

УДК 621.791.763.2

Поляков А. Ю., Фурманов С. М., Бендик Т. И.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ ПАКЕТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В литературных источниках приведены методики расчета основных параметров режима контактной точечной сварки на основе уравнения теплового баланса зоны сварки [1, 2, 3]. Долгое время считалось, что данные методики применимы к процессу рельефной сварки из-за его значительной схожести с процессом точечной сварки. Уравнение теплового равновесия зоны сварки имеет тот же вид, но применительно к рельефной сварке необходимо учитывать изменение площади контакта электродов с деталями и геометрическую форму рельефа.

При рельефной сварке пакетных соединений, когда количество свариваемых деталей пакета может составлять более 3 штук, например, при сварке арматурных и замочно-скобяных изделий из низкоуглеродистых сталей и пакетов из электротехнических сплавов и алюминия, применение данных зависимостей ограничено, так как в данном случае значительно ухудшается стабильность протекания процесса сварки [4]. Под ухудшением стабильности процесса подразумевается изменение форм кривых действующих значений сварочного тока I_{CB} , напряжения $U_{ЭЭ}$ и сопротивления $R_{ЭЭ}$ межэлектродного промежутка, что, в свою очередь, негативно сказывается на ходе формирования литой зоны сварного соединения. При этом, помимо влияния общеизвестных возмущающих зону сварки воздействий, характер деформирования рельефов в значительной степени зависит от инерционности привода сжатия контактной машины, повышенного начального холодного сопротивления контактов, теплофизических свойств материала деталей и электродов и др. В таких условиях на производстве обычно экспериментально определяют требуемые параметры режима сварки пакета из конкретного количества деталей, а при вынужденном изменении количества деталей осуществляется многократное повторение экспериментов в заводской лаборатории [5].

Целью данной работы является разработка методики расчета основных параметров режима рельефной сварки пакетных соединений с различным количеством деталей.

Актуальность темы исследований соответствует «Приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 гг.» в области разработки высокоэффективных ресурсосберегающих технологий контактной точечной и рельефной сварки.

Авторами статьи была разработана методика расчета параметров режима рельефной сварки пакетных соединений на основе использования критерия технологического подобия K . Критерий технологического подобия K – это отношение эффективной энергии зоны сварки к энергии тепловых потерь. Этот критерий, введенный Кочергиным К. А., связывал для точечной сварки практически все параметры режима и характеристики металла [6]. Согласно принципу подобия, процессы должны быть подобны, если их критерии одинаковы. Соответственно, если допустить, что для каких-либо деталей из определенного материала хорошо отработан оптимальный режим, характеризуемый определенным критериальным значением K , то это же значение K определит такие же оптимальные режимные показатели для других деталей, совершенно различающихся по толщине. Данное предположение было подтверждено экспериментальными исследованиями и теоретическим расчетом режимов точечной сварки двух деталей для низкоуглеродистой стали, титана, дюралюминия, стали 1X18H10T [6]. Однако не существовало формул критерия, которые позволили бы быстро и точно рассчитать длительность протекания сварочного тока τ_{CB} и его величину I_{CB} при значительном изменении количества свариваемых деталей пакета n , толщины δ и материала деталей как для рельефной, так и для точечной сварки.

Разработанная нами методика включает следующие этапы:

1) расчет уравнения теплового равновесия зоны рельефной сварки трех деталей определенной толщины [1, 2];

2) определение полной энергии зоны сварки и ее составляющих согласно уравнению баланса, т. е. $Q_{ЭЭ}$, $Q_{ПОЛ}$ и $Q_{ПОТ}$, по формулам традиционных методик, адаптированным нами для рельефной сварки пакетных соединений:

$$Q_{ПОЛ} = 0,25 \times \pi \times d_P^2 \times n \times \delta \times c_M \times \gamma_M \times T_{ПЛ} \text{ (Дж)}; \quad (1)$$

$$Q_M = n \times \delta \times k_1 \times \pi \times \sqrt{a_M \times \tau_{СВ}} \times (d_P + 4 \times \sqrt{a_M \times \tau_{СВ}}) \times c_M \times \gamma_M \times T_{ПЛ} \text{ (Дж)}; \quad (2)$$

$$Q_{ЭЛ} = 0,25 \times k_2 \times \pi \times d_{ЭЛ-Д}^2 \times \sqrt{a_{ЭЛ} \times \tau_{СВ}} \times c_{ЭЛ} \times \gamma_{ЭЛ} \times T_{ПЛ} \text{ (Дж)}. \quad (3)$$

