

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Оборудование и технология сварочного производства»

# ТЕХНОЛОГИЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

*Методические рекомендации к практическим занятиям  
для студентов направления подготовки  
15.03.01 «Машиностроение»  
дневной формы обучения*



УДК 621.791.7  
ББК 30.61  
Т38

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Оборудование и технология сварочного производства» «15» сентября 2021 г., протокол № 2

Составитель канд. техн. наук, доц. С. М. Фурманов

Рецензент канд. техн. наук, доц. Д. М. Свирепа

Методические рекомендации к практическим занятиям по дисциплине «Технология контактной сварки» предназначены для студентов направления подготовки 15.03.01 «Машиностроение» дневной формы обучения

Учебно-методическое издание

## ТЕХНОЛОГИЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

Ответственный за выпуск	А. О. Коротеев
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 26 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 07.03.2019.  
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский  
университет, 2021

## Содержание

1 Практическое занятие № 1. Расчет величины электрических сопротивлений зоны нагрева для различных способов сварки и свариваемых материалов .....	4
2 Практическое занятие № 2. Расчет параметров режима контактной точечной сварки конкретного изделия, разработка технологии его сборки и сварки .....	7
3 Практическое занятие № 3. Расчет параметров режима контактной стыковой сварки изделия, разработка технологии его сборки и сварки .....	13
4 Практическое занятие № 4. Расчет параметров режима контактной рельефной сварки изделия, разработка технологии его сборки и сварки .....	18
5 Практическое занятие № 5. Расчет параметров режима контактной шовной сварки конкретного изделия, разработка технологии его сборки и сварки .....	23
6 Практическое занятие № 6. Конструирование и расчет сварочного контура установок для контактной сварки .....	27
Список литературы.....	42

# 1 Практическое занятие № 1. Расчет величины электрических сопротивлений зоны нагрева для различных способов сварки и свариваемых материалов

**Цель работы:** определить величину сопротивления зоны нагрева для различных способов контактной сварки и свариваемых материалов.

## 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 сварочным током до образования зоны взаимного расплавления, называемой литым ядром [1, 2]. Суммарное сопротивление участка «электрод–электрод»  $r_{\text{ээ}}(\tau)$  в начале протекания сварочного тока складывается из следующих составляющих:

$$r_{\text{ээ}}(\tau) = r_{\text{дд}}(\tau) + 2r_{\text{д}}(\tau) + 2r_{\text{эд}}(\tau), \quad (1.1)$$

где  $\tau$  – время протекания процесса сварки;

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

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

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

Величина сопротивления участка «электрод–электрод»  $r_{\text{ээ}}$  существенно влияет на условия нагрева и температурное поле. При протекании сварочного тока сопротивление  $r_{\text{ээ}}$  существенно изменяется (см. рисунок 1.1).

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 сопротивление металлов и температурный коэффициент электрического сопротивления

Материал	$\rho_0$ , мкОм·см	Интервал температур, °С	$\alpha$ , 1/°С
Низкоуглеродистые стали	13	20...1500	0,0066
Нержавеющие стали	75	20...1400	0,00007
Сплав Амгб	7,1	20...560	0,00073
Алюминий	2,8	20...650	0,004
Титан	60	20...1725	0,00164
Медь	1,7	20...1280	0,004

При расчёте тепловых процессов точечной сварки в качестве сопротивления  $r_{\text{ЭЭ}}$  можно рассматривать сопротивление двух свариваемых деталей в конце нагрева  $r_{\text{ЭЭК}} = 2r_{\text{ДК}}$  (см. рисунок 1.1). На рисунке 1.2 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].

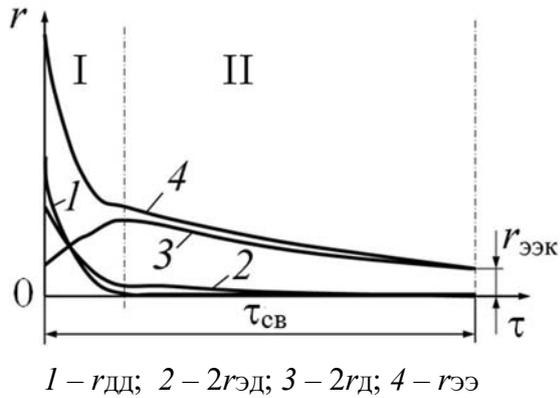


Рисунок 1.1 – Характер изменения сопротивлений участка «электрод–электрод» при протекании сварочного тока

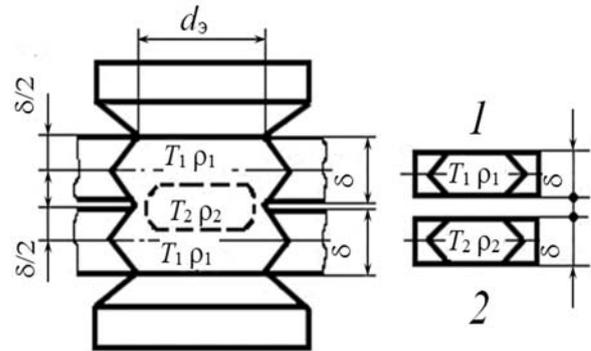


Рисунок 1.2 – Схема расчета электрического сопротивления двух деталей в момент выключения сварочного тока

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  $T_2$ .

$$2r_{\text{ДК}} = \frac{4 \cdot A \cdot k_{\text{р}} \cdot \delta (\rho_1 + \rho_2)}{\pi \cdot d_{\text{Э}}^2}, \quad (1.2)$$

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

$\delta$  – толщина пластины, мм;

$k_{\text{р}}$  – коэффициент, учитывающий неравномерность нагрева деталей; для сталей и титана  $k_{\text{р}} = 0,85$ , для алюминиевых и магниевых сплавов  $k_{\text{р}} = 0,9$ ;

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

$\rho_1, \rho_2$  – удельные электрические сопротивления при температурах  $T_1$  и  $T_2$ .

Удельное электрическое сопротивление свариваемого металла  $\rho_T$ , нагретого до температуры  $T$ , определяется по формуле

$$\rho_T = \rho_0 (1 + \alpha \cdot T), \quad (1.3)$$

где  $\rho_0$  – удельное электрическое сопротивление при температуре  $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

$\alpha$  – температурный коэффициент электрического сопротивления,  $1/^\circ\text{C}$ .

Удельные сопротивления металлов  $\rho_0$  и температурные коэффициенты сопротивления выбираются по таблице 1.1. Температуры  $T_1$  и  $T_2$  принимаются в

зависимости от материала деталей по таблице 1.2. Удельные электрические сопротивления для температур  $T_1$  и  $T_2$  рассчитываются по следующим формулам:

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

## 1.2 Порядок выполнения работы

- 1 Варианты заданий приведены в таблице 1.2.
- 2 Определить диаметр контакта «электрод–деталь»  $d_{\text{э}}$ .
- 3 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	$T_2$ , °C ( $T_2 = T_{\text{пл}}$ )	$T_1$ , °C ( $T_1 = (0,7 \dots 0,8)T_{\text{пл}}$ )
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 40X	1425	1140
12	1	Сталь 40X	1425	1140
13	1,5	Сталь 40X	1425	1140
14	2	Сталь 40X	1425	1140
15	3	Сталь 40X	1425	1140
16	0,5	Коррозионно-стойкая сталь 12X18H10T	1425	1140
17	1	Сталь 12X18H10T	1425	1140
18	1,5	Сталь 12X18H10T	1425	1140
19	2	Сталь 12X18H10T	1425	1140
20	3	Сталь 12X18H10T	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 конкретного изделия, разработка технологии его сборки и сварки

**Цель работы:** определить величину сварочного тока при контактной точечной сварке различных материалов разной толщины.

### 2.1 Общие теоретические сведения

Основные параметры режима точечной сварки:

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

Расчетная схема нагрева металла при точечной сварке представлена на рисунке 2.1.

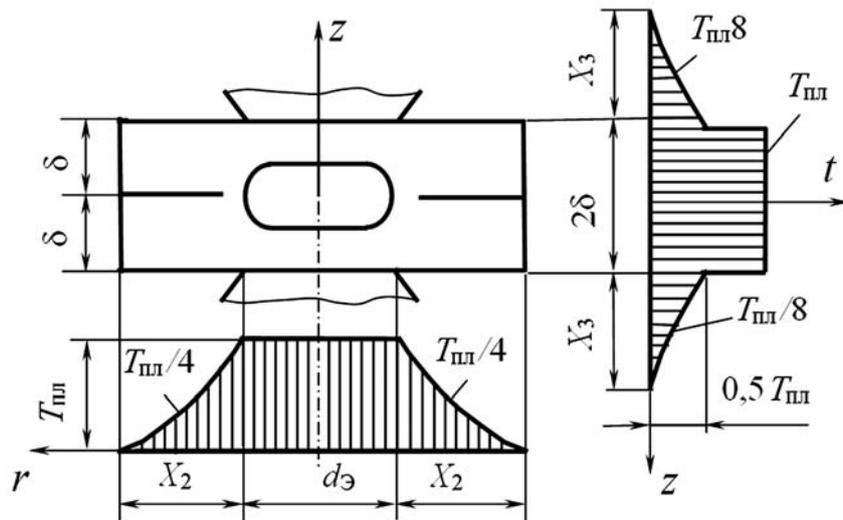


Рисунок 2.1 – Расчетная схема нагрева металла при точечной сварке

Расчет величины сварочного тока для контактной точечной сварки осуществляется на основе уравнения теплового баланса [1]. Полное количество теплоты  $Q_{ЭЭ}$ , Дж, затрачиваемое на образование сварной точки:

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

где  $Q_1$  – энергия, затрачиваемая на нагрев до температуры плавления  $T_{пл}$  столбика металла высотой  $2\delta$  и диаметром основания, равным диаметру контакта «электрод–деталь»  $d_{Э}$ , Дж;

$Q_2$  – теплота, расходуемая на нагрев металла в виде окружающего ядро кольца шириной  $x_2$  до средней температуры, равной  $T_{пл}/4$ , Дж;

$Q_3$  – потери теплоты в электроды, которые учитываются нагревом условного цилиндра высотой  $x_3$  до средней температуры, равной  $T_{\text{Пл}}/8$ , Дж.

Ширина кольца  $x_2$  и высота цилиндра  $x_3$  рассчитываются по следующим формулам:

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

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

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

Составляющие уравнения теплового баланса:

$$Q_1 = 2 \cdot \delta \cdot c_M \cdot \gamma_M \frac{\pi \cdot d_{\text{Э}}^2}{4} T_{\text{Пл}}; \quad (2.4)$$

$$Q_2 = 2 \cdot k_1 \cdot \pi \cdot x_2 \cdot (d_{\text{Э}} + x_2) \cdot \delta \cdot c_M \cdot \gamma_M \frac{T_{\text{Пл}}}{4}; \quad (2.5)$$

$$Q_3 = 2 \cdot k_2 \frac{\pi \cdot d_{\text{Э}}^2}{4} \cdot x_3 \cdot c_{\text{Э}} \cdot \gamma_{\text{Э}} \frac{T_{\text{Пл}}}{8}, \quad (2.6)$$

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

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

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

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

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

$k_1$  – коэффициент, учитывающий, что средняя температура кольца несколько ниже средней температуры  $T_{\text{Пл}}/4$ ,  $k_1 = 0,8$ ;

$k_2$  – 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:

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

где  $m_R$  – коэффициент, учитывающий изменение  $r_{\text{ЭЭ}}$  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  $m_R = 1,4$ ;

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

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

$\tau_{\text{СВ}}$  – 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	$T_{\text{пл}}$ , °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
Титановый сплав ОТ4	4,6	0,58	0,04	1660
Бронза БрХ-1	8,92	0,388	0,91	1081
Бронза БрХЦр	8,92	0,388	1,06	1080
Бронза БрХВЦр	8,83	0,394	1,06	1080
Медь М1	8,94	0,43	0,96	1083

На практике  $r_{\text{ЭК}}$  может быть 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 данные – в таблице 2.3 [1].

Таблица 2.2 – Величина  $r_{\text{ЭК}}$  при точечной сварке низкоуглеродистой стали

$\delta$ , мм	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5	6	7
$r_{\text{ЭК}}$ , мкОм	128	112	98	89	82	75,5	69,5	61,5	56	52,5

Таблица 2.3 – Величина  $r_{\text{ЭК}}$  при контактной сварке металлов и сплавов

Материал	$r_{\text{ЭК}}$ , мкОм (в конце процесса сварки), при толщине 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 таблицам рекомендованных режимов сварки (таблица 2.4) [1, 5].

