

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра
«Оборудование и технология сварочного производства»

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ СВАРКИ ДАВЛЕНИЕМ

*Методические указания к самостоятельной работе для студентов
специальности 1-36 01 06 «Оборудование и технология сварочного
производства» заочной формы обучения*



Содержание

	Стр.
1. Цель и содержание контрольной работы	4
2. Общие сведения о контактной сварке	4
3. Задача. Расчет параметров режима точечной сварки	5
4. Пример решения задачи	11
5. Список литературы.....	12

1. Цель и содержание контрольной работы

Целью контрольной работы является изучение студентами дисциплины «Технология и оборудование сварки давлением», получение знаний в области технологии контактной точечной и рельефной сварки различных материалов, оценки их свариваемости, выбора и расчета основных параметров режима сварки. Контрольная работа состоит из решения одной задачи. Вариант задания определяется по списку группы.

2. Общие сведения о контактной сварке.

При **контактной точечной сварке** свариваемые детали сжимают усилием $F_{св}$ при помощи электродов, к которым подключена вторичная обмотка сварочного трансформатора ТС (рис. 1, а). Детали нагреваются протекающим сварочным током до образования зоны взаимного расплавления, называемой ядром сварного соединения. Нагрев зоны сварки сопровождается пластической деформацией металла межэлектродной зоны. Вокруг ядра сварного соединения (сварной точки) образуется уплотняющий пояс, предохраняющий жидкий металл от выплеска и взаимодействия с окружающим воздухом. Когда расплавленный металл достигает заданного объема, сварочный ток выключается, металл сварной точки кристаллизуется. После приложения усилия проковки $F_{ков}$ электроды разжимаются.

При **контактной рельефной сварке** соединение деталей происходит на отдельных участках по заранее подготовленным выступам (рельефам) (рис. 1, б). На поверхности одной из деталей предварительно формируют рельеф, который ограничивает начальную площадь контакта деталей. При нагреве металл рельефа деформируется. На определенной стадии протекания тока формируется ядро, как и при точечной сварке. Обычно сварка осуществляется при наличии нескольких рельефов. После прохождения тока получают одновременно несколько сварных точек.

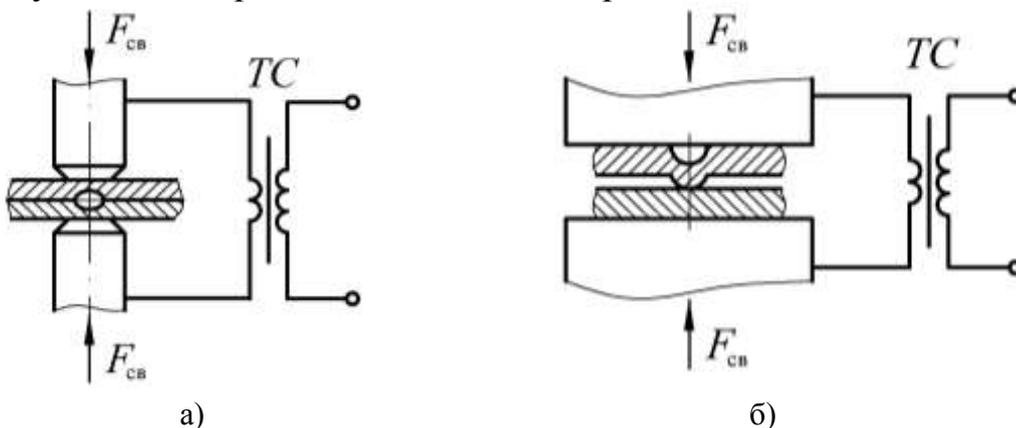


Рис. 1. Разновидности контактной сварки: а – точечная; б – рельефная

Точечная и рельефная сварка чаще всего применяется для соединения деталей внахлестку. При точечной сварке обязательным условием является получение литого ядра, диаметр $d_я$ которого является основным параметром соединения. Минимальный диаметр литого ядра $d_я$ регламентируется стандартами. Ориентировочно минимальные размеры $d_я$ можно определить по формуле $d_я = 2\delta + 3$, где δ – толщина свариваемых деталей (мм).