3) вычисление критерия K как формульное отношение полезной энергии зоны сварки к энергии тепловых потерь:

а) для сварки по одному выштампованному круглому рельефу:

$$K = \frac{0,25 \times n \times \delta \times d_P^2 \times c_M \times \gamma_M}{(n \times \delta \times \sqrt{a_M \times \tau_{СВ}} \times (d_P + 4 \times \sqrt{a_M \times \tau_{СВ}}) \times K_1 \times c_M \times \gamma_M) + \frac{0,25 \times n \times \delta \times d_P^2 \times c_M \times \gamma_M}{(0,25 \times K_2 \times d_{ЭЛ-Д}^2 \times \sqrt{a_{ЭЛ} \times \tau_{СВ}} \times c_{ЭЛ} \times \gamma_{ЭЛ})}} \text{ (перенос)} \quad (4)$$

б) для сварки по трем выштампованным круглым рельефам:

$$K = \frac{0,75 \times n \times \delta \times d_P^2 \times c_M \times \gamma_M}{(3 \times n \times \delta \times \sqrt{a_M \times \tau_{СВ}} \times (d_P + 4 \times \sqrt{a_M \times \tau_{СВ}}) \times K_1 \times c_M \times \gamma_M) + \frac{0,75 \times n \times \delta \times d_P^2 \times c_M \times \gamma_M}{(0,25 \times K_2 \times d_{ЭЛ-Д}^2 \times \sqrt{a_{ЭЛ} \times \tau_{СВ}} \times c_{ЭЛ} \times \gamma_{ЭЛ})}} \text{ (перенос)} \quad (5)$$

в) для сварки по одному кольцевому рельефу:

$$K = \frac{4 \times n \times \delta \times c_M \times \gamma_M \times (D_P^2 - d_P^2)}{(n \times \delta \times K_1 \times c_M \times \gamma_M \times (16 \times D_P \times \sqrt{a_M \times \tau_{СВ}} + 16 \times a_M \times \tau_{СВ} + d_P^2) + \frac{4 \times n \times \delta \times c_M \times \gamma_M \times (D_P^2 - d_P^2)}{(4 \times K_2 \times d_{ЭЛ-Д}^2 \times \sqrt{a_{ЭЛ} \times \tau_{СВ}} \times c_{ЭЛ} \times \gamma_{ЭЛ})}} \text{ (перенос)} \quad (6)$$

г) для сварки по одному рельефу продолговатой четырехугольной формы:

$$K = \frac{16 \times b \times l \times n \times \delta \times c_M \times \gamma_M}{(n \times \delta \times K_1 \times c_M \times \gamma_M \times (\pi \times l^2 + 16 \times \pi \times l \times \sqrt{a_M \times \tau_{СВ}} + \frac{16 \times b \times l \times n \times \delta \times c_M \times \gamma_M}{16 \times \pi \times a_M \times \tau_{СВ} - 4 \times b \times l}) + (4 \times K_2 \times d_{ЭЛ-Д}^2 \times \sqrt{a_{ЭЛ} \times \tau_{СВ}} \times c_{ЭЛ} \times \gamma_{ЭЛ})} \text{ (перенос)} \quad (7)$$

где n – количество деталей пакета, шт.;

δ – толщина детали пакета, см;

d_p – диаметр выштампованного рельефа, см;

$d_{ЭЛ-Д}$ – диаметр контакта плоского электрода и детали, см;

$a_{ЭЛ}$ – коэффициент температуропроводности материала электродов, см²/с;

c_M – теплоемкость материала свариваемых деталей, Дж/(г×°С);

γ_M – плотность материала деталей, г/см³;

a_M – коэффициент температуропроводности металла деталей, см²/с;