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

Таблица 2.5 – Рекомендуемые размеры электродов

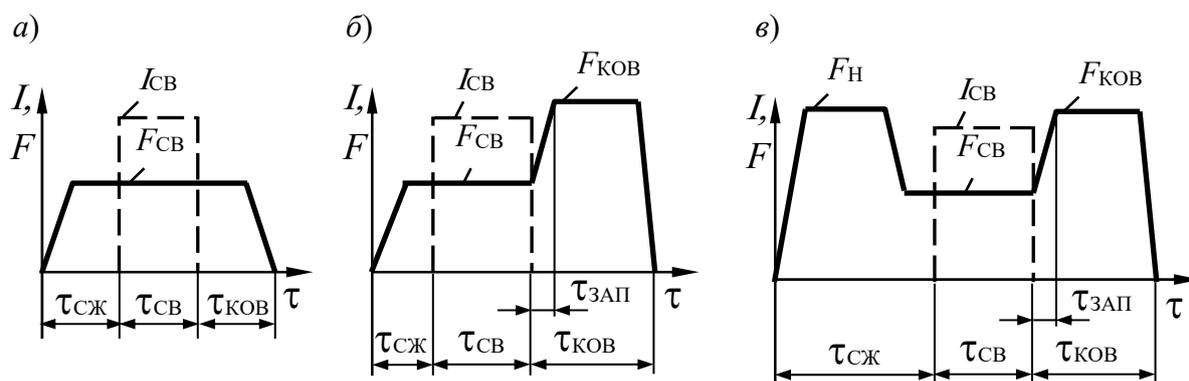
Толщина детали	Размер электрода, мм		
	$D_{\text{Э}}$	$d_{\text{Э}}$	$R_{\text{Э}}$
0,5	12	4	25...50
0,8	12	5	50...75
1,0	12	5	75...100
1,2	16	6	75...100
1,5	16	7	100...150
2,0	20	8	100...150
3,0	25	10	150...200
4,0	25	12	200...250

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 термомодеформационный цикл сварки.

Удельное электросопротивление  $\rho_0$  и теплопроводность  $\lambda$  в большей степени определяют жесткость режима сварки. При малых  $\rho_0$  и большой  $\lambda$  выбирают жесткий режим, при котором количество теплоты, передаваемое в окружающий сварную точку металл и электроды, меньше, чем при мягких режимах.

**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).



*a* – с постоянным усилием сжатия; *б* – с повышенным ковочным усилием; *в* – с повышенными предварительным сжатием и ковочным усилием

Рисунок 2.2 – Циклограммы процессов точечной сварки

**Среднеуглеродистые стали** обладают более высокими  $\rho_0$  и сопротивлением деформации. Они склонны к закалке и кристаллизационным трещинам. В литом ядре и околоточечной 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, *a*) или последующая термообработка (рисунок 2.3, *б*).

Усилие сжатия  $F_{CV}$  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  $I_{CV}$  и термообработки  $I_{ТО}$ .

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

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

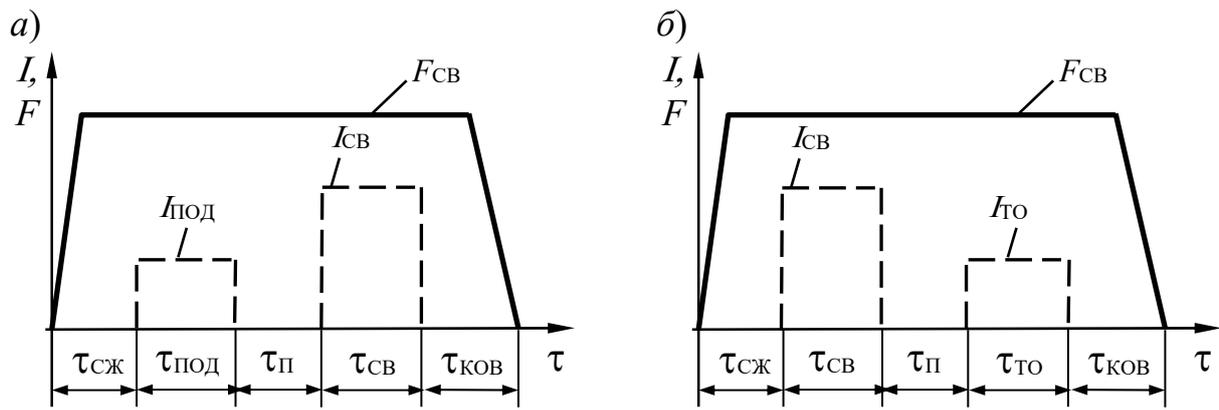


Рисунок 2.3 – Циклограммы процесса сварки с предварительным подогревом (а) и последующей термообработкой (б)

**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.

**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 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 контакта  $d_{\text{Э}} = 12$  мм и временем сварки  $\tau_{\text{СВ}} = 1$  с. Для стали  $c_{\text{М}} = 0,67$  Дж/(г·°С),  $\gamma_{\text{М}} = 7,8$  г/см<sup>3</sup>,  $a_{\text{М}} = 0,09$  см<sup>2</sup>/с, температура плавления стали  $T_{\text{ПЛ}} = 1500$  °С. Для хромовой бронзы БрХ-1  $c_{\text{Э}} = 0,38$  Дж/(г·°С);  $\gamma_{\text{Э}} = 8,9$  г/см<sup>3</sup>;  $a_{\text{Э}} = 0,91$  см<sup>2</sup>/с [1]. Сопротивление листов к концу процесса сварки  $r_{\text{ЭЭ}} = 69,5$  мкОм (см. таблицу 2.2).

$$Q_1 = 2 \cdot \delta \cdot c_{\text{М}} \cdot \gamma_{\text{М}} \frac{\pi \cdot d_{\text{Э}}^2}{4} T_{\text{ПЛ}} = 2 \cdot 0,4 \cdot 0,67 \cdot 7,8 \frac{3,14 \cdot 1,2^2}{4} 1500 = 7092 \text{ Дж};$$

$$Q_2 = 2 \cdot k_1 \cdot \pi \cdot x_2 \cdot (d_{\text{э}} + x_2) \cdot \delta \cdot c_{\text{м}} \cdot \gamma_{\text{м}} \frac{T_{\text{пл}}}{4} =$$

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

$$x_2 = 4 \sqrt{a_{\text{м}} \cdot \tau_{\text{св}}} = 4 \sqrt{0,09 \cdot 1} = 1,2 \text{ см};$$

$$Q_3 = 2 \cdot k_2 \frac{\pi \cdot d_{\text{э}}^2}{4} \cdot x_3 \cdot c_{\text{э}} \cdot \gamma_{\text{э}} \frac{T_{\text{пл}}}{8} =$$

$$= 2 \cdot 1,5 \frac{3,14 \cdot 1,2^2}{4} \cdot 3,8 \cdot 0,38 \cdot 8,9 \frac{1500}{8} = 8175 \text{ Дж};$$

$$x_3 = 4 \sqrt{a_{\text{э}} \cdot \tau_{\text{св}}} = 4 \sqrt{0,91 \cdot 1} = 3,8 \text{ см};$$

$$Q_{\text{ээ}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 7092 + 11348 + 8175 = 26615 \text{ кДж};$$

$$I_{\text{св}} = \sqrt{\frac{Q_{\text{ээ}}}{m_{\text{р}} \cdot 2r_{\text{дк}} \cdot \tau_{\text{св}}}} = \sqrt{\frac{26615}{1 \cdot 69,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1}} = 19569 \text{ А} \approx 19,6 \text{ кА}.$$

### 3 Практическое занятие № 3. Расчет параметров режима контактной стыковой сварки изделия, разработка технологии его сборки и сварки

**Цель работы:** рассчитать параметры режима контактной стыковой сварки изделия методом непрерывного оплавления.

#### 3.1 Общие теоретические сведения

Контактная сварка стыковая – метод соединения металлов, суть которого заключается в равномерном нагреве всего стыка обеих деталей. Стыковая сварка непрерывным оплавлением – это разновидность контактной стыковой сварки оплавлением, при которой процесс оплавления начинается в результате поступательного движения сразу же после сближения деталей, находящихся под напряжением. Происходит непрерывно повторяющееся образование и разрушение отдельных участков торцевых поверхностей свариваемых деталей с выбрасывани-

ем из стыка расплавленных частиц металла, а сварное соединение формируется сжатием нагретых стыкуемых поверхностей. Во время сжатия вместе с выдавливаемым из стыка жидким металлом удаляются окислы и другие загрязнения.

Циклограмма процесса стыковой сварки непрерывным оплавлением представлена на рисунке 3.1. Основными параметрами режима сварки являются:

- толщина листа  $\delta$ , мм;
- установочная длина  $l_0$  и длина закрепления  $l_3$ ;
- величина тока оплавления  $I_{\text{опл}}$  и длительность оплавления  $\tau_{\text{опл}}$ ;
- перемещение подвижной плиты  $h_{\text{пл}}$ ;
- скорость оплавления  $V_{\text{опл}}$  и припуск на оплавление  $\Delta_{\text{опл}}$ ;
- длительность осадки под током  $\tau_{\text{ос.т}}$  и общая длительность осадки  $\tau_{\text{ос}}$ ;
- припуски на осадку под током  $\Delta_{\text{ос.т}}$  и на общую осадку  $\Delta_{\text{ос}}$ ;
- ток короткого замыкания  $I_{2\text{К}}$ ;
- общий припуск  $\Delta = \Delta_{\text{опл}} + \Delta_{\text{ос}}$ ;
- скорость осадки  $V_{\text{ос}}$  и усилие осадки  $F_{\text{ос}}$ .

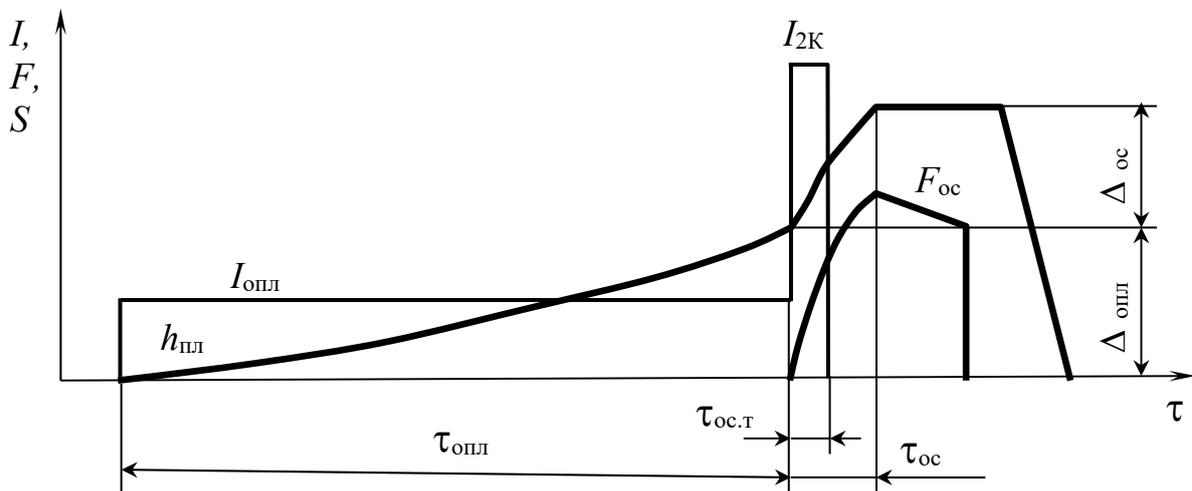


Рисунок 3.1 – Циклограмма процесса стыковой сварки непрерывным оплавлением

### 3.2 Пример расчета

Рассчитать параметры режима контактной стыковой сварки непрерывным оплавлением детали, которая имеет форму кольца диаметром  $d = 500$  мм, выполненного вальцеванием листа из стали СтЗсп толщиной  $\delta = 20$  мм и шириной  $h = 120$  мм (рисунок 3.2).

Сталь СтЗсп сваривается без ограничений. При сварке больших толщин рекомендуется подогрев и последующая термообработка. Теплофизические свойства стали СтЗсп представлены в таблице 3.1.

Параметры режима сварки выбирают по таблицам, номограммам, рассчитывают или устанавливают опытным путем. Выбранные или расчетные режимы проверяют и уточняют для конкретных условий.

