиевых сплавов
Сплав МС	1,0 Ag	0,0185	
Бронза Бр.ХЦр 0,3–0,09	0,03...0,08 Zr; 0,4...1,0 Cr	0,03	Электроды и ролики для сварки алюминиевых и медных сплавов
Кадмиевая бронза Бр.К1 (МК)	0,9...1,2 Cd	0,0207	
Хромовая бронза Бр.Х	0,3...0,6 Zn; 0,4...1,0 Cr	0,03	Электроды и ролики для сварки углеродистых, низколегированных сталей, меди, никеля, титана и их сплавов
Бронза Бр.ХЦр 0,6–0,05	0,03...0,08 Zr; 0,4...1,0 Cr	0,02	
Никелево–бериллиевая бронза Бр.НБТ	1,4...1,6 Ni; 0,05...0,15 Ti; 0,2...0,4 Be	0,0397	Электроды, ролики для сварки углеродистых, нержавеющей и жаропрочных сталей, тугоплавких металлов и сплавов
Кремненикелевая бронза Бр.КН1–4	3...4 Ni; 0,6...1 Si	0,05	

Таблица 3.2 – Рекомендуемые плотности тока в элементах вторичного контура в зависимости от материала элемента и условий его охлаждения

Элемент вторичного контура	Материал или марка сплава	Условия охлаждения	Допустимая плотность тока $J$ , А/мм <sup>2</sup>	Удельное сопротивление $\rho$ , мкОм·м, при 20 °С	Температурный коэффициент сопротивления $\alpha$ при $T = 20$ °С
Электроды	Бр.ХЦр	Водяное интенсивное (внутреннее или наружное)	20...30	0,02...0,0376	0,003
	Бронза БрХ		30...50	0,021...0,0383	0,002...0,003
Бронза БрХ	10...20				
Электродо-держатели	БрНБТ БрНК				
Хоботы, консоли, плиты	Медь М1	Воздушное	1,8...2,2	0,0175	0,00392
		Водяное	2,4...3		
Шины жесткие	Медь М1	Воздушное	1,8...2	0,0175	0,00392
		Водяное	2,5...4		
Шины гибкие	Лента МГМ (фольга)	Воздушное	2,5...3		

Значение тока  $I_{2дл}$  может быть определено из соотношения

$$I_{2дл} = I_{2ном} \cdot \sqrt{\frac{ПВ\%}{100}}, \quad (3.2)$$

где  $I_{2ном}$  – номинальный кратковременный вторичный ток.

Затем по ГОСТ 10594-80 необходимо принять ближайшее большее значение длительного вторичного тока трансформатора. Затем уточняем значение номинального кратковременного вторичного тока [6]:

$$I_{2\text{НОМ}} = I_{2\text{ДЛ}} \cdot \sqrt{\frac{100}{\text{ПВ}\%}}. \quad (3.3)$$

Номинальное значение вторичного напряжения холостого хода сварочного трансформатора  $U_{20\text{НОМ}}$  определяется из соотношения

$$U_{2\text{НОМ}} = I_{2\text{НОМ}} \cdot Z_{\text{М}}, \quad (3.4)$$

где  $Z_{\text{М}}$  – полное сопротивление вторичного, или сварочного, контура машины, включающее сопротивление свариваемых деталей:

$$Z_{\text{М}} = \sqrt{(r_{\text{В}} + r_{\text{Т}} + r_{\text{ЭЭ}})^2 + (x_{\text{В}} + x_{\text{Т}})^2}, \quad (3.5)$$

$r_{\text{В}}$  – активное сопротивление элементов вторичного контура машины и их контактных соединений;

$x_{\text{В}}$  – индуктивное сопротивление вторичного контура;

$r_{\text{Т}}$  и  $x_{\text{Т}}$  – активное и индуктивное сопротивления обмоток трансформатора, приведенные ко вторичной цепи;

$r_{\text{ЭЭ}}$  – активное сопротивление участка «электрод-электрод», или зоны сварки (см. таблицы 2.2 и 2.3).

Расчет вторичного контура производится по отдельным участкам, однородным по материалу и по конфигурации поперечных сечений. Активное сопротивление отдельных элементов контура при 20 °С, мкОм:

$$r_{\text{ai}} = K_{\text{П}} \cdot \rho_i \frac{l_i}{q_i}, \quad (3.6)$$

где  $l_i$  – длина элемента (по направлению тока), м;

$q_i$  – поперечное сечение элемента, м<sup>2</sup>;

$\rho_i$  – удельное электросопротивление материала, мкОм·м;

$K_{\text{П}}$  – коэффициент поверхностного эффекта, обусловленный неравномерным распределением тока в массивных элементах контура.

Для расчета коэффициентов поверхностного эффекта необходимы следующие вспомогательные величины [5]:

а) для немассивных элементов (электроды, электрододержатели) – активное сопротивление постоянному току одного метра проводника  $r_{0i(1\text{М})}$ , мкОм из такого же материала, как и элемент контура, и такого же сечения:

$$r_{0i(1M)} = \rho_i \frac{1}{q_i}; \quad (3.7)$$

б) для массивных элементов (хоботы, шины, электродные плиты, П- и Г-образные консоли) – активное сопротивление постоянному току ста метров проводника, мкОм:

$$r_{0i(100M)} = \rho_i \frac{100}{q_i} \quad (3.8)$$

Коэффициент поверхностного эффекта для массивных элементов контура рассчитывается в зависимости от параметра  $\sqrt{f/r_{0(100M)}}$  по одной из формул ( $f = 50$  Гц – частота переменного сетевого напряжения):

$$K_{\Pi} = 1 + 0,00327 \sqrt{\frac{f}{r_{0(100M)}}} \left( \text{при } \sqrt{\frac{f}{r_{0(100M)}}} < 180 \right); \quad (3.9)$$

$$K_{\Pi} = 0,25 + 0,0056 \sqrt{\frac{f}{r_{0(100M)}}} + \frac{8,37}{\sqrt{\frac{f}{r_{0(100M)}}}} \left( \text{при } 180 < \sqrt{\frac{f}{r_{0(100M)}}} < 220 \right); \quad (3.10)$$

$$K_{\Pi} = 0,277 + 0,0056 \sqrt{\frac{f}{r_{0(100M)}}} \left( \text{при } 220 < \sqrt{\frac{f}{r_{0(100M)}}} < 1800 \right) \quad (3.11)$$

Для гибких шин с непропаянными концами и при одностороннем подводе тока при частоте 50 Гц  $K_{\Pi} = 1,5 \dots 1,8$ . Для шин с монолитными (сваренными или спаянными) концами при двустороннем подводе тока  $K_{\Pi} = 1,1 \dots 1,3$ .