$\tau_{СВ}$ – длительность протекания сварочного тока (варьирующаяся величина для каждого случая сварки различного числа деталей пакета);

K_1 – коэффициент, учитывающий, что действительная средняя температура условного кольца нагрева меньше $T_{пл}/4$;

K_2 – коэффициент формы электрода;

$c_{ЭЛ}$ – теплоемкость материала электродов, Дж/(г×°С);

$\gamma_{эл}$ – плотность материала электродов, г/см³;

D_p – внешний диаметр кольцевого выштампованного рельефа, см;

d_p – внутренний диаметр кольцевого выштампованного рельефа, см;

b – ширина продолговатого четырехугольного выштампованного рельефа, см;

l – длина продолговатого четырехугольного выштампованного рельефа, см.

4) расчет требуемой длительности протекания сварочного тока $\tau_{СВ}$ для любого количества деталей пакета n по известному критерию K для конкретного материала деталей пакета (низкоуглеродистая сталь, электротехническая сталь, алюминий);

5) экспериментальное определение значения сопротивления межэлектродной зоны $R_{ЭЭ}$ в момент выключения сварочного тока для конкретного пакета деталей;

б) расчет требуемой величины сварочного тока $I_{СВ}$ по закону Джоуля – Ленца в соответствии с выбранным значением длительности его протекания $\tau_{СВ}$.

Было предположено, что процентная доля полезной энергии и энергии тепловых потерь в общем тепловыделении в зоне сварки при увеличении количества деталей не изменятся, т. е. значения энергии и ее составляющих должны увеличиваться пропорционально увеличению количества деталей. Чтобы проверить данное предположение, на основании теоретически и экспериментально установленных ранее оптимальных значений длительности протекания сварочного тока $\tau_{СВ}$ для случаев сварки двух и трех деталей, равных 0,28 с и 0,48 с, был рассчитан критерий технологического подобия K . Расчет показал, что $K_1 = 0,068$ и $K_2 = 0,068$ для обоих случаев, т. е. при изменении количества деталей пакета на одну соотношение полезной энергии и энергии потерь не изменилось. Соответственно, зная величину критерия, по вышеуказанным формулам можно выразить и определить требуемую длительность протекания сварочного тока $\tau_{СВ}$ для конкретного количества деталей пакета n при различных формах и количестве рельефов. Если выразить величину $\tau_{СВ}$ в общем виде для случая сварки одновременно по трем круглым выштампованным рельефам, то зависимость примет довольно сложный вид:

$$\tau_{СВ} = \frac{\left[\sqrt{(3 \times K_1 \times n \times \delta \times d_p \times c_M \times \gamma_M \times \sqrt{a_M} + 0,25 \times K_2 \times d_{ЭЛ-Д}^2 \times c_{ЭЛ} \times \gamma_{ЭЛ} \times \sqrt{a_{ЭЛ}})^2 + 2304 \times K_1^2 \times n^2 \times \delta^2 \times a_M^2 \times c_M^2 \times \gamma_M^2} \right.}{\left. \sqrt{+(36 \times K_1 \times n^2 \times \delta^2 \times d_p^2 \times c_M^2 \times \gamma_M^2 \times a_M \times K) - 3 \times K_1 \times n \times \delta \times d_p \times c_M \times \gamma_M \times \sqrt{a_M}} \right]^2}{2304 \times K_1^2 \times n^2 \times \delta^2 \times a_M^2 \times c_M^2 \times \gamma_M^2} \quad (c). \quad (8)$$

Для конкретного матеріала і товщини деталей формули значительно упрощаються при подстановке в них постійних величин і коефіцієнтів, наприклад, для пакетів из низкоуглеродистой стали при товщині листа $\delta = 2$ мм і сварке одночасно по трьох круглих виштампованих рельєфам формула розрахунку виможуваної тривалості протікання сварочного току τ_{CB} в залежності от кількості деталей пакета n виглядає наступним образом:

$$\tau_{CB} = \frac{\left[\sqrt{\left(0,387 + \frac{8,57}{n}\right)^2 + 11} - \left(0,387 + \frac{8,57}{n}\right) \right]^2}{4} \quad (9)$$

Соответственно, для низкоуглеродистой стали были рассчитаны требуемые значения длительности протекания сварочного тока τ_{CB} для пакетов из 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 и 10-ти деталей (табл. 1).