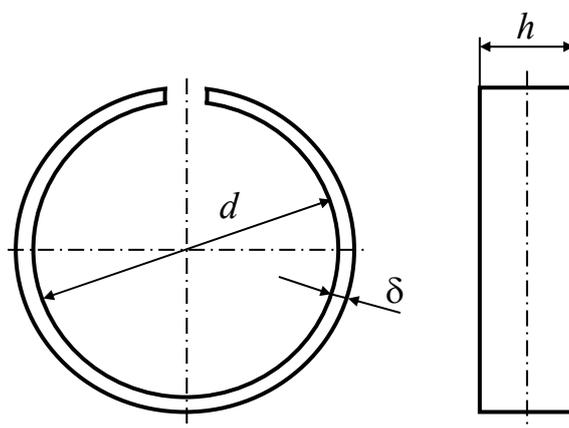


Рисунок 3.2 – Контактная стыковая сварка кольца

Таблица 3.1 – Теплофизические свойства свариваемых металлов

Материал	Температура плавления $T_{пл}$ , °C	Плотность $\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>	Удельное электросопротивление, мкОм·м		Удельная теплоемкость $c$ , Дж/(кг·°C)	Теплопроводность средняя $\lambda$ , Вт/(м·°C)	Температурный коэффициент сопротивления $\alpha$
			$\rho_0$ , при 20 °C	$\rho_T$ , среднее в интервале 0... $T_{пл}$			
Ст3сп	1500	7850	0,25	0,6	669	33,4	$3,8 \cdot 10^{-3}$

Среднее значение скорости оплавления  $V_{опл}$  и осадки  $V_{ос}$  для различных свариваемых материалов находятся по таблице 3.2. Для стали Ст3сп принимаем:  $V_{опл} = 2,5$  мм/с;  $V_{ос} = 15$  мм/с.

Таблица 3.2 – Средние значения скорости оплавления  $V_{опл}$  и осадки  $V_{ос}$ 

Металл	Скорость оплавления $V_{опл}$ , мм/с		Скорость осадки $V_{ос}$ , мм/с
	средняя	перед осадкой	
Низкоуглеродистая сталь	0,5...1,5	2...5	15...20
Низколегированная сталь	1,5...2,0	4...5	20...30
Аустенитная сталь	2,5...3,5	5...7	30...50

Схема установки детали при стыковой сварке оплавлением представлена на рисунке 3.3. Припуски на оплавление  $\Delta_{опл}$  и на осадку  $\Delta_{ос}$  должны быть достаточны для равномерного разогрева деталей и создания на торцах слоя расплава. Обычно  $\Delta_{опл}$  составляет 0,7...0,8 от общего припуска  $\Delta$ , а припуск на осадку  $\Delta_{ос} = (0,3...0,2) \Delta$ . Припуск на осадку под током  $\Delta_{ос.т}$  составляет  $(0,5...1,0) \Delta_{ос}$ .

$$\Delta = 23 \text{ мм};$$

$$\Delta_{опл} = (0,7...0,8) \Delta = 0,7 \cdot 23 = 16,1 \text{ мм};$$

$$\Delta_{oc} = (0,3 \dots 0,2) \Delta = 0,3 \cdot 23 = 6,9 \text{ мм};$$

$$\Delta_{oc.т} = (0,5 \dots 1,0) \Delta_{oc} = 1 \cdot 6,9 = 6,9 \text{ мм}.$$

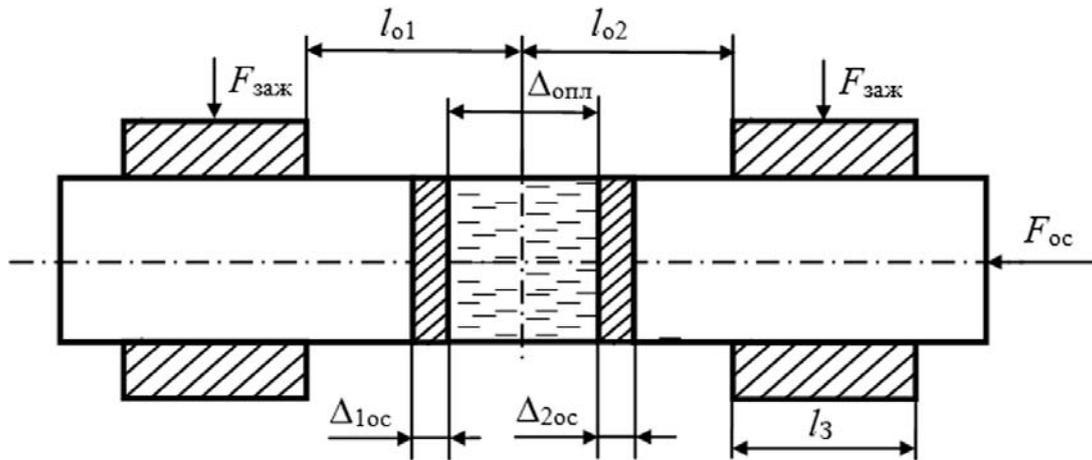


Рисунок 3.3 – Схема установки детали при стыковой сварке оплавлением

При выборе длительности осадки под током необходимо соблюдать следующее условие:

$$\tau_{oc.т} = (0,5 \dots 0,8) \tau_{oc}.$$

Установочная длина  $l_0$  (с учетом припуска на оплавление и осадку и толщины листа) определяется по формуле

$$l_0 = (0,7 \dots 1,0) \delta + \frac{\Delta_{опл} + \Delta_{oc}}{2} = 1 \cdot 20 + \frac{16,1 + 6,9}{2} = 31,5 \text{ мм}. \quad (3.1)$$

Длина закрепления находится по формуле

$$l_3 = (1,5 \dots 3,0) \delta = 1,5 \cdot 20 = 30 \text{ мм}. \quad (3.2)$$

При сварке низкоуглеродистых и низколегированных сталей давление при осадке  $P_{oc} = 30 \dots 50$  МПа, при сварке легированных сталей  $P_{oc} = 100 \dots 150$  МПа. Усилие осадки  $F_{oc}$  рассчитывается для свариваемых металлов как произведение площади сечения изделия на давление осадки  $P_{oc}$ :

$$F_{oc} = P_{oc} \cdot \delta \cdot h = 30 \cdot 20 \cdot 120 = 72000 \text{ Н} = 72 \text{ кН}. \quad (3.3)$$

Средняя величина тока при оплавлении вычисляется по формуле

$$I_{опл} = \sqrt{\frac{V_{опл} \cdot S \cdot \gamma \cdot [c \cdot (T_{опл} - T_{под}) + 274] - 2 \cdot \lambda \cdot S \frac{dT}{dx}}{0,7 \cdot R_{опл}}}, \quad (3.4)$$

где  $V_{\text{опл}}$  – скорость оплавления,  $V_{\text{опл}} = 2,5$  мм/с;  
 $S$  – площадь сечения изделия,  $S = 0,0024$  м<sup>2</sup>;  
 $\gamma$  – плотность, для стали  $\gamma = 7850$  кг/м<sup>3</sup>;  
 $\lambda$  – средняя удельная теплопроводность,  $\lambda = 37,6$  Вт/(м·°С);  
 $c$  – средняя удельная теплоемкость,  $c = 710$  Дж/(кг·°С);  
 $T_{\text{опл}}$  – средняя температура капель металла, вылетающих из стыка, для стали  $T_{\text{опл}} = 1500$  °С;  
 $T_{\text{под}}$  – температура подогрева изделия, при сварке стали непрерывным оплавлением принимается равной 1000 °С;  
 $dT/dx$  – градиент температуры у стыка (для стали принимается в пределах  $6 \cdot 10^5 \dots 8 \cdot 10^5$  °С/м),  $dT/dx = 6 \cdot 10^5$  °С/м;  
 $R_{\text{опл}}$  – сопротивление стыка при оплавлении, Ом.  
 Сопротивление стыка при оплавлении определяется по формуле

$$R_{\text{опл}} = \frac{4,44}{\sqrt[3]{S^2 \cdot V_{\text{опл}} \cdot i}} = \frac{4,44}{\sqrt[3]{0,0024^2 \cdot 2,5 \cdot 15 \cdot 10^6}} = 0,74 \text{ Ом}, \quad (3.5)$$

где  $i$  – плотность тока (при сварке стали принимается в пределах  $10 \cdot 10^6 \dots 15 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>),  $i = 15 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>.

Тогда величина тока при оплавлении

$$I_{\text{опл}} = \sqrt{\frac{2,5 \cdot 0,0024 \cdot 7850 [710(1500 - 1000) + 274] - 2 \cdot 37,6 \cdot 0,0024 \cdot 6 \cdot 10^5}{0,7 \cdot 0,74}} = 5,7 \text{ кА}.$$

### 3.3 Порядок выполнения работы

- 1 Выполнить задание по варианту, предложенному преподавателем.
- 2 Определить площадь контакта «деталь–деталь»  $S$ .
- 3 По указанной методике определить величину сопротивления стыка при оплавлении  $R_{\text{опл}}$  и величину тока при оплавлении  $I_{\text{опл}}$ .
- 4 Сделать выводы по результатам расчетов.

## 4 Практическое занятие № 4. Расчет параметров режима контактной рельефной сварки изделия, разработка технологии его сборки и сварки

**Цель работы:** рассчитать параметры режима контактной стыковой сварки изделия методом непрерывного оплавления.

### 4.1 Общие теоретические сведения

Соединение деталей при рельефной сварке происходит за счет концентрации сварочного тока в местах соприкосновения деталей по поверхности, ограниченной локальными выступами (рельефами) (рисунок 4.1).

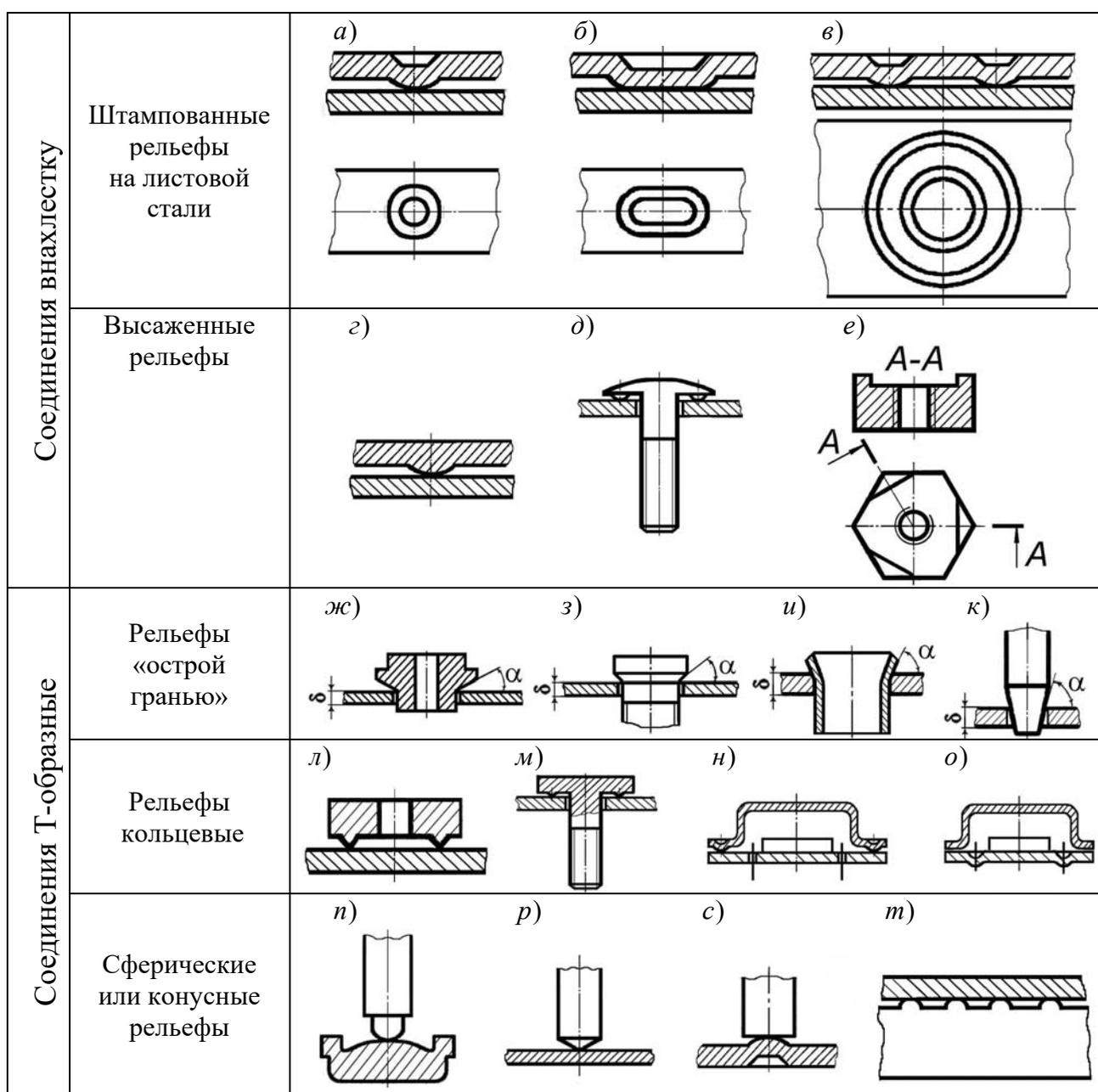


Рисунок 4.1 – Разновидности контактной рельефной сварки

Широкое применение нашла контактная рельефная сварка нахлесточных соединений из листовых материалов с рельефами различной формы, полученными холодной штамповкой. Обычно используют круглый рельеф (см. рисунок 4.1, *a*). Для увеличения площади сварки применяют рельефы продолговатой формы или кольцевой рельеф (см. рисунок 4.1, *б*, *в*).