Коэффициент поверхностного эффекта для немассивных элементов определяется в зависимости от критерия подобия  $P$  по графикам, представленным на рисунке 3.2, а, б:

$$P = 5 \cdot \sqrt{\frac{f}{r_{0(1M)} \cdot 10^7}}. \quad (3.12)$$

Коэффициент поверхностного эффекта для немассивных элементов прямоугольного сечения определяется в зависимости от критерия подобия  $P$ , а также коэффициента формы  $K_{\Phi}$ , представленного на рисунке 3,2, а, б:

$$K_{\Phi} = \frac{b}{a}, \quad (3.13)$$

где  $a$  – меньшая сторона элемента прямоугольного сечения, мм;

$b$  – большая сторона элемента прямоугольного сечения, мм.

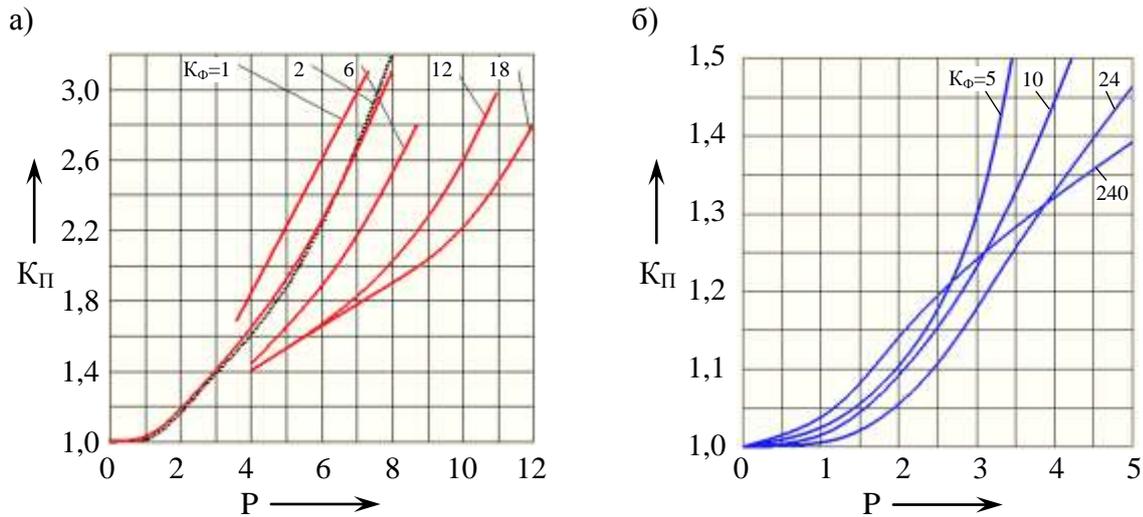


Рисунок 3.2 – Коэффициент поверхностного эффекта: — — для элементов прямоугольного сечения; ----- — для элементов круглого сечения

После нахождения уточненного активного сопротивления всех элементов контура  $r_i$  по формуле (3.5) необходимо найти суммарное активное сопротивление всех элементов вторичного контура при комнатной температуре  $20\text{ }^\circ\text{C}$  (без учета активного сопротивления сварочного трансформатора и сопротивлений контактов):

$$r_a = \sum r_{ai} . \quad (3.14)$$

Численные значения  $\rho_i$  материалов, применяемых для токопроводов различных элементов контура, приведены в таблицах 3.1 и 3.2. С повышением температуры нагрева токопроводящих элементов контура их удельные сопротивления растут. Корректируем значение  $r_a$  с учетом того, что рабочая температура  $t$  элементов вторичного контура приблизительно равна  $80\text{ }^\circ\text{C}$ :

$$r_t = r_a [1 + \alpha(t - t_{\text{охл}})] , \quad (3.15)$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления;

$t_{\text{охл}}$  – температура охлаждающей среды,  $t_{\text{охл}} = 20\text{ }^\circ\text{C}$ .

Элементы вторичного контура соединяются между собой неподвижными и подвижными (например, вращающийся ролик на машине контактной шовной сварки) контактами, сопротивление которых составляет значительную часть активного сопротивления контура. Сопротивление каждого контакта колеблется в довольно широких пределах и зависит от материала соприкасающихся деталей, состояния их поверхности, чистоты обработки. Сопротивление одного неподвижного контакта «медь–медь» принимается  $1 \dots 2$  мкОм, разъемного контакта

«медь–медь» – 4...6 мкОм. Сопротивление подвижного скользящего контакта принимается 10...20 мкОм.

Учитывая вышесказанное, необходимо подсчитать, сколько в данном контуре подвижных и сколько неподвижных контактов, а затем найти величину их общего активного сопротивления  $r_k$ , мкОм по указанным пределам.

Активное сопротивление всех элементов и переходных контактов вторичного контура составит

$$r_B = r_t + r_k. \quad (3.16)$$

Приведенные активное и индуктивное сопротивления вторичной обмотки сварочного трансформатора принимаются равными:  $r_T = 10...40$  мкОм,  $x_T = 10...40$  мкОм.

Индуктивное сопротивление вторичного контура  $x_B$  в основном зависит от формы, периметра вторичного контура и площади, образуемой его элементами. Для расчета индуктивных сопротивлений вторичных контуров однофазных контактных машин частотой 50 Гц используем метод расчета  $x_B$ , Ом по площади. Для этого используется следующая эмпирическая формула:

$$x_B = S_B^{0,73} \cdot 10^{-6}, \quad (3.17)$$

где  $S_B$  — площадь, охватываемая контуром, см<sup>2</sup> (берется по осям сечений сторон).

