

DOI: 10.24412/2077-8481-2026-1-13-22

УДК 621.791.763.2

С. В. БОЛОТОВ, канд. техн. наук, доц.

Д. Н. ЮМАНОВ, канд. техн. наук

П. А. ПРУДНИКОВ

Е. П. НИКИТЕНКО

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КОНТАКТНОЙ РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ НАХЛЕСТОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОТЕРМОДЕФОРМАЦИОННЫМ ЦИКЛОМ

Аннотация

Представлены результаты исследований по разработке энергоэффективной технологии контактной рельефной сварки нахлесточных соединений со сферическим рельефом в диапазоне толщин 2...3 мм из низкоуглеродистых сталей. Качество сварного соединения с применением энергосберегающих режимов сварки достигается путем использования разработанной установки на основе машины контактной сварки МТ-1617, обеспечивающей управление энергией, выделяемой в межэлектродной зоне.

Экспериментально установлены зависимости между основными параметрами режима контактной рельефной сварки и усилием на срез сварных соединений, а также диаметром литого ядра сварной точки. Исследования потребляемой из сети энергии машиной контактной сварки на предложенных режимах подтверждают энергоэффективность разработанной технологии сварки при обеспечении стабильности прочностных характеристик сварных соединений.

Ключевые слова:

контактная рельефная сварка, нахлесточные соединения, технология контактной сварки, установка, программное управление, энергия межэлектродной зоны.

Для цитирования:

Энергоэффективная технология контактной рельефной сварки нахлесточных соединений с программным управлением электротермодеформационным циклом / С. В. Болотов, Д. Н. Юманов, П. А. Прудников, Е. П. Никитенко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2026. – № 1 (90). – С. 13–22.

Введение

На ведущих промышленных предприятиях основные параметры режима контактной точечной сварки нахлесточных соединений принимаются по рекомендациям многолетней давности, которые определялись опытно-экспериментальным путем в контексте обеспечения прочности соединений и отсутствия дефектов типа «непровар», но без оценки энергоемкости процесса сварки. В то время на фоне отсутствия на многих предприятиях сварочных машин достаточной мощности в попытках обеспечения соответствия диаметра сварной точки ГОСТ 15878–79 основные параметры

режима контактной сварки характеризовались пониженными значениями величины сварочного тока и повышенными значениями длительности его протекания (термин «мягкие режимы сварки»). Такие режимы, как правило, не обеспечивают требуемый диаметр сварных точек и высокую прочность соединений, особенно при минимально возможной энергоемкости процесса сварки.

Операторы контактных машин и сегодня ошибочно и необоснованно задают длительность протекания импульса сварочного тока «с запасом», но этим не влияют на рост сварной точки, а лишь увеличивают теплоотвод из межэлект-

родной зоны и энергопотребление сварочной машины. Ситуация осложнена отсутствием графических зависимостей параметров тепловложения в межэлектродную зону (мощности и энергии) от силы сварочного тока, длительности протекания импульса тока, усилия сжатия электродов, что не позволяет определить оптимальную величину тока по закону Джоуля – Ленца с учетом динамики изменения сопротивления межэлектродной зоны. Снижение тепловложения в межэлектродную зону относительно расчетной величины по уравнению теплового баланса даже на 5 % даст возможность обеспечивать прочность рельефных сварных соединений за счет получения общих неразъемных твердофазных зон металла деталей, чередующихся с зонами взаимного расплавления металла. Учитывая суммарное количество сварных точек, например, приходящихся на один кузов легкового автомобиля (более 5000), при сварке каждой точки экономия даже 5 % от величины электроэнергии, потребляемой сварочной контактной машиной, позволит получить существенный экономический эффект и снизить себестоимость изготовления единицы продукции [1, 2].

Современные регуляторы контактной сварки, управляя сварочными машинами по жестким программам со стабилизацией параметров, не обладают адаптивностью к характеру и величине многих возмущающих воздействий. В свою очередь, создание систем автоматического программного управления циклом сварки позволяет не только обеспечивать точное воспроизведение режима сварки с контролем основных параметров, но и дает возможность более достоверной оценки энергопотребления процессов контактной сварки за счет учета дополнительных параметров процесса. Использование компьютерного управления позволяет генерировать новые законы регулирования, которые в дальнейшем могут применяться при построении серийных контроллеров контактной сварки [3].

Таким образом, данная работа является весьма актуальной, и ее успешная реализация позволит разработать теоретические и технологические основы повышения энергоэффективности контактной сварки в целом для последующего внедрения на предприятиях Республики Беларусь.