3. Задача. Расчет параметров режима точечной сварки.

Выберите и рассчитайте основные параметры режима контактной точечной сварки:

- форма и размеры электродов;
 - время протекания сварочного тока $\tau_{\text{СВ}}$;
 - величина сварочного тока $I_{\text{СВ}}$;
 - сварочное усилие $F_{\text{СВ}}$;
 - ковочное усилие $F_{\text{КОВ}}$;
 - время приложения ковочного усилия $\tau_{\text{КОВ}}$;
- Исходные данные к задаче даны в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные к решению задачи

<i>Вариант</i>	<i>δ, мм</i>	<i>$d_э$, мм</i>	<i>Материал деталей</i>	<i>Материал электродов</i>
1	0,5	4	Низкоуглеродистая сталь 08кп	БрОЦ-4,5-3 (бронза)
2	1	5		
3	1,5	7		
4	2	8		
5	3	10		
6	4	12		
7	5	14		
8	6	16		
9	0,5	4	Среднеуглеродистая сталь 30ХГСА	БрБ2 (бронза)
10	1	5		
11	1,5	7		
12	2	8		
13	2,5	9		
14	3	10		
15	0,5	4	Коррозионно-стойкая сталь 12Х18Н10Т	БрОФ-6,5-0,5 (бронза)
16	1	5		
17	1,5	7		
18	2	8		
19	2,5	9		
20	3	10		
21	0,5	4	Титановый сплав ОТ4	БрОЦ-4,5-3 (бронза)
22	1	5		
23	1,5	7		
24	2	8		
25	2,5	9		
26	3	10		
27	0,5	4	Алюминиевый сплав Д16АТ	БрБ2 (бронза)

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

$$Q_{\Sigma\Sigma} = Q_1 + Q_2 + Q_3, \quad (1)$$

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

Q_1 – энергия, затрачиваемая на нагрев до температуры плавления $T_{\text{пл}}$ столбика металла высотой 2δ и диаметром основания, равным диаметру контакта электрод–деталь d_{Σ} (рисунок 1), Дж;

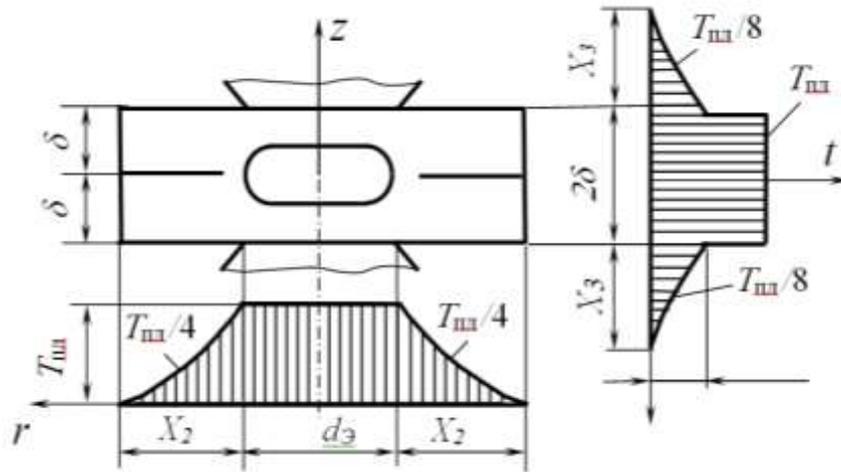


Рисунок 1 – Расчетная схема нагрева металла при точечной сварке

Q_2 – теплота, расходуемая на нагрев металла в виде окружающего ядро кольца шириной $x_2 = 4\sqrt{a_M \tau_{\text{св}}}$. Среднюю температуру кольца принимают равной $T_{\text{пл}}/4$, Дж;