Полное сопротивление при коротком замыкании машины

$$Z_{М.К.З.} = \sqrt{(r_B + r_T)^2 + (x_B + x_T)^2}. \quad (3.18)$$

Максимальное значение сварочного тока при коротком замыкании

$$I_{2MAX} = \frac{U_{2НОМ}}{Z_{М.К.З.}}. \quad (3.19)$$

### **3.2 Пример расчета параметров вторичного контура машины**

#### **Исходные данные.**

Технические характеристики машины:

– машина для контактной точечной сварки однофазная переменного тока: сетевое напряжение  $U_C = 380$  В, частота 50 Гц;

– номинальный вторичный ток  $I_{2НОМ} = 18\,000$  А;

– номинальный длительный вторичный ток  $I_{2дл} = 7000$  А;

- машина предназначена для точечной сварки деталей из низкоуглеродистых сталей толщиной от 1,5+1,5 мм до 4+4 мм.

Параметры режима сварки деталей, принятых за номинальные (точечная сварка деталей из низкоуглеродистых сталей толщиной 4+4 мм):  $I_{2НОМ} = 18\ 000\ А$ ;  $\tau_{СВ} = 0,48\ с$ . Номинальное значение продолжительности включения ПВ = 15 %.

Конструктивные размеры вторичного (сварочного) контура машины представлены на рисунке 3.3. Основными его элементами являются электроды 1, непосредственно подводящие ток к свариваемым деталям и передающие необходимые усилия для их сжатия; электрододержатели 2, служащие для закрепления электродов; хоботы 3, соединенные с механизмами, обеспечивающими необходимые усилия сжатия свариваемых деталей; консоли из меди 4 для крепления хоботов к корпусу машины; верхняя и нижняя гибкие шины 5 и 8; верхняя и нижняя жесткие шины 6 и 7, соединяющие контактные колодки трансформатора с подвижными элементами контура [5].

Рекомендуемые плотности тока в элементах вторичного контура в зависимости от материала элемента и условий его охлаждения выбраны в соответствии с рекомендациями в таблице 3.2.

Для определения приближенного суммарного значения активного сопротивления вторичного контура прежде всего производим расчет каждой отдельной детали (см. рисунок 3.3).

1 Два электрода 1 изготовлены из хромовой бронзы марки БрХ: диаметр  $d_1 = 16\ мм$ , расчетная длина  $l_1 = 30\ мм$ , удельное электросопротивление  $\rho_1 = 0,03\ мкОм \cdot м$ . Площадь поперечного сечения электродов:

$$q_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 16^2}{4} = 200\ мм^2.$$

Активное сопротивление постоянному току одного метра проводника определяется, исходя из формулы (3.7):

$$r_{01(1М)} = \rho_1 \frac{1}{q_1} = \frac{0,03 \cdot 1}{200} = 150 \cdot 10^{-6}\ Ом.$$

Критерий подобия Р определяется по формуле (3.12)

$$P = 5 \cdot \sqrt{\frac{f}{r_{01(1М)} \cdot 10^7}} = 5 \cdot \sqrt{\frac{50}{150 \cdot 10^{-6} \cdot 10^7}} = 0,9.$$

По графику (см. рисунок 3.2, а) для  $P = 0,9$ ;  $K_{П1} = 1,02$ .



Активное сопротивление двух электродов при 20 °С определяется, исходя из формулы (3.6):

$$r_{a1} = 2 \cdot K_{П1} \cdot \rho_1 \frac{l_1}{q_1} = 2 \cdot 1,02 \cdot 0,03 \frac{0,03}{200} = 9,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

2 Два электрододержателя 2 из меди М1 с водяным охлаждением: диаметр  $d_2 = 25$  мм, расчетная длина  $l_2 = 110$  мм (прижаты к хоботам стальными прижимами), удельное электросопротивление  $\rho_2 = 0,0175$  мкОм·м.

$$q_2 = \frac{\pi d_2^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 25^2}{4} = 490 \text{ мм}^2;$$

$$r_{02(1M)} = \rho_1 \frac{l_2}{q_1} = \frac{0,0175 \cdot 1}{490} = 36 \cdot 10^{-6} \text{ Ом};$$

$$P = 5 \cdot \sqrt{\frac{f}{r_{02(1M)} \cdot 10^7}} = 5 \cdot \sqrt{\frac{50}{36 \cdot 10^{-6} \cdot 10^7}} = 1,86.$$

По графику (см. рисунок 3.2, а) для  $P = 1,86$ ;  $K_{П2} = 1,18$ .  
Активное сопротивление двух электрододержателей при 20 °С:

$$r_{a2} = 2 \cdot K_{П2} \cdot \rho_2 \frac{l_2}{q_2} = 2 \cdot 1,18 \cdot 0,0175 \frac{0,11}{490} = 9,3 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

3 Хоботы 3 (верхний и нижний) из меди М1 с воздушным охлаждением (сечение I): диаметр  $d_3 = 65$  мм, расчетная длина  $l_3 = 345$  мм, удельное электросопротивление  $\rho_3 = 0,0175$  мкОм·м.

$$q_3 = \frac{\pi d_3^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 65^2}{4} = 3320 \text{ мм}^2.$$

Так как хобот является массивным элементом, определяем активное сопротивление постоянному току 100 м проводника по формуле (3.8):

$$r_{03(100M)} = \rho_3 \frac{100}{q_3} = \frac{0,0175 \cdot 100}{3320} = 527 \cdot 10^{-6} \text{ Ом};$$

$$220 < \sqrt{\frac{f}{r_{03(100M)}}} = \sqrt{\frac{50}{527 \cdot 10^{-6}}} = 308 < 1800.$$

Коэффициент поверхностного эффекта в этом случае определяется, исходя из формулы (3.11):

$$K_{П3} = 0,277 + 0,0056 \sqrt{\frac{f}{r_{03(100M)}}} = 0,277 + 0,0056 \cdot 308 = 2.$$

Активное сопротивление двух хоботов при 20 °С:

$$r_{a3} = 2 \cdot K_{\text{ПЗ}} \cdot \rho_3 \frac{l_3}{q_3} = 2 \cdot 2 \cdot 0,0175 \frac{0,345}{3320} = 7,3 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