Таблица 1

Теоретический расчет длительности протекания сварочного тока τ_{CB} по критерию технологического подобия K

n , шт	τ_{CB} , с	$Q_{ПОЛ}$, Дж	$Q_{ПОТ}$, Дж	$Q_{ЭЭ}$, Дж	$K = Q_{ПОЛ}/Q_{ПОТ}$
2	0,28	611	8975	9586	0,068
3	0,48	916	13339	14256	
4	0,64	1222	17871	19093	
5	0,83	1527	22367	23894	
6	0,96	1833	26786	28618	
7	1,08	2138	31430	33568	
8	1,17	2444	35825	38269	
9	1,25	2749	40301	43051	
10	1,32	3055	44810	47865	

Весь расчет проводили для случая одновременной сварки по трем рельефам в связи со значительными трудностями при проведении экспериментов по сварке по одному рельефу (большое шунтирование тока при перекосах деталей и т. д.).

С помощью созданной ранее экспериментальной установки на основе устройства сбора данных *NATIONAL INSTRUMENTS* и программной среды *LABVIEW* были определены оптимальные значения усилия сжатия электродов, которые обеспечивают требуемые рассчитанные нами значения полной энергии в зоне сварки при расчетной длительности протекания тока. И эти же значения позволили определить требуемые величины сварочного тока и сопротивления межэлектродной зоны в момент выключения сварочного тока (табл. 2) (сварка по трем рельефам одновременно).

Таблица 2

Экспериментально определенные требуемые значения усилия сжатия электродов F_{CB} , сопротивления межэлектродной зоны пакетов $R_{ЭЭ}$ и сварочного тока I_{CB} в конце процесса сварки

n , шт	τ_{CB} , с	F_{CB} , кН	$Q_{ЭЭ}$, Дж	$R_{ЭЭ}$, мкОм	I_{CB} , кА
2	0,28	4,5	10000	70	22,6
3	0,48	5,5	14500	84	19
4	0,64	6,1	19000	105	16,8
5	0,83	6,6	23500	110	16

Усилие сжатия электродов F_{CB} оказывает влияние на характер нарастания импульса сварочного тока и, соответственно, на остальные параметры режима сварки (табл. 3, рис. 1).

Таблица 3

Влияние усилия сжатия электродов F_{CB} на другие параметры режима сварки

n , шт	τ_{CB} , с	F_{CB} , кН	Позиция регулятора по I_{CB}	$Q_{ЭЭ}$, кДж	$R_{ЭЭ}$, мкОм	I_{CB} , кА	$P_{ЭЭ}$, кВт
3	0,48	4,1	2	15	110	17	37,5
		5,1		14,5	100	17,5	35
		6,1		13,9	100	17	35
		7,1		16	100	18,25	37,5
		4,1	4	18	110	19,5	45
		5,1		17,5	92	20	50
		6,1		16,75	92	19,5	45
		7,1		18,5	75	22,7	45