Q_3 – потери теплоты в электроды, которые учитываются нагревом условного цилиндра высотой $x_3 = 4\sqrt{a_{\Sigma} \tau_{\text{св}}}$ до средней температуры, равной $T_{\text{пл}}/8$, Дж.

$$Q_1 = 2\delta c_M \gamma_M (\pi d_{\Sigma}^2/4) T_{\text{пл}}; \quad (2)$$

$$Q_2 = 2k_1 \pi X_2 (d_{\Sigma} + X_2) \delta c_M \gamma_M (T_{\text{пл}}/4); \quad (3)$$

$$Q_3 = 2k_2 (\pi d_{\Sigma}^2/4) X_3 c_{\Sigma} \gamma_{\Sigma} (T_{\text{пл}}/8), \quad (4)$$

где 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 $k_2 = 2$;

$\gamma_M, \gamma_{\Sigma}$ – плотность свариваемого металла и материала электрода соответственно, г/см³;

c_M, c_{Σ} – теплоемкость свариваемого металла и материала электрода соответственно, Дж/(г·°C);

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

δ – толщина свариваемого металла, см ;

$T_{\text{пл}}$ – температура плавления материала свариваемой детали, $^{\circ}\text{C}$;

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

Теплофизические характеристики наиболее распространенных конструкционных материалов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Некоторые теплофизические характеристики материалов

Материал	$\gamma, \text{г}/\text{см}^3$	$c, \text{Дж}/(\text{г}\cdot^{\circ}\text{C})$	$a, \text{см}^2/\text{с}$	$T_{\text{пл}}, ^{\circ}\text{C}$
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

Сварочный ток рассчитывают по закону Джоуля-Ленца:

$$I_{\text{св}} = \sqrt{\frac{Q_{\text{ээ}}}{m_r 2r_{\text{дк}} \tau_{\text{св}}}}, \quad (5)$$

где $Q_{\text{ээ}}$ – количество теплоты, рассчитанное по формулам (2), (3) и (4);

$2r_{\text{дк}}$ – сопротивление двух свариваемых деталей в момент выключения сварочного тока, $2r_{\text{дк}} = r_{\text{ээ}}$; на практике $r_{\text{ээ}}$ может быть также определено опытным путем при сварке образцов: для точечной сварки низкоуглеродистой стали толщиной от 1 до 7 мм по таблице 3, для некоторых металлов и сплавов по таблице 4;

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

$\tau_{\text{св}}$ – время протекания сварочного тока определяют по эмпирическим формулам или таблицам рекомендованных режимов сварки, например, с использованием рекомендаций [1 – 3] (таблица 5).

Таблица 3 – Величина $r_{\text{ээ}}$ при точечной сварке низкоуглеродистой стали

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

Таблица 4 – Величина сопротивления $r_{\text{Э}}$ при контактной сварке металлов и сплавов в момент выключения сварочного тока

Материал	$r_{\text{Э}} \cdot 10^{-6}$, Ом (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

Таблица 5 – Основные параметры режима контактной точечной сварки низкоуглеродистых сталей

Толщина металла δ , мм	Время протекания сварочного тока $\tau_{\text{св}}$, с	Сварочное усилие $F_{\text{св}}$, кН	Ковочное усилие $F_{\text{ков}}$, кН	Время проковки $\tau_{\text{ков}}$, с	Минимальный 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

Режимы точечной сварки характеризуются также формой и размерами рабочих поверхностей электродов. Могут применяться электроды со сферической (радиусом $R_{\text{Э}}$) и конической (диаметром контактной поверхности $d_{\text{к}}$) рабочими поверхностями (таблица 6).

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 термометформационный цикл сварки.