4 Верхняя и нижняя консоли 4 (сечения II, III) из меди М1 с воздушным охлаждением: удельное электросопротивление  $\rho_4 = 0,0175$  мкОм·м, расчетная длина  $l_4 = l_{41} + l_{42} = 120 + 62 = 182$  мм, площадь поперечного сечения консоли

$$q_{41} = 46 \cdot 106 - 3,14 \frac{65^2}{4 \cdot 2} = 3216 \text{ мм}^2;$$

$$q_{42} = 15 \cdot 106 = 1590 \text{ мм}^2.$$

Активное сопротивление постоянному току 100 м проводника

$$r_{041(100\text{М})} = \rho_4 \frac{100}{q_4} = \frac{0,0175 \cdot 100}{3216} = 540 \cdot 10^{-6} \text{ Ом};$$

$$r_{042(100\text{М})} = \rho_4 \frac{100}{q_4} = \frac{0,0175 \cdot 100}{1590} = 1100 \cdot 10^{-6} \text{ Ом};$$

$$220 < \sqrt{\frac{f}{r_{041(100\text{М})}}} = \sqrt{\frac{50}{540 \cdot 10^{-6}}} = 304 < 1800;$$

$$180 < \sqrt{\frac{f}{r_{042(100\text{М})}}} = \sqrt{\frac{50}{1100 \cdot 10^{-6}}} = 213 < 220.$$

Коэффициенты поверхностного эффекта в этом случае определяются, исходя из формул (3.11) и (3.10):

$$K_{\text{П41}} = 0,277 + 0,0056 \sqrt{\frac{f}{r_{041(100\text{М})}}} = 0,277 + 0,0056 \cdot 304 = 2;$$

$$K_{\text{П42}} = 0,25 + 0,0056 \sqrt{\frac{f}{r_{042(100\text{М})}}} + \frac{8,37}{\sqrt{\frac{f}{r_{041(100\text{М})}}}} = 0,25 + 0,0056 \cdot 213 + \frac{8,37}{213} = 1,48.$$

Активное сопротивление двух консолей при 20 °С:

$$r_{a41} = 2 \cdot K_{\text{П41}} \cdot \rho_4 \frac{l_{41}}{q_{41}} = 2 \cdot 2 \cdot 0,0175 \frac{0,12}{3216} = 2,6 \cdot 10^{-6} \text{ Ом};$$

$$r_{a42} = 2 \cdot K_{\text{П42}} \cdot \rho_4 \frac{l_{42}}{q_{42}} = 2 \cdot 1,48 \cdot 0,0175 \frac{0,062}{1590} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом};$$

$$r_{a4} = r_{a41} + r_{a42} = 2,6 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 10^{-6} = 4,6 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

5 Верхняя гибкая шина 5 (сечение IV) из меди МГМ (фольга) с воздушным охлаждением: расчетная длина  $l_5 = 235$  мм, удельное электро-сопротивление  $\rho_5 = 0,0175$  мкОм·м, площадь поперечного сечения  $q_5 = 12 \cdot 100 = 1200$  мм<sup>2</sup>.

Концы шины монолитны. Однако, учитывая значительный набор (12 мм) и односторонний подвод тока, принимаем  $K_{П1} = 1,6$  мм. Тогда активное сопротивление гибкой шины при 20 °С

$$r_{a5} = K_{П15} \cdot \rho_5 \frac{l_5}{q_5} = 1,6 \cdot 0,0175 \frac{0,235}{1200} = 5,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

6 Верхняя жесткая шина 6 (сечение V) из меди М1 с воздушным охлаждением: площадь поперечного сечения  $q_6 = 12 \cdot 100 = 1200$  мм<sup>2</sup>; расчетная длина  $l_6 = 244$  мм,  $\rho_6 = 0,0175$  мкОм·м.

$$r_{06(100M)} = \rho_6 \frac{100}{q_6} = \frac{0,0175 \cdot 100}{1200} = 1458 \cdot 10^{-6} \text{ Ом;}$$

$$180 < \sqrt{\frac{f}{r_{06(100M)}}} = \sqrt{\frac{50}{1458 \cdot 10^{-6}}} = 185 < 220;$$

$$K_{П16} = 0,25 + 0,0056 \sqrt{\frac{f}{r_{06(100M)}}} + \frac{8,37}{\sqrt{\frac{f}{r_{06(100M)}}}} = 0,25 + 0,0056 \cdot 185 + \frac{8,37}{185} = 1,33;$$

$$r_{a6} = K_{П16} \cdot \rho_6 \frac{l_6}{q_6} = 1,33 \cdot 0,0175 \frac{0,244}{1200} = 4,7 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

7 Нижняя жесткая шина 7 (подобна детали 6):  $l_7 = 150$  мм. Так же как и для верхней жесткой шины,  $K_{П17} = 1,33$ .

Активное сопротивление верхней жесткой шины при 20 °С

$$r_{a7} = K_{П17} \cdot \rho_7 \frac{l_7}{q_7} = 1,33 \cdot 0,0175 \frac{0,15}{1200} = 2,9 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

8 Нижняя гибкая шина 8 подобна детали 5 (сечение V):  $l_8 = 320$  мм.

$$r_{a8} = K_{П18} \cdot \rho_8 \frac{l_8}{q_8} = 1,6 \cdot 0,0175 \frac{0,32}{1200} = 7,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление всех элементов токопровода при 20 °С

$$r_a = r_{a1} + r_{a2} + r_{a3} + r_{a4} + r_{a5} + r_{a6} + r_{a7} + r_{a8} = \\ = (9,2 + 9,3 + 7,3 + 4,6 + 5,5 + 4,7 + 2,9 + 7,5) \cdot 10^{-6} = 51 \text{ мкОм.}$$

Активное сопротивление всех элементов токопровода, приведенное к рабочей температуре  $t = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$r_t = r_a [1 + \alpha(t - t_{\text{охл}})] = r_a [1 + 0,00392 \cdot (80 - 20)] = 63 \text{ мкОм.}$$

Число переходных контактов  $n = 12$ , из них четыре разъемных контакта «медь–медь» и восемь неподвижных контактов «медь–медь». Принимаем активное сопротивление одного контакта  $4 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$  и  $1,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$  соответственно, тогда

$$r_k = (4 \cdot 4 + 8 \cdot 1,5) \cdot 10^{-6} = 28 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление всех элементов и переходных контактов вторичного контура:

$$r_B = r_t + r_k = (63 + 28) \cdot 10^{-6} = 91 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

Ориентировочное значение индуктивного сопротивления контура  $x_B$  определяем по рисунку 3.2 и формуле (3.17):

$$x_B = S_B^{0,73} \cdot 10^{-6} = 1050^{0,73} \cdot 10^{-6} = 160 \cdot 10^{-6} \text{ Ом,}$$

где  $S_B = 1050 \text{ см}^2$  – площадь, охватываемая контуром (берется по осям сечений сторон).