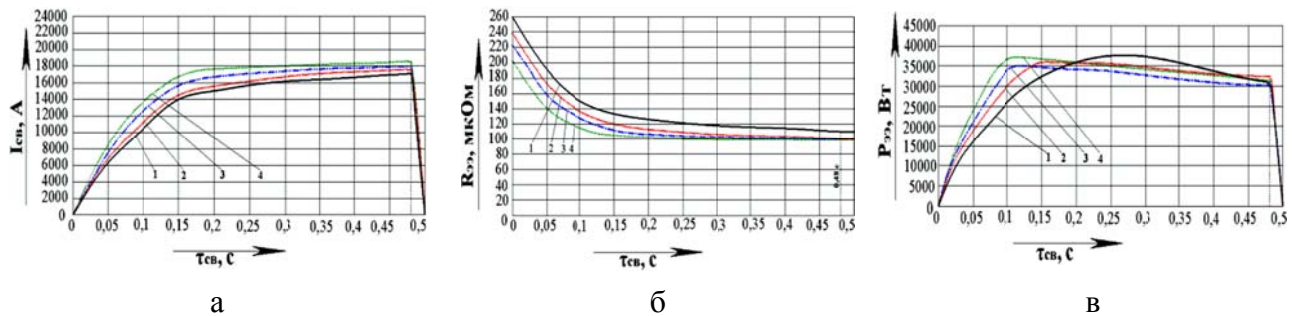


Рис. 1. Влияние усилия сжатия электродов F_{CB} на нарастание импульса тока I_{CB} (а), сопротивление межэлектродной зоны $R_{ЭЭ}$ (б) и полную мощность зоны сварки $P_{ЭЭ}$ (в):

1 – $F_{CB} = 4,1$ кН; 2 – $F_{CB} = 5,1$ кН; 3 – $F_{CB} = 6,1$ кН; $F_{CB} = 7,1$ кН (позиция «2» регулятора по I_{CB})

На примере сварки пакетов из четырех пластин показано влияние формы нарастания импульса I_{CB} на энергетические характеристики процесса (рис. 2).

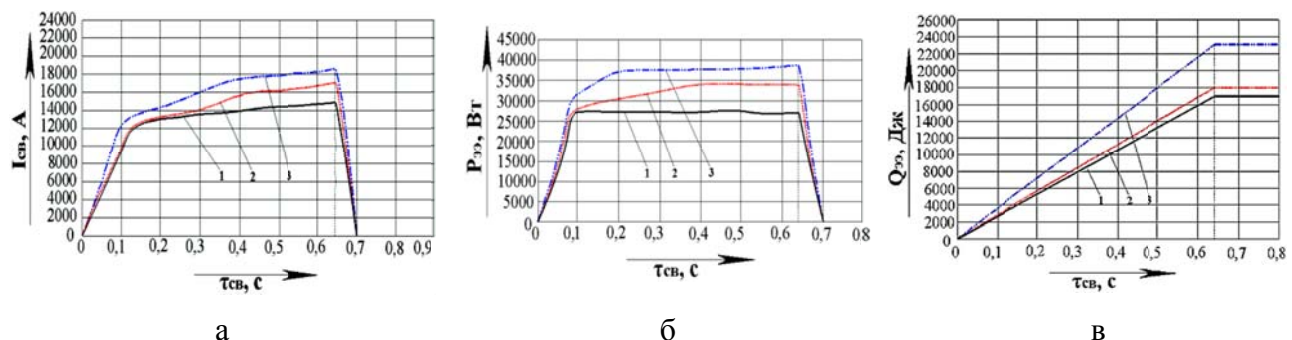


Рис. 2. Влияние формы нарастания импульса I_{CB} (а) на полную мощность $P_{ЭЭ}$ (б) и полную энергию $Q_{ЭЭ}$ (в) зоны сварки:

1 – позиция «0» регулятора цикла сварки РКС – 801; 2 – позиция «1»; 3 – позиция «2»

На рис. 3 приведены макрошлифы рельефных пакетных соединений из трех и четырех пластин, полученных при сварке на различных режимах (контактная машина МТ 3201).