Таблица 6 – Рекомендуемые размеры электродов, мм

Толщина детали	Размеры электродов		
	$D_э$	$d_э$	$R_э$
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 ρ_0 и теплопроводность λ в значительной степени определяют жесткость режима сварки. При малых ρ_0 и большой λ выбирают жесткий режим. Такой режим применяется при сварке алюминиевых и магниевых сплавов, меди и её сплавов. Для сварки коррозионно-стойких сталей, имеющих большое ρ_0 и невысокую λ , 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.

Низкоуглеродистые стали имеют низкую чувствительность к термическому циклу и выплескам, успешно свариваются на мягких и на жестких режимах. Наиболее часто применяют две циклограммы: с постоянным сварочным усилием и с повышенным ковочным усилием (рисунок 2).

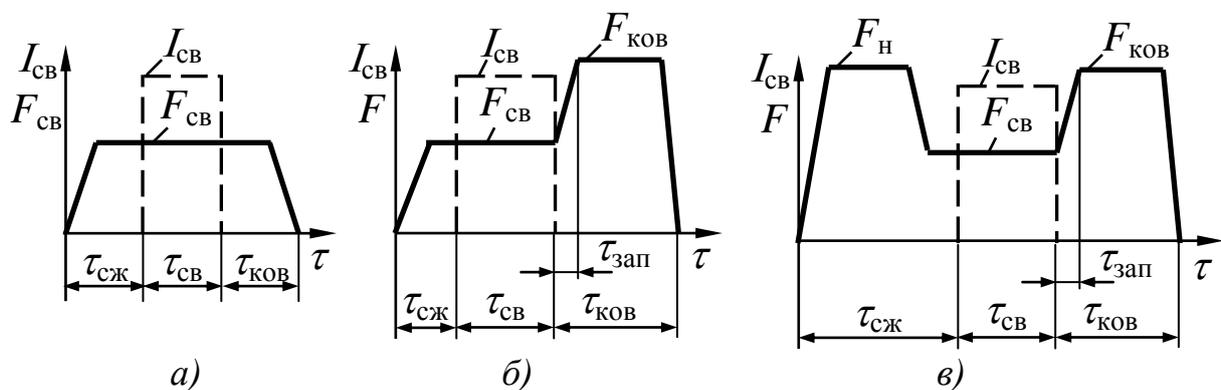


Рисунок 2 – Циклограммы процессов точечной сварки: а – с постоянным усилием сжатия; б – с повышенным ковочным усилием; в – с предварительным сжатием и ковочным усилием

Среднеуглеродистые стали обладают более высокими ρ_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.

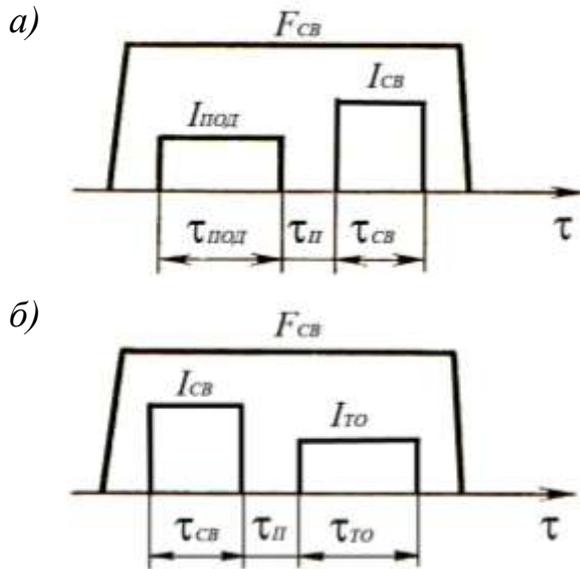


Рисунок 3 – Циклограммы процесса сварки с предварительным подогревом (а) и последующей термообработкой (б)

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 3, а) или последующая термообработка (рисунок 3, б).

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

$$\tau_{под} = \tau_{то} = (1,5 \dots 1,8) \tau_{св};$$

$$\tau_{III} = (1,1 \dots 1,5) \tau_{св};$$

$$I_{под} = I_{то} = (0,7 \dots 0,8) I_{св}.$$

При сварке сталей толщиной свыше 2 + 2 мм часто применяют циклограмму процесса с увеличенным ковочным усилием и тремя импульсами тока.