В соответствии с рекомендациями [5, приложение 4] для однофазной машины переменного тока для контактной точечной сварки с номинальным вторичным током  $I_{2\text{НОМ}} = 18 \text{ 000 А}$  ориентировочно принимаем следующие значения приведенных активного и индуктивного сопротивлений трансформатора:  $r_T = 20 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$  и  $x_T = 20 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$ .

По таблице 2.2 для деталей из углеродистых сталей толщиной 4+4 мм сопротивление участка «электрод–электрод»  $r_{\text{ЭЭ}} = 69,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$ .

Полное сопротивление контура  $Z_M$  при нагрузке по формуле (3.5):

$$Z_M = \sqrt{(r_B + r_T + r_{\text{ЭЭ}})^2 + (x_B + x_T)^2} = \\ = \sqrt{[(91 + 20 + 69,5) \cdot 10^{-6}]^2 + [(160 + 20) \cdot 10^{-6}]^2} = 255 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

Номинальное значение вторичного напряжения холостого хода сварочного трансформатора  $U_{2\text{НОМ}}$  по формуле (3.4):

$$U_{20 \text{ НОМ}} = I_{20 \text{ НОМ}} \cdot Z_M = 18000 \cdot 255 \cdot 10^{-6} = 4,6 \text{ В}$$

Полное сопротивление при коротком замыкании машины, исходя из формулы (3.18)

$$Z_{\text{М.К.З.}} = \sqrt{(r_B + r_T)^2 + (x_B + x_T)^2} = \sqrt{[(91 + 20) \cdot 10^{-6}]^2 + [(160 + 20) \cdot 10^{-6}]^2} = 211 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

Максимальное значение сварочного тока при коротком замыкании, исходя из формулы (3.19)

$$I_{2 \text{ МАХ}} = \frac{U_{2 \text{ НОМ}}}{Z_{\text{М.К.З.}}} = \frac{4,6}{211 \cdot 10^{-6}} = 21800 \text{ А} = 21,8 \text{ кА.}$$

Ниже приведены другие примеры сварочных контуров машин для контактной точечной (рисунок 3.4), рельефной (рисунок 3.5) и шовной (рисунок 3.6) сварки [7].