При сварке деталей малых толщин с целью повышения прочности рельефов рекомендуют изготавливать их высадкой (см. рисунок 4.1, *г*). Высаженные рельефы используют также при приварке болтов и гаек (см. рисунок 4.1, *д*, *е*).

Особую группу составляют Т-образные соединения, которые можно получать с использованием рельефов с острой гранью (см. рисунок 4.1, *ж-к*). Кольцевой рельеф в таких соединениях образуется между одной из внутренних кромок отверстия в плоской детали толщиной  $\delta$  и наружной плоскостью детали, расположенной под углом  $\alpha$ .

Для приварки бобышек, гаек, болтов, для герметизации корпусов микросхем и полупроводниковых приборов применяют кольцевые рельефы (см. рисунок 4.1, *л-о*).

Отдельную группу Т-образных соединений представляют изделия, в которых одна из деталей торцевой поверхностью (сферической или конусной) приваривается к развитой поверхности другой детали. В этих случаях сварка происходит по поверхности привариваемого стержня (см. рисунок 4.1, *п-с*). Соединение может быть получено при сварке листов, в которых рельефы выштампованы в плоской детали (см. рисунок 4.1, *т*).

## 4.2 Пример расчета

Расчет режима рельефной сварки рассмотрим на примере кронштейна, состоящего из двух деталей: пластины (материал – сталь 08кп, толщина – 3 мм, диаметр отверстия – 10,5 мм) и болта М10 × 24 с кольцевым рельефом (материал – сталь 08кп, толщина шляпки – 6 мм) (рисунок 4.2).

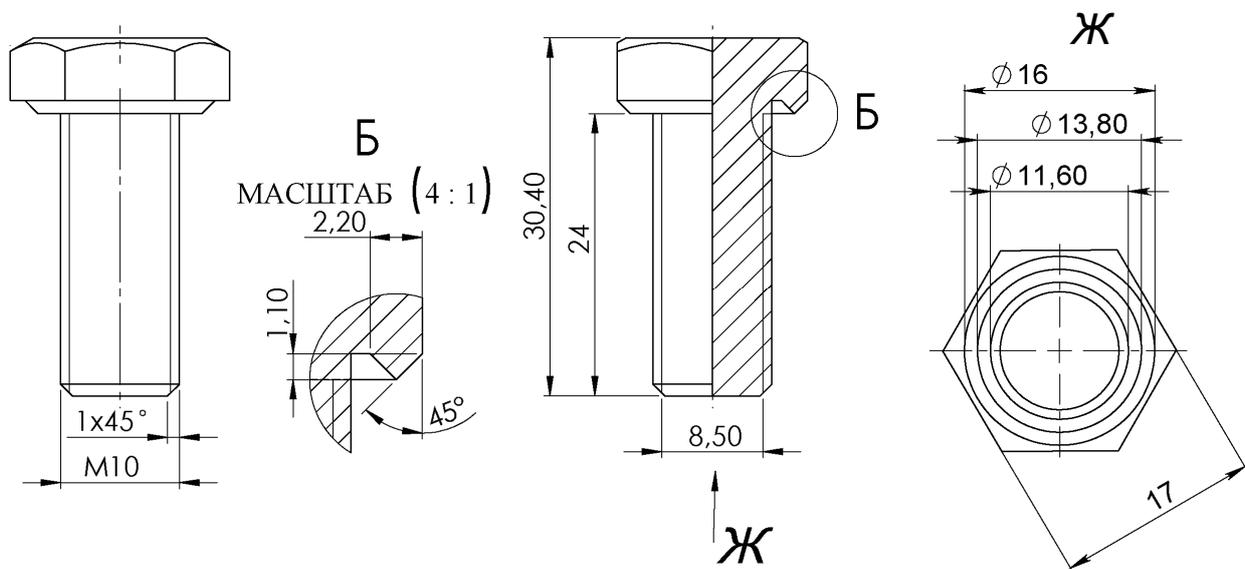
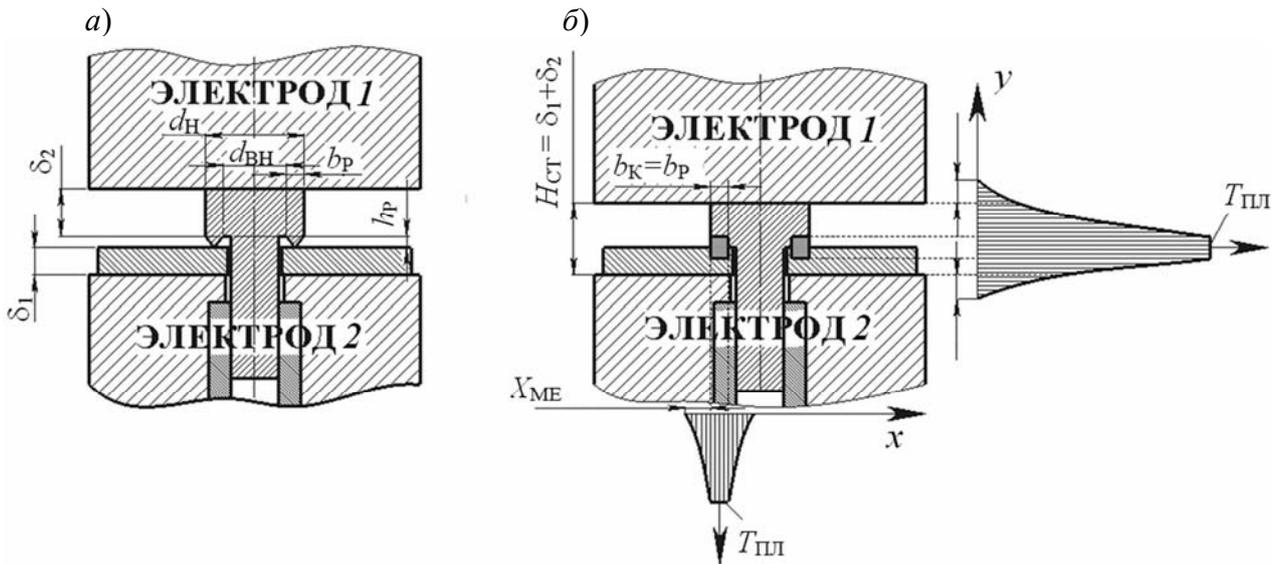


Рисунок 4.2 – Чертеж болта с рельефом

На рисунке 4.3 представлена схема для расчета уравнения теплового баланса соединения болта с пластиной по кольцевому рельефу.



*a* – геометрия соединения перед сваркой; *б* – расчетная схема

Рисунок 4.3 – Расчетная схема соединения рельефной сваркой болта с пластиной

Количество теплоты  $Q_{СТ}$ , необходимое для нагрева до температуры  $T_{ПЛ}$  кольцевого столбика металла пластины (с отверстием под болт) из стали 08кп шириной  $b_K$  (равна ширине кольцевого рельефа  $b_P$ ) и условной высотой  $H_{СТ} = \delta_1 + \delta_2$  вычислялось следующим образом:

$$Q_{СТ} = 0,25\pi(d_H^2 - d_{BH}^2)(\delta_1 + \delta_2)c_M\gamma_M T_{ПЛ} =$$

$$= 0,25 \cdot 3,14(1,6^2 - 1,16^2)(0,3 + 0,6)0,71 \cdot 7,83 \cdot 1530 = 7298 \text{ Дж},$$

где  $\delta_1 + \delta_2$  – суммарная толщина пластины и шляпки болта, равная условной высоте столбика металла, нагретого до температуры плавления  $T_{ПЛ}$  ( $\delta_1 = 0,3$  см,  $\delta_2 = 0,6$  см);

$d_H$  – наружный диаметр кольцевого рельефа,  $d_H = 16$  мм = 1,6 см;

$d_{BH}$  – внутренний диаметр кольцевого рельефа,  $d_{BH} = 11,6$  мм = 1,16 см;

$c_M$  – теплоемкость стали 08кп,  $c_M = 0,71$  Дж/(г·°С);

$\gamma_M$  – плотность стали 08кп,  $\gamma_M = 7,86$  г/см<sup>3</sup>;

$T_{ПЛ}$  – температура плавления стали 08кп,  $T_{ПЛ} = 1530$  °С.

Ширина условной зоны нагрева металла пластины:

$$X_{ME}^{ПЛ} = 4\sqrt{a_M\tau_{СВ}} = 4 \cdot \sqrt{0,1 \cdot 0,6} = 0,98 \text{ см},$$

где  $a_M$  – коэффициент температуропроводности материала деталей, для стали 08кп  $a_M = 0,1$  см<sup>2</sup>/с [1];

$\tau_{СВ}$  – время сварки,  $\tau_{СВ} = 0,6$  с [2].

Энергия  $Q_{\text{МЕ}}^{\text{ПЛ}}$ , расходуемая на нагрев объема металла пластины, окружающего зону сварки, до средней температуры  $T_{\text{ПЛ}}/4$ , определялась как

$$Q_{\text{МЕ}}^{\text{ПЛ}} = k_1 \pi \delta_1 X_{\text{МЕ}}^{\text{ПЛ}} (d_{\text{Н}} + X_{\text{МЕ}}^{\text{ПЛ}}) c_{\text{М}} \gamma_{\text{М}} \frac{T_{\text{ПЛ}}}{4} =$$

$$= 0,8 \cdot 3,14 \cdot 0,3 \cdot 0,98 (1,6 + 0,98) 0,71 \cdot 7,86 \cdot 1530 / 4 = 4067 \text{ Дж},$$

где  $\pi \delta_1 X_{\text{МЕ}}^{\text{ПЛ}} (d_{\text{Н}} + X_{\text{МЕ}}^{\text{ПЛ}})$  – объем условного кольца нагрева металла пластины,  $\text{см}^3$ ;

$k_1$  – коэффициент, учитывающий, что действительная средняя температура кольца меньше  $T_{\text{ПЛ}}/4$ ,  $k_1 = 0,8$ .

Однако рельеф наружным диаметром совпадает с краем шляпки, поэтому теплоотвод через металл шляпки будет происходить не вокруг рельефа, а внутри его, т. е. по части объема металла шляпки в пределах внутреннего диаметра рельефа. При этом внутренний диаметр рельефа меньше, чем две ширины условного кольца нагрева, поэтому в расчетах теплоотвод будет происходить в пределах всего объема металла, ограниченного внутренним диаметром кольцевого рельефа.

Объем данного объема металла

$$V_{\text{МЕ}}^{\text{ШЛ}} = 0,25 \pi d_{\text{ВН}}^2 \delta_2 = 0,25 \cdot 3,14 \cdot 1,16^2 \cdot 0,6 = 0,634 \text{ см}^3.$$

Энергия  $Q_{\text{МЕ}}^{\text{ШЛ}}$ , расходуемая на теплоотвод в объем металла шляпки околошовной зоны при средней температуре  $T_{\text{ПЛ}}/4$ , определялась следующим образом:

$$Q_{\text{МЕ}}^{\text{ШЛ}} = k_1 V_{\text{МЕ}}^{\text{ШЛ}} c_{\text{М}} \gamma_{\text{М}} \frac{T_{\text{ПЛ}}}{4} = 0,8 \cdot 0,634 \cdot 0,71 \cdot 7,86 \frac{1530}{4} = 1083 \text{ Дж}.$$

Значит энергия, расходуемая на нагрев околошовной зоны при рельефной сварке пластины и шляпки болта, равна:

$$Q_{\text{МЕ}} = Q_{\text{МЕ}}^{\text{ПЛ}} + Q_{\text{МЕ}}^{\text{ШЛ}} = 4067 + 1083 = 5150 \text{ Дж}.$$

Область распространения тепла в электроды

$$Y_{\text{ЭЛ}} = 4 \sqrt{a_{\text{Э}} \tau_{\text{СВ}}} = 4 \cdot \sqrt{0,91 \cdot 0,6} = 2,96 \text{ см},$$

где  $a_{\text{Э}}$  – температуропроводность материала электродов, для хромовой бронзы БрХ-1  $a_{\text{Э}} = 0,91 \text{ см}^2/\text{с}$  (см. таблицу 2.1).