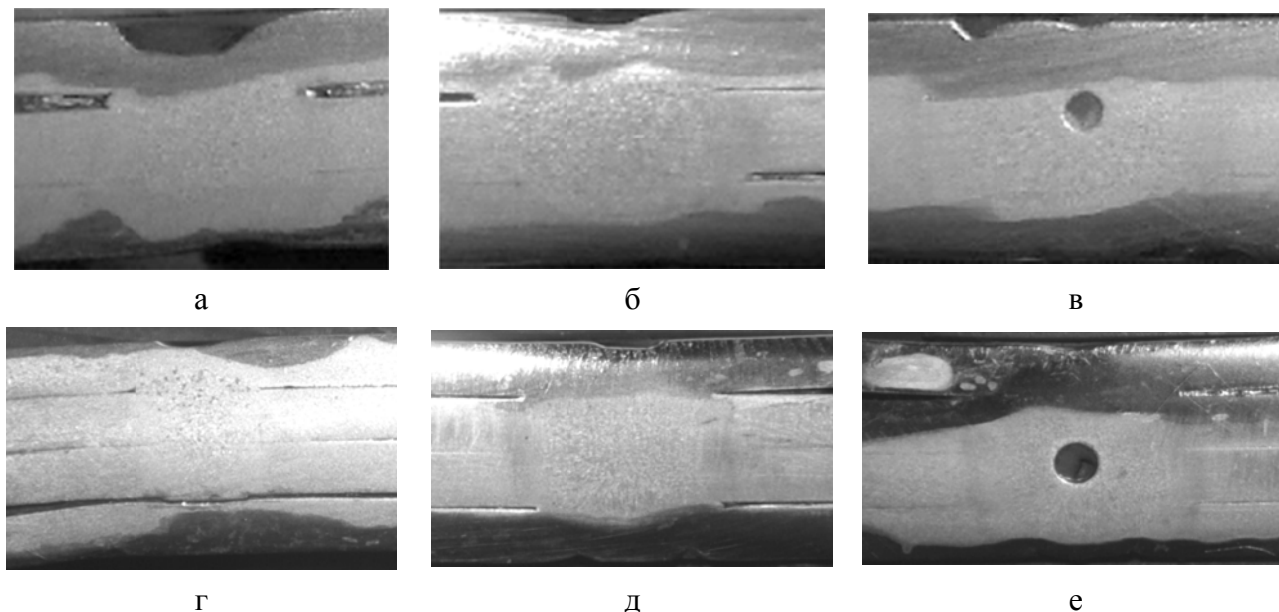


Рис. 3. Макрошлифы рельефных пакетных соединений из трех и четырех пластин: а – 3 детали при $F_{CB} = 4,5$ кН; б – 3 детали при $F_{CB} = 5,5$ кН; в – 3 детали при $F_{CB} = 6,1$ кН; г – 4 детали при $I_{CB} = 15$ кА; д – 4 детали при $I_{CB} = 16,8$ кА; е – 4 детали при $I_{CB} = 18$ кА

На макрошлифах (рис. 2, б, д), соответствующих расчетным режимам сварки, четко просматривается наличие общей литой зоны для всех соединяемых деталей пакета и отсутствуют дефекты типа «непровар» (рис. 2, а, г) или «пора» при выплесках расплавленного металла (рис. 2, в, е), что подтверждает достоверность разработанной авторами статьи методики расчета основных параметров режима рельефной сварки пакетных соединений.

ВЫВОДЫ

Разработана методика расчета параметров режима рельефной сварки пакетных соединений на основе использования критерия технологического подобия.

На основании данной методики установлены оптимальные значения сварочного тока и длительности его протекания при рельефной сварке пакетов из трех, четырех и пяти деталей из низкоуглеродистой стали. Проведены металлографические исследования пакетных соединений, полученных при сварке на расчетных режимах, которые подтверждают адекватность разработанной методики.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гельман А. С. *Технология и оборудование контактной сварки* / А. С. Гельман. – М. : Машиностроение, 1960. – 368 с.
2. *Технология и оборудование контактной сварки* : учеб. для маш. вузов / [Б. Д. Орлов и др.] ; под общ. ред. Б. Д. Орлова. – М. : Машиностроение, 1986. – 352 с.
3. Березиенко В. П. *Технология сварки давлением* / В. П. Березиенко, С. Ф. Мельников, С. М. Фурманов. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2009. – 256 с.
4. Поляков А. Ю. *О формировании ступенчатых соединений при контактной рельефной сварке* / А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, Т. И. Бендик // *Вестник Белорусско-российского университета*. – 2011. – № 4. – С. 62–69.
5. Подола Н. В. *Рельефная сварка многослойных пакетов из электротехнической стали* / Н. В. Подола, В. Д. Щеглов // *Автоматическая сварка*. – 1975. – № 10. – С. 51–55.
6. Кочергин К. А. *Контактная сварка* / К. А. Кочергин. – Л. : Машиностроение, 1987. – 240 с.