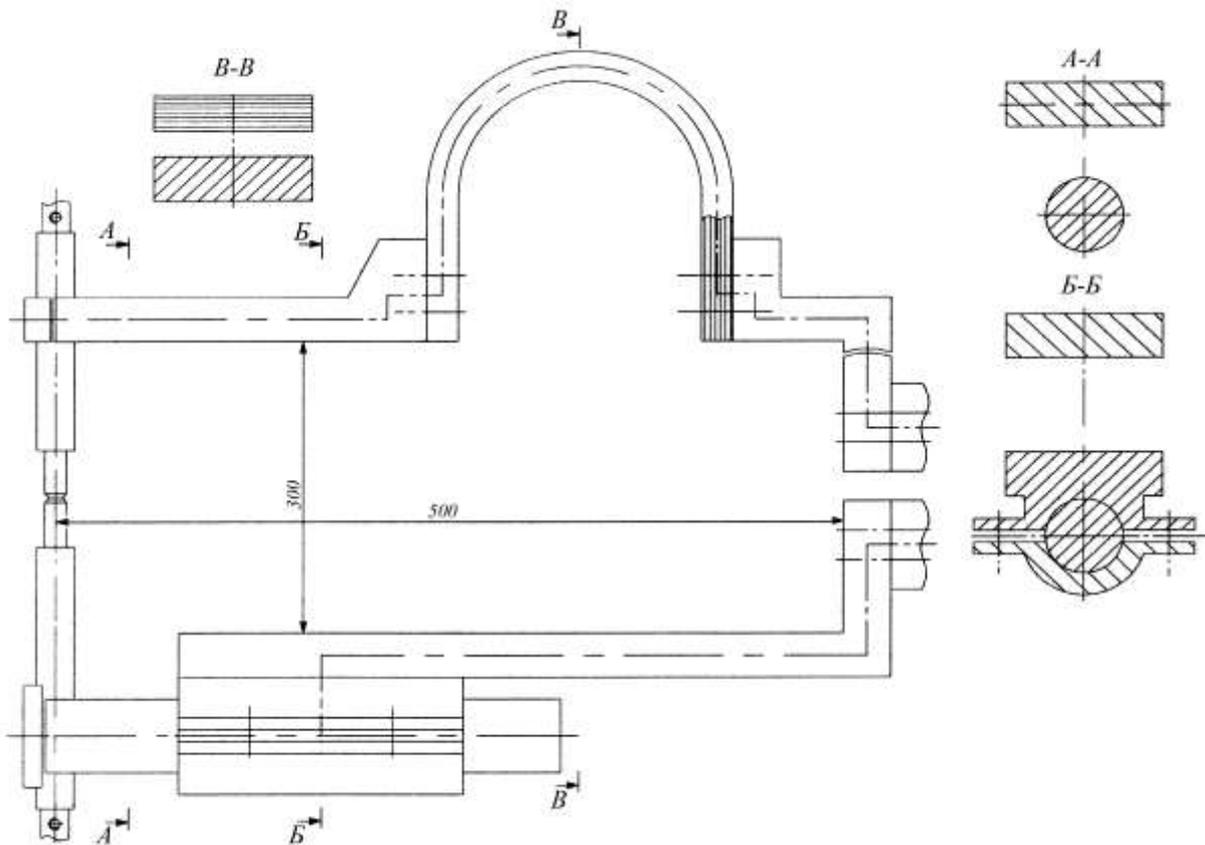


Рисунок 3.4 – Сварочный контур машины для контактной точечной сварки

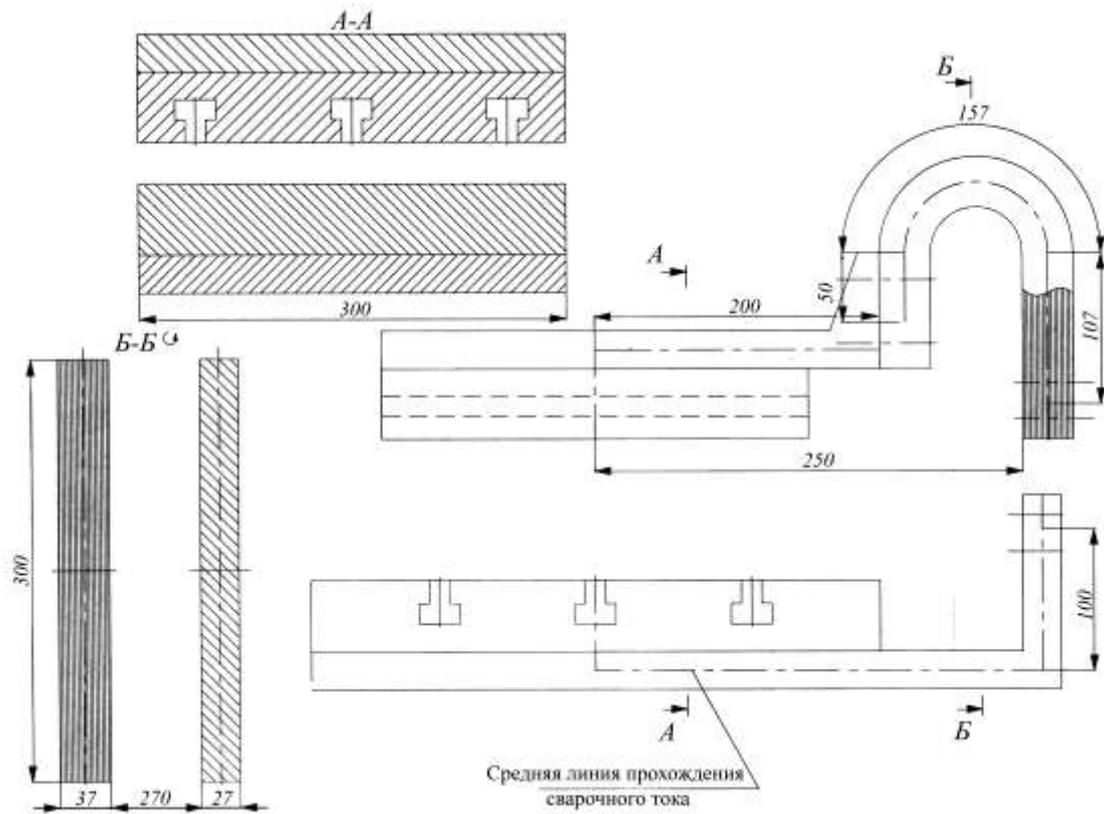


Рисунок 3.5 – Сварочный контур машины для контактной рельефной сварки

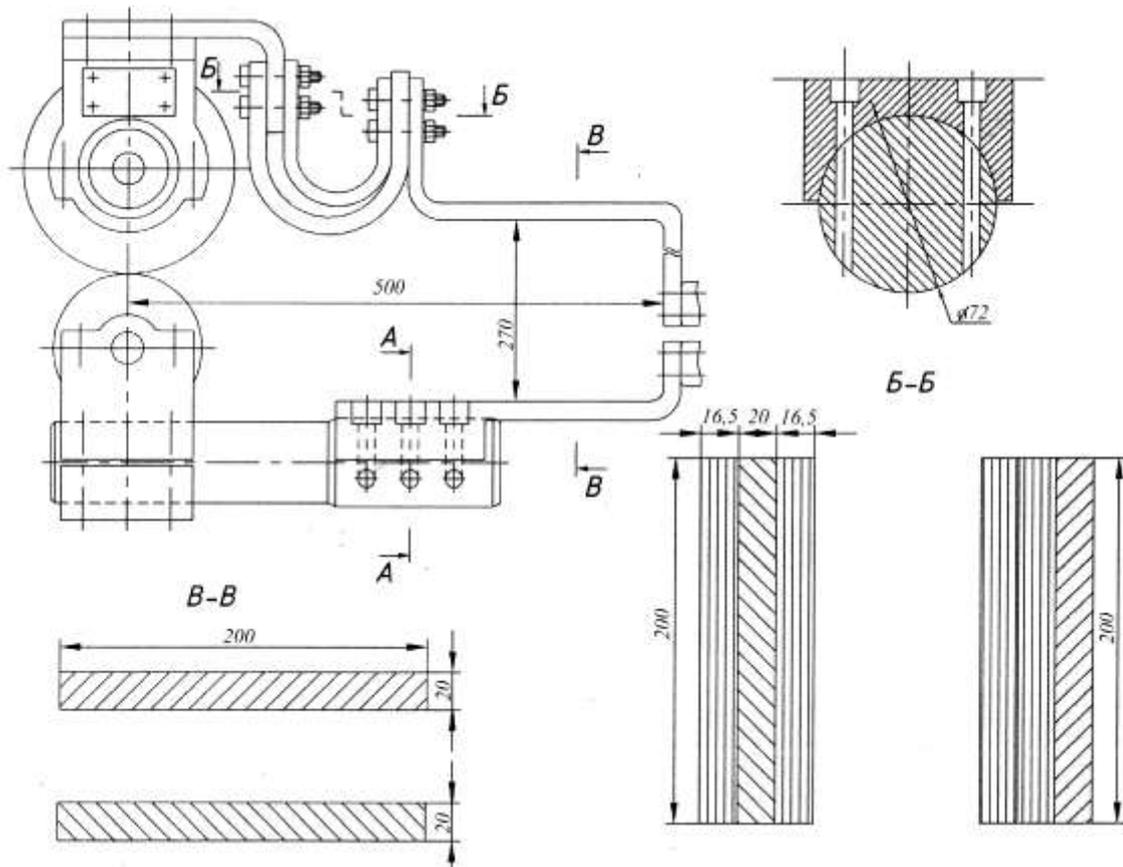


Рисунок 3.6 – Сварочный контур машины для контактной шовной сварки

#### 4 Практическое занятие № 4. Изучение принципиальных электрических схем машин для контактной сварки

Принципиальная электрическая схема машины для контактной точечной сварки типа МТ-4019 представлена на рисунке 4.1. Данная схема является типовой для машин переменного тока [7].