Потери тепла в верхний электрод

$$Q_{\text{эл}} = 2 \cdot k_2 S_{\text{э-д}} \gamma_{\text{эл}} c_{\text{эл}} \gamma_{\text{эл}} \frac{T_{\text{пл}}}{8} =$$

$$= 2 \cdot 1 \cdot 0,95 \cdot 2,96 \cdot 0,39 \cdot 8,9 \cdot 1530 / 8 = 3733 \text{ Дж},$$

где  $k_2$  – коэффициент формы электрода, для плоских электродов  $k_2 = 1$ ;

$c_{\text{эл}}$  – теплоемкость материала электродов, для хромовой бронзы БрХ-1  $c_{\text{эл}} = 0,39 \text{ Дж}/(\text{г} \cdot ^\circ\text{C})$  (см. таблицу 2.1);

$\gamma_{\text{эл}}$  – плотность материала электродов, для бронзы БрХ-1  $\gamma_{\text{эл}} = 8,9 \text{ г}/\text{см}^3$ .

Фактическая площадь контакта электродов с деталями, по которой преимущественно происходит теплоотвод, вычисляется по формуле

$$S_{\text{э-д}} = 0,25\pi(d_{\text{н}}^2 - d_{\text{вн}}^2) = 0,25 \cdot 3,14(1,6^2 - 1,16^2) = 0,95 \text{ см}^2.$$

Общее количество электрической энергии, необходимой для ввода в межэлектродную зону, находят следующим образом:

$$Q_{\text{ээ}} = Q_{\text{ст}} + Q_{\text{ме}} + Q_{\text{эл}} = 7298 + 5150 + 3733 = 16181 \text{ Дж}.$$

Далее по закону Джоуля – Ленца определяется действующее значение сварочного тока:

$$I_{\text{св}} = \sqrt{\frac{Q_{\text{ээ}}}{m_R \cdot 2r_{\text{дк}} \cdot \tau_{\text{св}}}} = \sqrt{\frac{16181}{1 \cdot 75 \cdot 10^{-6} \cdot 0,6}} = 18963 \text{ А} \approx 19 \text{ кА},$$

где  $2r_{\text{дк}}$  – сопротивление двух свариваемых деталей в момент выключения тока, для стали 08кп ( $\delta_1 = 3 \text{ мм}$ )  $2r_{\text{дк}} = r_{\text{ээк}} = 75 \text{ мкОм}$  (см. таблицу 2.3);

$m_R$  – коэффициент, учитывающий изменение  $r_{\text{ээ}}$  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  $m_R = 1,4$ .

### 4.3 Порядок выполнения работы

- 1 Выполнить задание по варианту, предложенному преподавателем.
- 2 Определить тип и размеры рельефа, нарисовать расчетную схему соединения для уравнения теплового баланса.
- 3 Определить общее количество электрической энергии для ввода в межэлектродную зону  $Q_{\text{ээ}}$  и действующее значение сварочного тока  $I_{\text{св}}$ .
- 4 Сделать выводы по результатам расчетов.

## 5 Практическое занятие № 5. Расчет параметров режима контактной шовной сварки конкретного изделия, разработка технологии его сборки и сварки

**Цель работы:** рассчитать параметры режима контактной шовной сварки изделия и разработать технологический процесс его изготовления.

### 5.1 Общие теоретические сведения

При контактной шовной сварке соединение свариваемых частей происходит между токоведущими вращающимися дисковыми электродами (роликами), передающими усилие сжатия (рисунок 5.1, а). Наибольшее распространение получила прерывистая шовная сварка (рисунок 5.1, б). При ее осуществлении импульсы сварочного тока чередуются с паузами. При протекании импульса сварочного тока длительностью  $\tau_{св}$  свариваемые детали нагреваются до температуры плавления  $T_{пл}$  и образуется зона расплавления шириной  $d$  и длиной  $l$  (рисунок 5.2). За время паузы  $\tau_{п}$  происходит ее кристаллизация.

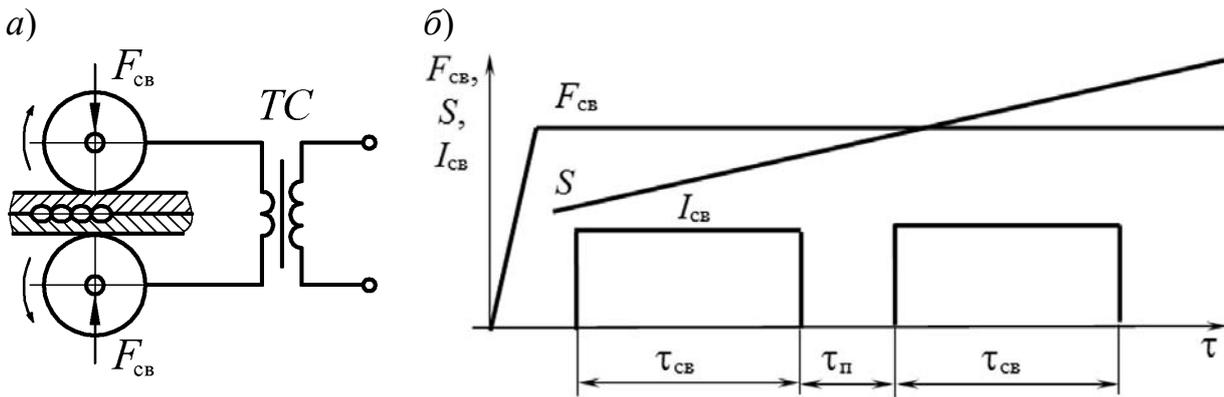


Рисунок 5.1 – Схема процесса контактной шовной сварки (а) и циклограмма процесса прерывистой сварки (б)

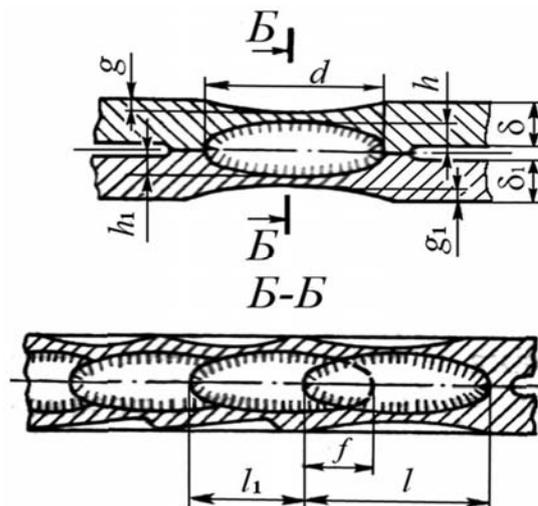


Рисунок 5.2 – Вид сварного соединения и его конструктивные элементы

Изменяя время  $\tau_{\text{п}}$ , можно получить соединение с шагом точек  $t_{\text{ш}} > l$ . Такое соединение не будет герметичным. При  $t_{\text{ш}} < l$  происходит перекрытие точек, образуется герметичный сварной шов. Такие швы необходимы для сварки герметичных емкостей (например, бензобаков, масляных баков и др.).

Минимальные размеры ширины зоны расплавления (литой зоны)  $d$  ограничивают из-за возможности появления различных дефектов и снижения стойкости электродов. Эти размеры определяются по ГОСТ 15878–79.

Другими конструктивными элементами соединения являются величина проплавления  $h_1$  ( $h$ ), глубина вмятины от электрода  $g_1$  ( $g$ ), величина перекрытия литых зон герметичного шва  $f$ , которая должна составлять не менее 25 % от длины литой зоны  $l$ .

## 5.2 Пример расчета

По [1] и ГОСТ 15878–79 *Контактная сварка. Соединения сварные. Конструктивные элементы* для толщины листа  $\delta = 1,5$  мм (сталь 12X18H10T) требуемую ширину литой зоны в результате сварки принимаем равной  $d_3 = 6$  мм.

В соответствии с этим ширина контактной поверхности ролика будет равна  $f_{\text{р}} = (0,9 \dots 1,2)d_3 = 1 \cdot 6 = 6$  мм.

Длину литой зоны принимаем  $l = (1,2 \dots 1,5)f_{\text{р}} = 1,3 \cdot 6 \approx 8$  мм. Так как требуется получить герметичный шов, то величина перекрытия точек должна составлять не менее 25 % от длины литой зоны,  $f = 0,25l = 0,25 \cdot 8 = 2$  мм.

Для обеспечения перекрытия точек принимаем шаг между точками  $t_{\text{ш}} = l_1 = l - f = 8 - 2 = 6$  мм.

Длительность протекания импульса тока принимаем как и для низкоуглеродистых сталей:  $\tau_{\text{св}} = 0,2$  с (см. таблицу 2.4). Длительность паузы между импульсами  $\tau_{\text{п}} = (1 \dots 2)\tau_{\text{св}}$ , принимаем  $\tau_{\text{п}} = 2 \cdot 0,2 = 0,4$  с [1].

Скорость сварки  $V_{\text{св}}$ , м/мин, в зависимости от шага точек  $t_{\text{ш}}$  с учетом требования их перекрытия определяется по формуле

$$V_{\text{св}} = 0,06t_{\text{ш}} / (\tau_{\text{св}} + \tau_{\text{п}}) = 0,06 \cdot 6 / (0,2 + 0,4) = 0,6 \text{ м/мин} = 10 \text{ мм/с},$$

где  $t_{\text{ш}}$  подставляется в формулу в миллиметрах, а  $\tau_{\text{св}}$  и  $\tau_{\text{п}}$  – в секундах.

Под расчетом параметров режима контактной шовной сварки подразумевается составление уравнения теплового равновесия зоны сварки с последующим расчетом требуемой энергии  $Q_{\text{ээ}}$ , необходимой для формирования качественного соединения, а также требуемой величины сварочного тока  $I_{\text{св}}$ .

Уравнение теплового равновесия зоны сварки следующее [1, 5, 6]:

$$Q_{\text{ээ}} = Q_{\text{пол}} + Q_{\text{м}} + Q_{\text{э}},$$

где  $Q_{\text{ээ}}$  – полная энергия, выделяемая на межэлектродном промежутке;

$Q_{\text{пол}}$  – энергия, затрачиваемая на нагрев и плавление центрального столбика металла (полезная энергия);

$Q_M$  – энергия, затрачиваемая на нагрев слоев металла, окружающих зону сварки;

$Q_{\text{Э}}$  – энергия, затрачиваемая на нагрев электродов.

Форма контура контактной поверхности верхнего и нижнего роликов прямоугольная, ширина контактной поверхности ролика  $f_P = 6$  мм, длина литой зоны  $l = 8$  мм. Количество теплоты  $Q_{\text{пол}}$ , необходимое для нагрева до температуры  $T_{\text{пл}}$  столбика металла из материала 12Х18Н10Т условной высотой  $\delta^1$ , вычислялось следующим образом:

$$Q_{\text{пол}} = (f_P \cdot l) \delta^1 \cdot c_M \cdot \gamma_M \cdot T_{\text{пл}} = (0,6 \cdot 0,8) 0,3 \cdot 0,54 \cdot 7,86 \cdot 1440 = 880 \text{ Дж},$$

где  $\delta^1$  – условная высота столбика металла, нагретого до температуры  $T_{\text{пл}}$ ,  $\delta^1 = 1,5 + 1,5 = 3$  мм = 0,3 см;

$c_M$  – теплоемкость материала (сталь 12Х18Н10Т),  $c_M = 0,54$  Дж/(г·°С);

$\gamma_M$  – плотность материала (сталь 12Х18Н10Т),  $\gamma_M = 7,86$  г/см<sup>3</sup>;

$T_{\text{пл}}$  – температура плавления материала (сталь 12Х18Н10Т),  $T_{\text{пл}} = 1440$  °С.

Ширина условной зоны нагрева металла

$$X_{\text{МЕ}} = 4\sqrt{a_M \tau_{\text{СВ}}} = 4 \cdot \sqrt{0,054 \cdot 0,2} = 0,42 \text{ см},$$

где  $a_M$  – коэффициент температуропроводности металла, для сплава 12Х18Н10Т  $a_M = 0,054$  см<sup>2</sup>/с (см. таблицу 2.1);

$\tau_{\text{СВ}}$  – длительность одного импульса тока,  $\tau_{\text{СВ}} = 0,2$  с.