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 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 др. 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 ρ_0 и малой λ . 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 (XH75МБТЮ, ХН70Ю, ХН38ВТ и др.), а также сплавы повышенной жаропрочности (ХН70ВМТЮФ, ХН56ВМТЮ и др.) отличаются большим ρ_0 и невысокой λ . Поэтому сва-

рочный 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 рисунке 2, а и б. Применяются электродные материалы с повышенной твердостью (до 240 МПа).

Титановые сплавы имеют высокое ρ_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, а.

Алюминиевые и магниевые сплавы характеризуются малым ρ_0 , большой λ и высоким коэффициентом линейного расширения α . Поверхность алюминиевых сплавов покрыта тугоплавкой пленкой окислов, которую перед сваркой необходимо удалять. Сварку выполняют на жестких режимах электродами со сферической поверхностью. Применяется циклограмма с повышенным ковочным усилием (см. рисунок 2, б).

4. Пример решения задачи

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, c_M для стали 0,67 Дж/(г·°С), $c_Э$ для меди 0,38 Дж/(г·°С); γ_M для стали 7,8 г/см³, $\gamma_Э$ для меди 8,9 г/см³; a_M для стали 0,09 см²/с, $a_Э$ для меди 0,8 см²/с. Сопротивление листов к концу процесса сварки $r_{ЭЭ} = 58$ мкОм.

$$Q_1 = 2\delta c_M \gamma_M (\pi d_Э^2/4) T_{пл} = 2 \cdot 0,4 \cdot 0,67 \cdot 7,8 \cdot (3,14 \cdot 1,2^2/4) \cdot 1500 = 7092 \text{ Дж} \approx 7 \text{ кДж}$$

$$Q_2 = 2k_1 \pi X_2 (d_Э + X_2) \delta c_M \gamma_M (T_{пл}/4) = 2 \cdot 0,8 \cdot 3,14 \cdot 1,2 \cdot (1,2 + 1,2) \cdot 0,4 \cdot 0,67 \cdot 7,8 \cdot 1500/4 = 11348 \text{ Дж} \approx 11,3 \text{ кДж}$$

$$X_2 = 4\sqrt{a_M \tau_{CB}} = 4\sqrt{0,09 \cdot 1} = 1,2 \text{ см}$$

$$Q_3 = 2k_2 (\pi d_Э^2/4) X_3 c_Э \gamma_Э (T_{пл}/8) = 2 \cdot 1,5 \cdot (3,14 \cdot 1,2^2/4) \cdot 3,6 \cdot 0,38 \cdot 8,9 \cdot 1500/8 = 7745 \text{ Дж} \approx 7,7 \text{ кДж}$$

$$x_3 = 4\sqrt{a_Э \tau_{CB}} = 4\sqrt{0,8 \cdot 1} = 3,6 \text{ см}$$

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

$$I_{CB} = \sqrt{\frac{Q_{ЭЭ}}{m_r \cdot 2r_{ДК} \cdot \tau_{CB}}} = \sqrt{\frac{26000}{1 \cdot 58 \cdot 10^{-6} \cdot 1}} = 21172 \text{ А} \approx 21 \text{ кА}$$

5. Список литературы

1. **Орлов, Б. Д.** Технология и оборудование контактной сварки : учебник для вузов / Б. Д. Орлов, А. А. Чакалев, Ю. В. Дмитриев ; под ред. Б. Д. Орлова. – М. : Машиностроение, 1986. – 352 с. : ил.

2. **Березиенко, В. П.** Основы технологии современных способов сварки давлением : учеб. пособие / В. П. Березиенко. – Могилев : ММИ, 1994. – 98 с.

3. Оборудование для контактной сварки: справ. пособие / Под ред. В. В. Смирнова. – СПб. : Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отд-е, 2000. – 848 с.