Напряжение сети подается и снимается через автоматический выключатель F1M (ток номинальный  $I_{НОМ} = 400$  А, ток уставки расцепителя  $I_{УСТ} = 3200$  А), который обеспечивает защиту электрических цепей от коротких замыканий, аварийное отключение с помощью кнопки S1F, выключение машины при открывании двери, блокируемой конечным выключателем S2F.

Регулятор времени импульсный E1 (РВИ-801) обеспечивает заданную последовательность и продолжительность операций цикла сварки, а также плавное фазовое регулирование сварочного тока. Коммутация сварочного тока осуществляется тиристорным контактором E2. Для снижения уровня радиопомех установлен помехоподавляющий фильтр E3 (R–C-цепь). Переключатель ступеней S5 позволяет получить ступенчатое регулирование вторичного напряжения в сварочном трансформаторе T1M.

Включение машины в работу осуществляется переносной педальной кнопкой S4. Сигнальная лампа H1 указывает на готовность машины к сварке. Переключатель режимов работы S3 позволяет производить наладку сварочного цикла без тока. Электромагнитные клапаны Y1K и Y2K управляют пневмоприводом усилия сжатия.

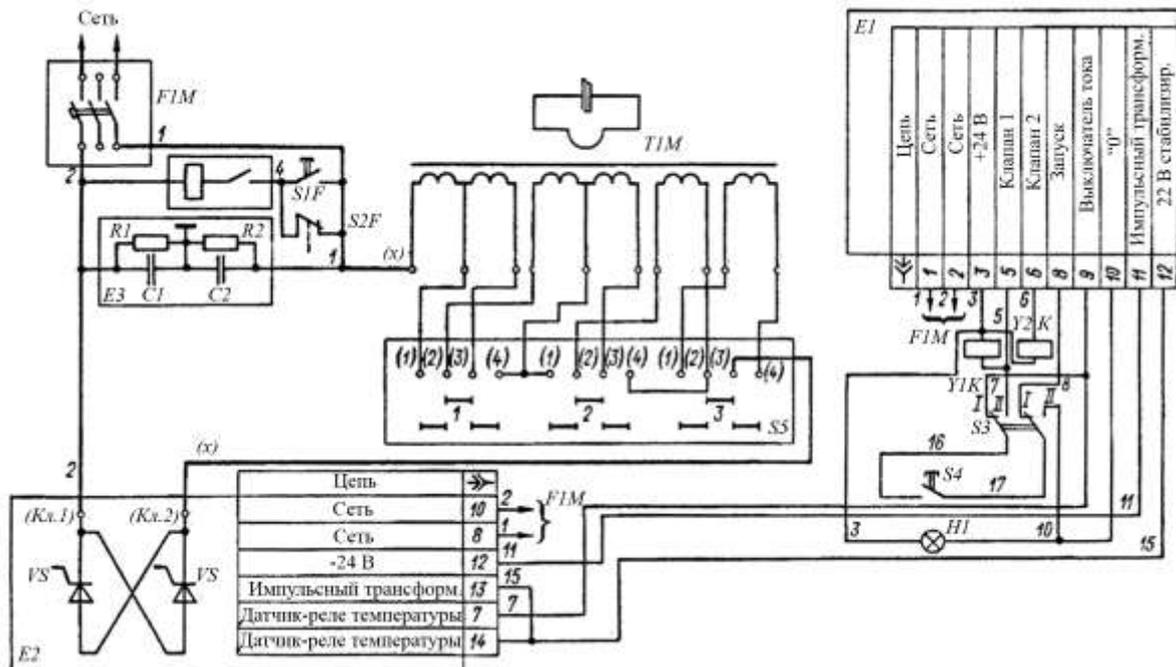


Рисунок 4.1 – Принципиальная электрическая схема машины для контактной точечной сварки типа МТ-4019

Принципиальная электрическая схема машины для шовной сварки МШ-3401 приведена на рисунке 4.2 [7]. Сварка осуществляется при включении сварочного трансформатора Т1М, которое производится тиристорным контактором А2 при подаче команды с блока регулирования А1.

Нажатием на педальную кнопку S6 подается питание на реле К2, К3, К4, электромагнитные пневмоклапаны Y1, Y2 и двигатель привода М. При этом выпускается сжатый воздух из нижней камеры пневмоцилиндра, что вызывает опускание верхнего сварочного ролика и зажатие свариваемого изделия. При неправильном зажатии изделия необходимо до истечения времени, задаваемого пневматическим реле времени К4, отпустить педальную кнопку, и верхний ролик поднимется в исходное положение.

Повторное опускание ролика производится повторным нажатием кнопки S6. По истечении выдержки времени реле К4 включается реле К5, которое включает реле К6, электромагнитную муфту Y3 и дает сигнал на запуск блока регулирования через реле К9; начинают вращаться сварочные ролики, и через промежуток времени, задаваемый конденсатором С1, включается сварочный ток. Резистор R1 служит для обеспечения равномерного разгона привода ПМСМ-6, и по истечении выдержки времени, задаваемой реле К6, он шунтируется. После включения сварочного тока педальную кнопку S6 следует отпустить. При этом отключается реле К2, и включается реле К7.

Для окончания сварки необходимо снова нажать педальную кнопку S6. При этом включается реле К8, которое отключает реле К3 и К4. Последние отключают электромагнитные пневматические клапаны Y1 и Y2, реле К5, привод вращения и сварочный ток. Верхний сварочный ролик поднимается. После отпускания pedalной кнопки S6 схема приходит в исходное положение.

Назначение других наиболее важных элементов схемы: F1M – автоматический выключатель для подачи и снятия напряжения сети и для защиты от короткого замыкания; S1F – кнопка «Аварийный стоп»; S2F, S3F – конечные выключатели для снятия напряжения сети с машины при открытых дверях; S7 – переключатель «Скорость сварки» для регулирования скорости сварки; S5 – выключатель «Ток включен–выключен» для проверки работы машины без сварочного тока; Н1 – сигнальная лампа наличия напряжения сети на машине; S8 – кнопка «Точечная сварка» для включения работы машины в точечном режиме.