Значение теплоты  $Q_M$ , расходуемой на нагрев металла, окружающего зону сварки, до средней температуры  $T_{\text{пл}}/4$ , определялось по формуле

$$\begin{aligned} Q_M &= V \cdot k_1 \cdot c_M \cdot \gamma_M \cdot T_{\text{пл}}/4 = \\ &= [(f_P + 2 \cdot X_{\text{МЕ}})(l + 2 \cdot X_{\text{МЕ}}) - f_P \cdot l] \delta^1 \cdot k_1 \cdot c_M \cdot \gamma_M \cdot T_{\text{пл}}/4 = \\ &= [(0,6 + 2 \cdot 0,42)(0,8 + 2 \cdot 0,42) - 0,6 \cdot 0,8] 0,3 \cdot 0,8 \cdot 0,54 \cdot 7,86 \cdot 1440/4 = 690 \text{ Дж}, \end{aligned}$$

где  $V$  – объем металла, окружающего зону сварки, нагреваемого до средней температуры  $T_{\text{пл}}/4$ , см<sup>3</sup>;  $V = [(f_P + 2 \cdot X_{\text{МЕ}})(l + 2 \cdot X_{\text{МЕ}}) - f_P \cdot l] \delta^1$ ;

$k_1$  – коэффициент, учитывающий, что действительная средняя температура кольца меньше  $T_{\text{пл}}/4$ ,  $k_1 = 0,8$ .

Область распространения тепла в электродные ролики находят по формуле

$$Y_{\text{ЭЛ}} = 4\sqrt{a_{\text{Э}} \cdot \tau_{\text{СВ}}} = 4\sqrt{1,06 \cdot 0,2} = 1,84 \text{ см},$$

где  $a_{\text{Э}}$  – температуропроводность материала электродов, для бронзы БрХЦр  $a_{\text{Э}} = 1,06$  см<sup>2</sup>/с (см. таблицу 2.1).

Минимальные потери тепла в верхний и нижний электродные ролики вычисляются по формуле

$$Q_{\text{Э}} = 2 \cdot S_{\text{Эд}} \cdot k_2 \cdot Y_{\text{Эл}} \cdot c_{\text{Э}} \cdot \gamma_{\text{Э}} \cdot T_{\text{Пл}} / 8 =$$

$$= 2 \cdot 0,48 \cdot 1 \cdot 1,84 \cdot 0,388 \cdot 8,92 \cdot 1440 / 8 = 1100 \text{ Дж},$$

где  $k_2$  – коэффициент формы ролика: при цилиндрическом ролике  $k_2 = 1$ , при коническом  $k_2 = 1,5$ , при сферическом  $k_2 = 2$ ; принимаем  $k_2 = 1$ ;

$c_{\text{Э}}$  – теплоемкость материала электродов (роликов), для бронзы БрХЦр  $c_{\text{Э}} = 0,388 \text{ Дж}/(\text{г} \cdot ^\circ\text{C})$ ;

$\gamma_{\text{Э}}$  – плотность материала роликов, для бронзы БрХЦр  $\gamma_{\text{Э}} = 8,92 \text{ г}/\text{см}^3$ ;

$S_{\text{Эд}}$  – площадь контакта ролика с узлом при формировании одной литой зоны,  $S_{\text{Эд}} = f_{\text{Р}} \cdot l = 0,6 \cdot 0,8 = 0,48 \text{ см}^2$ .

Общее количество выделившейся теплоты для одной литой зоны равно:

$$Q_{\text{ЭЭ}} = Q_{\text{Пол}} + Q_{\text{М}} + Q_{\text{Э}} = 880 + 690 + 1100 = 2670 \text{ Дж}.$$

По закону Джоуля – Ленца определяем действующее значение сварочного тока:

$$I_{\text{СВ}} = \sqrt{\frac{Q_{\text{ЭЭ}}}{m_{\text{R}} \cdot 2r_{\text{ДК}} \cdot \tau_{\text{СВ}}}} = \sqrt{\frac{2670}{1,2 \cdot 115 \cdot 10^{-6} \cdot 0,2}} = 9836 \text{ А} \approx 9,8 \text{ кА},$$

где  $2r_{\text{ДК}}$  – значение сопротивления межэлектродной зоны к концу процесса нагрева,  $2r_{\text{ДК}} = r_{\text{ЭЭК}} = 115 \text{ мкОм}$  (см. таблицу 2.3);

$m_{\text{R}}$  – коэффициент, учитывающий изменение  $r_{\text{ЭЭ}}$  в процессе протекания сварочного тока: для низкоуглеродистых сталей  $m_{\text{R}} = 1$ , коррозионно-стойких сталей  $m_{\text{R}} = 1,2$ , алюминиевых сплавов  $m_{\text{R}} = 1,15$ , сплавов титана  $m_{\text{R}} = 1,4$ .

С учетом 10 %...30 % потерь энергии на шунтирование величина требуемого сварочного тока для сварки узла составит:

$$I_{\text{СВ}}^{\text{ТР}} = 1,2 I_{\text{СВ}} = 1,2 \cdot 9836 = 11803 \text{ А} \approx 11,8 \text{ кА}.$$

### 5.3 Порядок выполнения работы

1 Выполнить задание по варианту, предложенному преподавателем.

2 Нарисовать расчетную схему соединения шовной сваркой для уравнения теплового баланса.

3 Определить общее количество электрической энергии для ввода в межэлектродную зону  $Q_{\text{ЭЭ}}$  и требуемое значение сварочного тока  $I_{\text{СВ}}^{\text{ТР}}$  с учетом потерь энергии на шунтирование.

4 Сделать выводы по результатам расчетов.

## 6 Практическое занятие № 6. Конструирование и расчет сварочного контура установок для контактной сварки

**Цель работы:** сконструировать и рассчитать сварочные контуры машин для контактной точечной, шовной рельефной или стыковой сварки.

### 6.1 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 6.1 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  $L_{НОМ}$  и раствор  $H_{НОМ}$  выбираются в зависимости от габаритов свариваемых деталей.  $P$  – давление, передаваемое электродам со стороны силового привода сжатия,  $U_1$  – напряжение на первичной обмотке сварочного трансформатора.

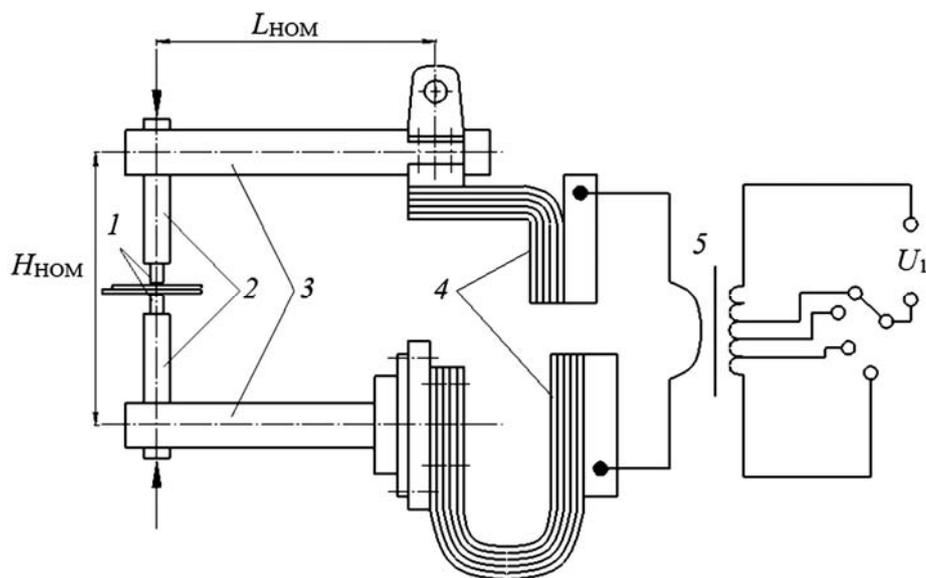


Рисунок 6.1 – Вторичный контур машины для контактной точечной сварки

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, их расход уменьшается в 6–8 раз (таблица 6.1) [4].

Таблица 6.1 – 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 БрХЦр 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 БрК1	0,9...1,2 Cd	0,0207	
Хромовая бронза БрХ	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 БрХЦр 0,6-0,05	0,03...0,08 Zr; 0,4...1,0 Cr	0,02	
Никелево-бериллиевая бронза БрНБТ	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
Кремненикелевая бронза БрКН1-4	3...4 Ni; 0,6...1 Si	0,05	Губки для сварки углеродистых, нержавеющей и жаропрочных сталей

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 расчетному длительному значению тока при ПВ = 100 %. В таблице 6.2 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

$$q_i = I_{2\text{дл}} / J_i, \quad (6.1)$$

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

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

$$I_{2\text{дл}} = I_{2\text{ном}} \cdot \sqrt{\frac{\text{ПВ}\%}{100}}, \quad (6.2)$$

где  $I_{2\text{НОМ}}$  – номинальный кратковременный вторичный ток.

Таблица 6.2 – Рекомендуемые плотности тока в элементах вторичного контура

Элемент вторичного контура	Материал или марка сплава	Условие охлаждения	Допустимая плотность тока $J$ , А/мм <sup>2</sup>	Удельное сопротивление при 20 °С $\rho$ , мкОм·м	Температурный коэффициент сопротивления $\alpha$ при 20 °С
Электроды	БрХЦр	Водяное интенсивное (внутреннее или наружное)	20...30	0,02...0,0376	0,003
	Бронза БрХ			0,021...0,0383	0,002...0,003
Электрододержатели	Бронза БрХ		30...50	0,032...0,058	0,002...0,003
	БрНБТ		10...20		
	БрКН		0,0435		
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		

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

$$I_{2\text{НОМ}} = I_{2\text{дл}} \cdot \sqrt{\frac{100}{\text{ПВ}\%}} \quad (6.3)$$

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

$$U_{20\text{НОМ}} = I_{2\text{НОМ}} \cdot Z_{\text{М}}, \quad (6.4)$$

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

$$Z_{\text{М}} = \sqrt{(r_{\text{ВК}} + r_{\text{T}} + r_{\text{ЭЭ}})^2 + (x_{\text{ВК}} + x_{\text{T}})^2}, \quad (6.5)$$

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

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

$r_{\text{T}}$  и  $x_{\text{T}}$  – 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).

Активное сопротивление отдельных элементов контура при 20 °С  $r_{Ai}$ , мкОм, находится по формуле

$$r_{Ai} = K_{\Pi} \cdot \rho_i \frac{l_i}{q_i}, \quad (6.6)$$

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;

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

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

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

$$r_{0i(1M)} = \rho_i \cdot 1/q_i; \quad (6.7)$$

– для массивных элементов (хоботы, шины, П- и Г-образные консоли, электродные плиты) – активное сопротивление постоянному току 100 м проводника (в микроомах):

$$r_{0i(100M)} = \rho_i 100/q_i. \quad (6.8)$$

Коэффициент поверхностного эффекта для массивных элементов контура рассчитывается в зависимости от параметра  $\sqrt{f/r_{0(100M)}}$  по одной из формул:

$$K_{\Pi} = 1 + 0,00327 \sqrt{\frac{f}{r_{0(100M)}}} \quad \text{при} \quad \sqrt{\frac{f}{r_{0(100M)}}} < 180; \quad (6.9)$$

$$K_{\Pi} = 0,25 + 0,0056 \sqrt{\frac{f}{r_{0(100M)}}} + \frac{8,37}{\sqrt{\frac{f}{r_{0(100M)}}}} \quad \text{при} \quad 180 < \sqrt{\frac{f}{r_{0(100M)}}} < 220; \quad (6.10)$$

$$K_{\Pi} = 0,277 + 0,0056 \sqrt{\frac{f}{r_{0(100M)}}} \quad \text{при} \quad 220 < \sqrt{\frac{f}{r_{0(100M)}}} < 1800, \quad (6.11)$$

где  $f$  – частота переменного сетевого напряжения,  $f = 50$  Гц.

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

Коэффициент поверхностного эффекта для немассивных элементов определяется в зависимости от критерия подобия  $P$  по графикам (рисунок 6.2).

$$P = 5 \sqrt{\frac{f}{r_0 \text{ (1 М)} \cdot 10^7}}. \quad (6.12)$$

Коэффициент поверхностного эффекта для немассивных элементов прямоугольного сечения определяется в зависимости от критерия подобия  $P$ , а также коэффициента формы  $K_\Phi$ , представленного на рисунке 6,2:

$$K_\Phi = b/a, \quad (6.13)$$

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

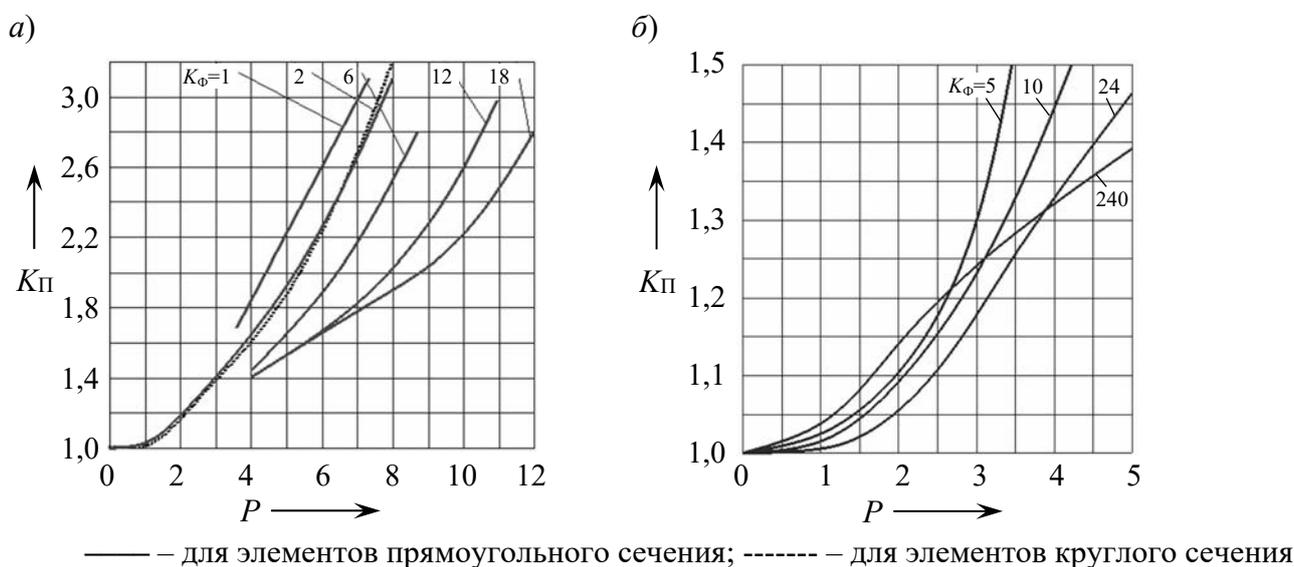


Рисунок 6.2 – Коэффициент поверхностного эффекта

После нахождения уточненного активного сопротивления всех элементов контура  $r_i$  по формуле (6.5) необходимо найти суммарное активное сопротивление всех элементов вторичного контура при комнатной температуре 20 °С (без учета активного сопротивления сварочного трансформатора и сопротивлений контактов):

$$r_A = \sum r_{Ai}. \quad (6.14)$$

Численные значения  $\rho_i$  материалов, применяемых для токопроводов различных элементов контура, приведены в таблицах 6.1 и 6.2. 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 °С:

$$r_{At} = r_A [1 + \alpha(t - t_{\text{охл}})], \quad (6.15)$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления;

$t_{\text{охл}}$  – температура охлаждающей среды,  $t_{\text{охл}} = 20$  °С.

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...2 мкОм, разъемного контакта «медь–медь» – 4...6 мкОм. Сопротивление подвижного скользящего контакта ролика при шовной сварке принимается 10...20 мкОм.

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

Активное сопротивление всех элементов вторичного контура с учетом переходных контактов составит

$$r_{BK} = r_{At} + r_K. \quad (6.16)$$

Приведенные активное  $r_T$  и индуктивное  $x_T$  сопротивления вторичной обмотки сварочного трансформатора принимаются согласно таблице «Трансформаторы контактных электросварочных машин» [5, приложение 4].

Индуктивное сопротивление вторичного контура  $x_{BK}$  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 по площади. Для этого используется следующая эмпирическая формула:

$$x_{BK} = S_{BK}^{0,73} \cdot 10^{-6} = (L_{\text{НОМ}} \cdot H_{\text{НОМ}})^{0,73} \cdot 10^{-6}, \quad (6.17)$$

где  $S_{BK}$  – площадь, охватываемая контуром, см<sup>2</sup>;

$L_{\text{НОМ}}$  – номинальный вылет электродов машины для контактной сварки – расстояние от осевой линии электродов до передней стенки машины;

$H_{\text{НОМ}}$  – номинальный раствор контактной машины – наименьшее расстояние между верхней и нижней консолями сварочного контура машины.

Полное сопротивление при коротком замыкании машины

$$Z_{\text{м.к.з.}} = \sqrt{(r_{BK} + r_T)^2 + (x_{BK} + x_T)^2}. \quad (6.18)$$

Максимальное значение сварочного тока при коротком замыкании

$$I_{2 \max} = \frac{U_{2 \text{НОМ}}}{Z_{\text{М.К.З.}}} \quad (6.19)$$

### 6.2 Пример расчета параметров вторичного контура машины

Рассчитать сварочный контур машины для контактной точечной сварки однофазной переменного тока: сетевое напряжение  $U_C = 380$  В, частота 50 Гц.

Параметры режима сварки деталей, принятых за номинальные:

- номинальный вторичный ток  $I_{2 \text{НОМ}} = 18\,000$  А;
- номинальный длительный вторичный ток  $I_{2 \text{ДЛ}} = 7000$  А;
- толщина свариваемых деталей из низкоуглеродистых сталей 4 + 4 мм;
- продолжительность включения ПВ = 15 %.

Конструктивные размеры вторичного (сварочного) контура машины представлены на рисунке 6.3. 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].

Минимально допустимые сечения элементов контура рассчитываются по формуле (6.1). Рекомендуемые плотности тока в элементах вторичного контура в зависимости от материала элемента и условий его охлаждения выбираются в соответствии с рекомендациями в таблице 6.2.

Для определения приближенного суммарного значения активного сопротивления вторичного контура прежде всего производим расчет каждой отдельной детали (см. рисунок 6.3).

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·м. Площадь поперечного сечения электродов:

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

Активное сопротивление постоянному току 1 м проводника определяется, исходя из формулы (6.7):

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



Критерий подобия  $P$  определяется по формуле (6.12):

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

По графику (см. рисунок 6.2, а) для  $P = 0,9$ ;  $K_{П1} = 1,02$ .

Активное сопротивление двух электродов при  $20^\circ\text{C}$  определяется, исходя из формулы (6.6):

$$r_{A1} = 2 \cdot K_{П1} \cdot \rho_1 \frac{l_1}{q_1} = 2 \cdot 1,02 \cdot 0,03 \frac{0,03}{200} = 9,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}.$$

2 Два электрододержателя 2 из бронзы БрХ с водяным охлаждением: диаметр  $d_2 = 25$  мм, расчетная длина  $l_2 = 110$  мм (прижаты к хоботам стальными прижимами), удельное электросопротивление  $\rho_2 = 0,03$  мкОм·м.

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

$$r_{02(1M)} = \rho_1 \frac{1}{q_1} = 0,03 \frac{1}{490} = 61 \cdot 10^{-6} \text{ Ом};$$

$$P = 5 \sqrt{\frac{f}{r_{02(1M)} \cdot 10^7}} = 5 \sqrt{\frac{50}{61 \cdot 10^{-6} \cdot 10^7}} = 1,43.$$

По графику (см. рисунок 6.2, а) для  $P = 1,43$ ;  $K_{П2} = 1,18$ .

Активное сопротивление двух электрододержателей при  $20^\circ\text{C}$ :

$$r_{A2} = 2 \cdot K_{П2} \cdot \rho_2 \frac{l_2}{q_2} = 2 \cdot 1,18 \cdot 0,0175 \frac{0,11}{490} = 9,3 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}.$$

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 (6.8):

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

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

Коэффициент поверхностного эффекта в этом случае определяется, исходя из формулы (6.11):

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

Активное сопротивление двух хоботов при 20 °С:

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

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:

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

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

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

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

Коэффициенты поверхностного эффекта в этом случае определяются, исходя из формул (6.11) и (6.10):

$$K_{\Pi 41} = 0,277 + 0,0056 \sqrt{\frac{f}{r_{041(100 \text{ М})}}} = 0,277 + 0,0056 \cdot 304 = 2;$$

$$K_{\Pi 42} = 0,25 + 0,0056 \sqrt{\frac{f}{r_{042(100 \text{ М})}}} + \frac{8,37}{\sqrt{\frac{f}{r_{041(100 \text{ М})}}}} = 0,25 + 0,0056 \cdot 213 + \frac{8,37}{213} = 1,48.$$

Активное сопротивление двух консолей при 20 °С:

$$r_{A41} = 2 \cdot K_{\Pi 41} \cdot \rho_4 \frac{l_{41}}{q_{41}} = 2 \cdot 2 \cdot 0,0175 \frac{0,12}{3216} = 2,6 \cdot 10^{-6} \text{ Ом};$$

$$r_{A42} = 2 \cdot K_{\Pi 42} \cdot \rho_4 \frac{l_{42}}{q_{42}} = 2 \cdot 1,48 \cdot 0,0175 \frac{0,062}{1590} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом};$$

$$r_{A4} = r_{A41} + r_{A42} = 2,6 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 10^{-6} = 4,6 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}.$$

5 Верхняя гибкая шина 5 (сечение IV) из меди МГМ (фольга) с воздушным охлаждением: расчетная длина  $l_5 = 235$  мм, удельное электросопротивление  $\rho_5 = 0,0175$  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  $K_{\Pi} = 1,6$  мм. Тогда активное сопротивление гибкой шины при 20 °С

$$r_{A5} = K_{\Pi 5} \cdot \rho_5 \frac{l_5}{q_5} = 1,6 \cdot 0,0175 \frac{0,235}{1200} = 5,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}.$$

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.

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

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

$$K_{\text{П6}} = 0,25 + 0,0056 \sqrt{\frac{f}{r_{06(100\text{ М})}}} + \frac{8,37}{\sqrt{\frac{f}{r_{06(100\text{ М})}}}} = 0,25 + 0,0056 \cdot 185 + \frac{8,37}{185} = 1,33;$$

$$r_{\text{A6}} = K_{\text{П6}} \cdot \rho_6 \frac{l_6}{q_6} = 1,33 \cdot 0,0175 \frac{0,244}{1200} = 4,7 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

7 Нижняя жесткая шина 7 подобна детали 6:  $l_7 = 150$  мм. Так же, как и для верхней жесткой шины,  $K_{\text{П7}} = 1,33$ .

Активное сопротивление верхней жесткой шины при  $20^\circ\text{C}$

$$r_{\text{A7}} = K_{\text{П7}} \cdot \rho_7 \frac{l_7}{q_7} = 1,33 \cdot 0,0175 \frac{0,15}{1200} = 2,9 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

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

$$r_{\text{A8}} = K_{\text{П8}} \cdot \rho_8 \frac{l_8}{q_8} = 1,6 \cdot 0,0175 \frac{0,32}{1200} = 7,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление всех элементов токопровода при  $20^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned} r_{\text{A}} &= r_{\text{A1}} + r_{\text{A2}} + r_{\text{A3}} + r_{\text{A4}} + r_{\text{A5}} + r_{\text{A6}} + r_{\text{A7}} + r_{\text{A8}} = \\ &= (9,2 + 9,3 + 7,3 + 4,6 + 5,5 + 4,7 + 2,9 + 7,5) \cdot 10^{-6} = 51 \text{ мкОм.} \end{aligned}$$

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

$$r_{\text{At}} = r_{\text{A}} [1 + \alpha(t - t_{\text{охл}})] = 51 [1 + 0,00392(80 - 20)] = 63 \text{ мкОм.}$$

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

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

Активное сопротивление всех элементов и переходных контактов вторичного контура:

$$r_{\text{BK}} = r_{\text{At}} + r_{\text{K}} = (63 + 28) 10^{-6} = 91 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

Ориентировочное значение индуктивного сопротивления вторичного контура определяем по рисунку 6.3 и формуле (6.17):

$$x_{\text{БК}} = S_{\text{БК}}^{0,73} \cdot 10^{-6} = 846^{0,73} \cdot 10^{-6} = 137 \cdot 10^{-6} \text{ Ом},$$

где  $S_{\text{БК}}$  – площадь, охватываемая контуром,  $S_{\text{БК}} = L_{\text{НОМ}} \cdot H_{\text{НОМ}} = 56,4 \cdot 15 = 846 \text{ см}^2$ .