Для получения точечной сварки тумблер, установленный на блоке регулирования, ставится в положение «Точечная сварка». Нажатием на педальную кнопку S6 опускаются сварочные ролики и через заданную реле К4 выдержку времени начинают вращаться. Далее нажимается кнопка S8. Блок регулирования выдает один сварочный импульс. Для последующих импульсов надо каждый раз нажимать кнопку S8. Такая сварка используется при постановке прихваток, в частности при сварке кольцевых швов.

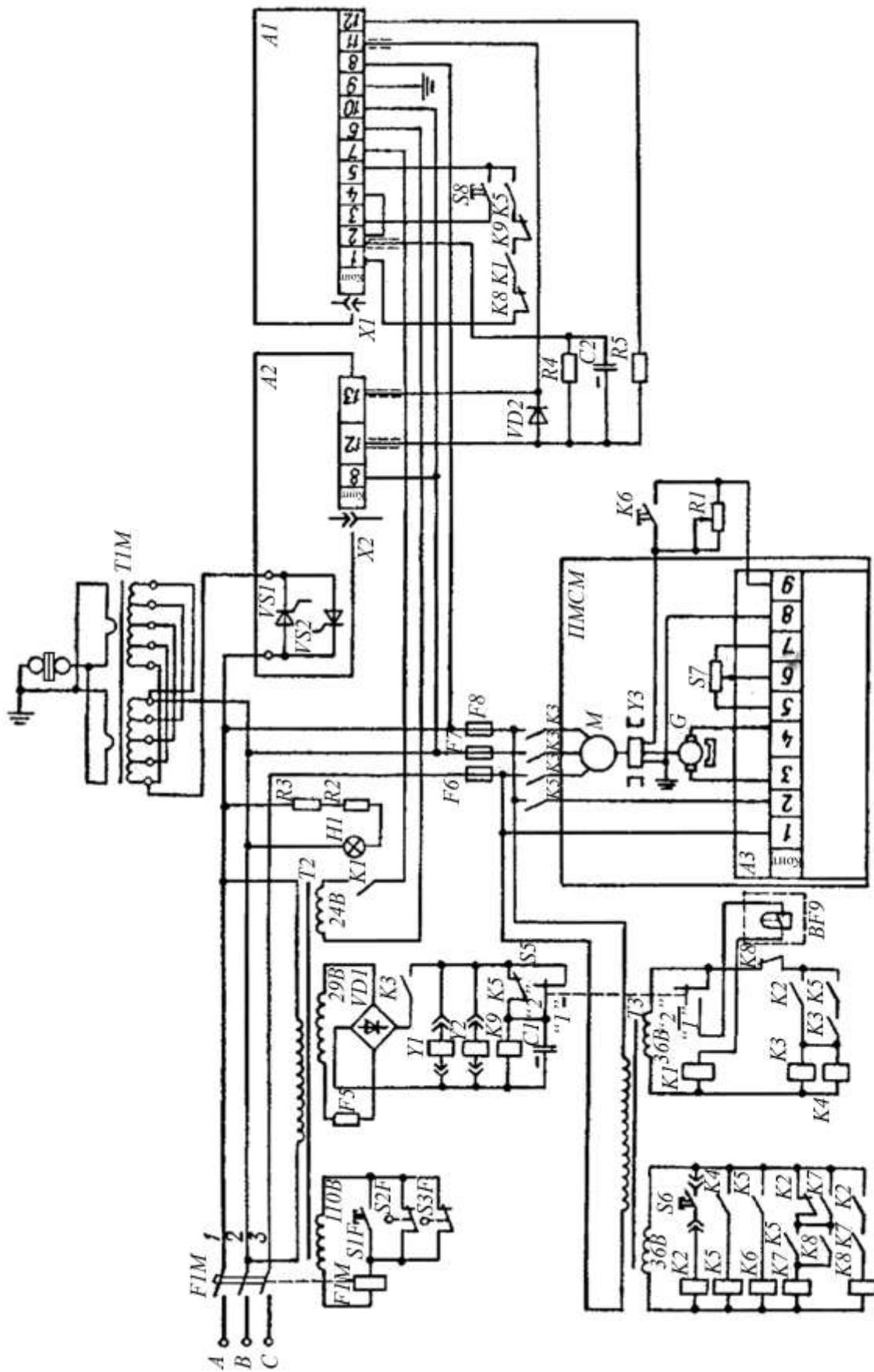


Рисунок 4.2 – Принципиальная электрическая схема машины для шовной сварки МШ-3401

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Из каких составляющих складывается общее сопротивление деталей при контактной точечной сварке?
- 2 Какие факторы влияют на величину полного сопротивления межэлектродной зоны?
- 3 Назовите основные параметры режима контактной точечной, рельефной и шовной сварки.
- 4 Опишите методику расчета сварочного тока для контактной точечной сварки на основе уравнения теплового баланса.
- 5 Назначение и конструкция сварочного (вторичного) контура контактной машины.
- 6 Составляющие активного и индуктивного сопротивления сварочного контура контактной машины.
- 7 Порядок расчета сварочного контура для конкретной контактной машины.
- 8 Назначение и основные узлы машин для контактной точечной, рельефной и шовной сварки.
9. Принцип работы электрической схемы машин для контактной точечной и шовной сварки. Способы регулирования сварочного тока.

### **Список литературы**

- 1 **Березиенко, В. П.** Технология сварки давлением / В. П. Березиенко, С. Ф. Мельников, С. М. Фурманов. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2009. – 256 с.
- 2 **ГОСТ 15878-79.** Контактная сварка. Соединения сварные. Конструктивные элементы. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1979. – 11 с.
- 3 Марочник сталей и сплавов / А. С. Зубченко [и др.]; под общ. ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
- 4 **Слиозберг, С. К.** Электроды для контактной сварки / С. К. Слиозберг, П. Л. Чулошников. – Л.: Машиностроение, 1972. – 96 с.
- 5 **Рыськова, З. А.** Трансформаторы для электрической контактной сварки / З. А. Рыськова, П. Д. Федоров, В. И. Жемерева. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 423 с.
- 6 **ГОСТ 10594-80.** Оборудование для дуговой, контактной, ультразвуковой сварки и для плазменной обработки. Ряды параметров. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1981. – 3 с.
- 7 Оборудование для контактной сварки: справ. пособие / Под ред. В. В. Смирнова. – СПб.: Энергоатомиздат, 2000. – 848 с.