В соответствии с [5, приложение 4] для однофазной машины переменного тока для контактной точечной сварки с номинальным вторичным током  $I_{2\text{НОМ}} = 18000 \text{ А}$  ориентировочно принимаем следующие значения приведенных активного и индуктивного сопротивлений трансформатора:  $r_{\text{T}} = 21 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$  и  $x_{\text{T}} = 21,4 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$  (машина для точечной сварки с радиальным ходом электродов МТР-2801).

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

Полное сопротивление контура  $Z_{\text{М}}$  при нагрузке по формуле (6.5):

$$\begin{aligned} Z_{\text{М}} &= \sqrt{(r_{\text{БК}} + r_{\text{T}} + r_{\text{ЭЭ}})^2 + (x_{\text{БК}} + x_{\text{T}})^2} = \\ &= \sqrt{[(91 + 21 + 69,5)10^{-6}]^2 + [(137 + 21,4)10^{-6}]^2} = 241 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Номинальное значение вторичного напряжения холостого хода сварочного трансформатора  $U_{20 \text{НОМ}}$  по формуле (6.4):

$$U_{20 \text{НОМ}} = I_{20 \text{НОМ}} \cdot Z_{\text{М}} = 18000 \cdot 241 \cdot 10^{-6} = 4,3 \text{ В}.$$

Полное сопротивление при коротком замыкании машины, исходя из формулы (6.18):

$$\begin{aligned} Z_{\text{М.К.З.}} &= \sqrt{(r_{\text{БК}} + r_{\text{T}})^2 + (x_{\text{БК}} + x_{\text{T}})^2} = \\ &= \sqrt{[(91 + 21) \cdot 10^{-6}]^2 + [(137 + 21,4) \cdot 10^{-6}]^2} = 194 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Максимальное значение сварочного тока при коротком замыкании, исходя из формулы (6.19):

$$I_{2 \text{max}} = \frac{U_{2\text{НОМ}}}{Z_{\text{М.К.З.}}} = \frac{4,3}{194 \cdot 10^{-6}} = 22165 \text{ А} = 22,2 \text{ кА}.$$

Ниже приведены другие примеры сварочных контуров машин для контактной точечной (рисунок 6.4), рельефной (рисунок 6.5) и шовной (рисунок 6.6) сварки [7].

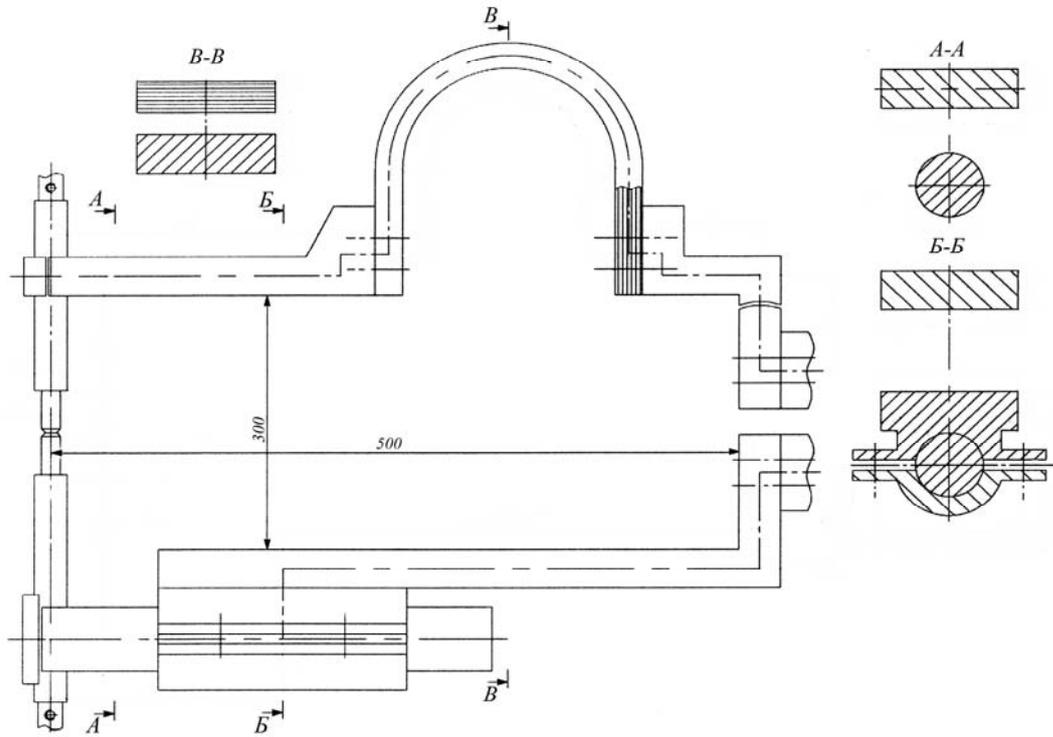


Рисунок 6.4 – Сварочный контур машины для контактной точечной сварки

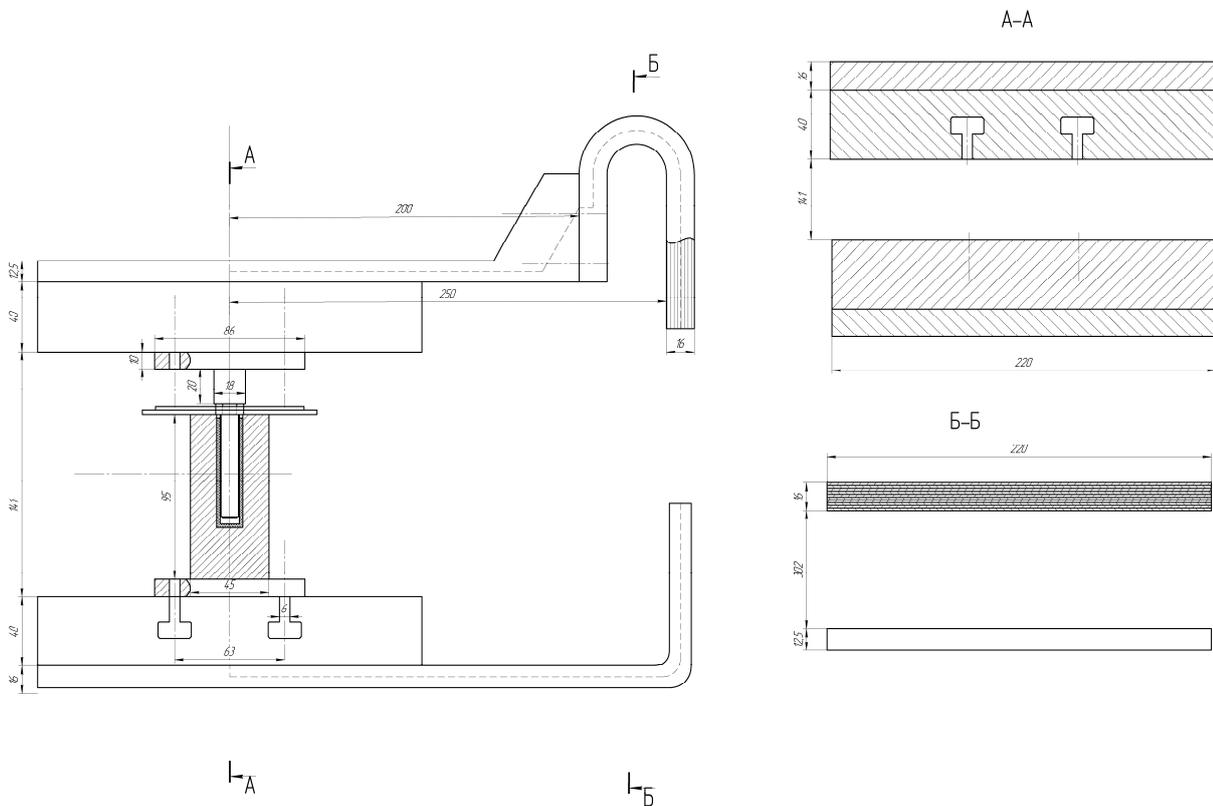


Рисунок 6.5 – Сварочный контур машины для контактной рельефной сварки

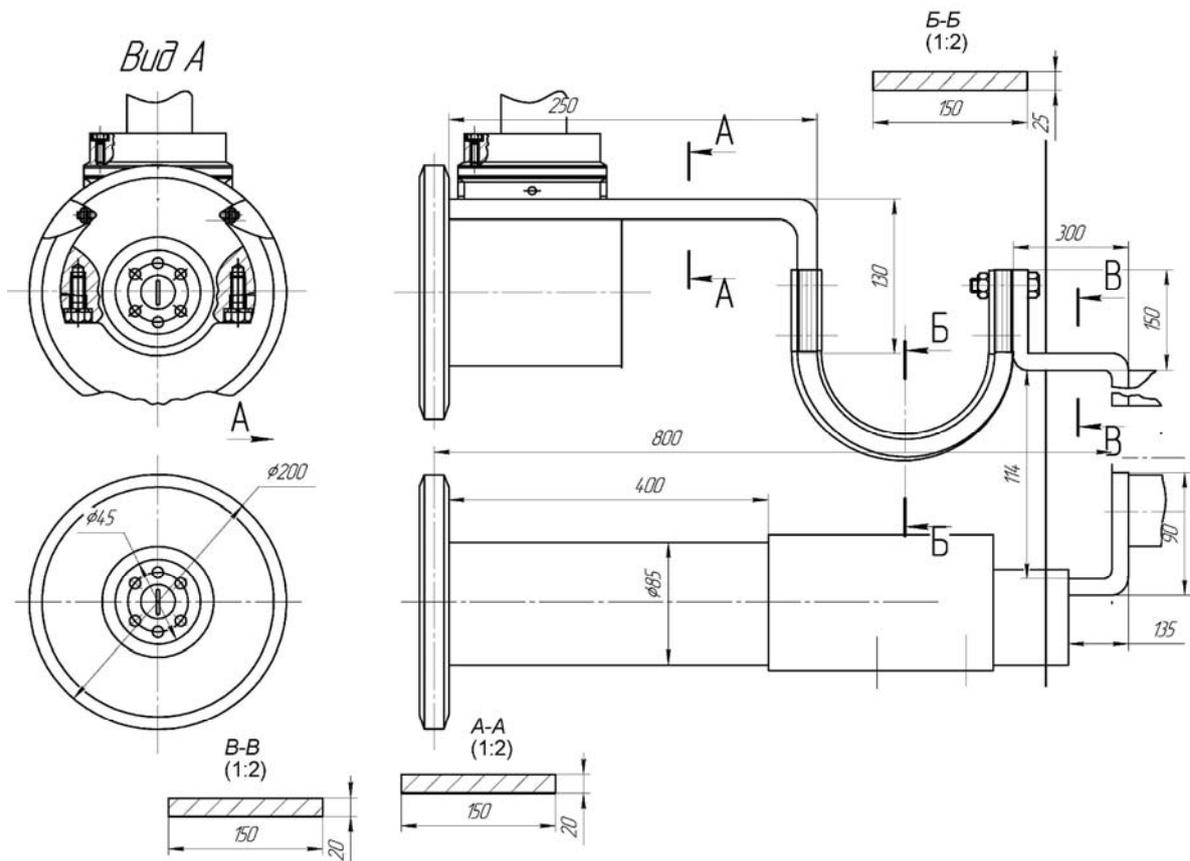


Рисунок 6.6 – Сварочный контур машины для контактной шовной сварки

### **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. – Москва: Изд-во стандартов, 1979. – 11 с.
- 3 **Марочник сталей и сплавов / А. С. Зубченко [и др.]; под общ. ред. А. С. Зубченко.** – Москва: Машиностроение, 2003. – 784 с.
- 4 **Слиозберг, С. К.** Электроды для контактной сварки / С. К. Слиозберг, П. Л. Чулошников. – Ленинград: Машиностроение, 1972. – 96 с.
- 5 **Рыськова, З. А.** Трансформаторы для электрической контактной сварки / З. А. Рыськова, П. Д. Федоров, В. И. Жемерева. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1990. – 423 с.
- 6 **Катаев, Р. Ф.** Технология конструкционных материалов: теория и технология контактной сварки : учебное пособие / Р. Ф. Катаев, В. С. Милютин, М. Г. Близник; под науч. ред. М. П. Шалимова. – Москва: Юрайт; Екатеринбург: Урал. ун-т, 2017. – 146 с.
- 7 **Оборудование для контактной сварки: справочное пособие / Под ред. В. В. Смирнова.** – Санкт-Петербург: Энергоатомиздат, 2000. – 848 с.
- 8 **Фурманов, С. М.** Пути совершенствования термомодеформационных циклов контактной точечной и рельефной сварки: монография / С. М. Фурманов. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2019. – 267 с.