Основная часть

Технология контактной рельефной сварки нахлесточных соединений с обеспечением энергоэффективности предполагает использование циклограммы процесса с одним импульсом сварочного тока $I_{св}$. Предварительный подогрев сварного соединения благоприятно сказывается на его механических характеристиках, однако в данном случае применение нескольких импульсов тока будет повышать потребление электрической энергии контактной сварочной машиной [4]. Для обеспечения требуемых механических характеристик используется повышенное ковочное усилие $F_{ков}$ после приложения импульса тока. Также для сварки нахлесточных соединений со сферическим рельефом представляется возможность получать сварные соединения с требуемым уровнем качества при постоянном усилии сжатия электродов $F_{св}$. На основании анализа рекомендаций, а также проведения экспериментальных исследований определены оптимальные параметры режима для нахлесточных соединений со сферическим рельефом (табл. 1).

Получение сварных соединений с обеспечением энергоэффективности процесса на стандартном оборудовании затруднительно, т. к. требуется более гибко и точно задавать параметры цикла сварки. Для этой цели была разработана установка для реализации программного управления электротермодеформационным циклом контактной рельефной сварки. Структурная схема установки представлена на рис. 1 [5–8].

Табл. 1. Рекомендуемые параметры режима контактной рельефной сварки нахлесточных соединений с обеспечением энергоэффективности процесса

Толщина образцов, мм	Сила сварочного тока $I_{св}$, кА	Усилие сжатия электродов при сварке $F_{сж}$, атм.	Время протекания импульса тока $\tau_{св}$, с
2 + 2	9...13,5	3,5	0,2...0,28
2,5 + 2,5	10...14	3,5	0,22...0,32
3 + 3	10...16	3,0	0,28...0,4

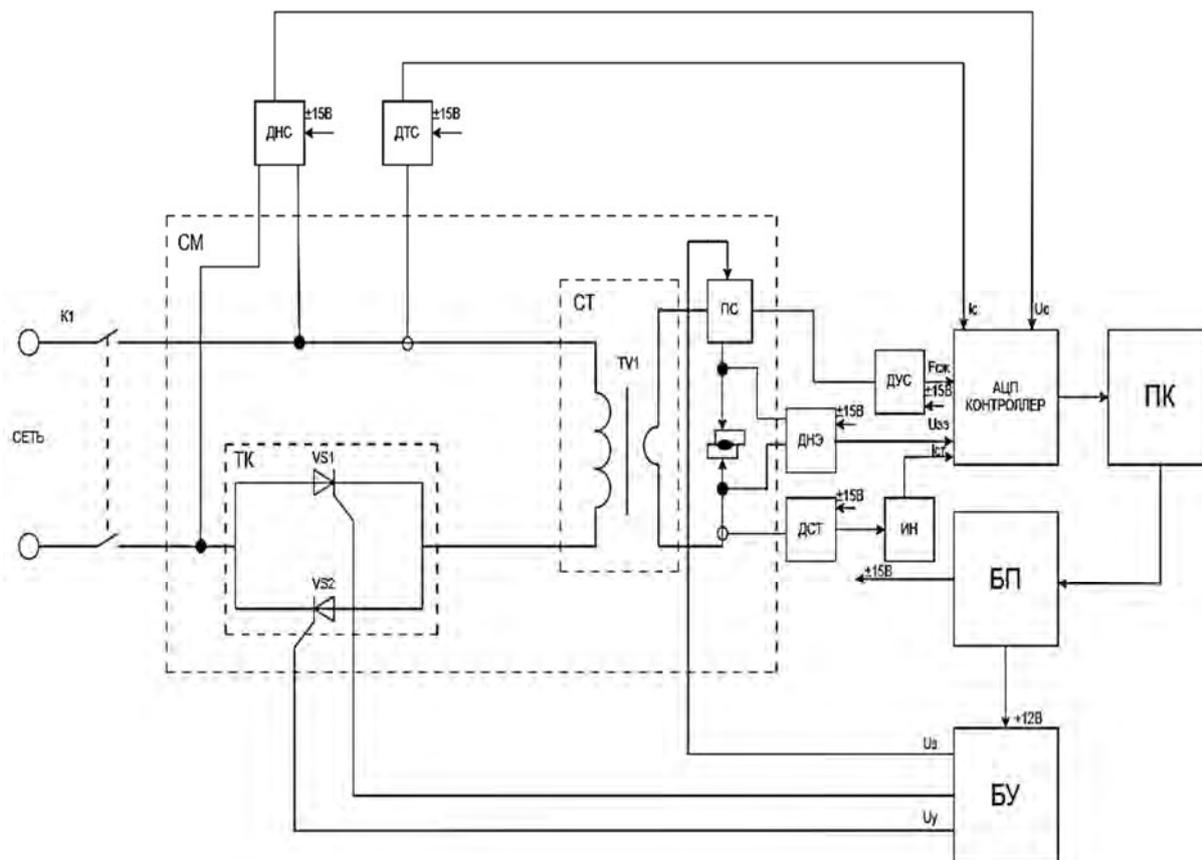


Рис. 1. Структурная схема установки для программного управления электротермодеформационным циклом контактной рельефной сварки: ДНС – датчик напряжения сети; ДТС – датчик тока сети; ДУС – датчик усилия сжатия электродов; ДНЭ – датчик напряжения между электродами; ДСТ – датчик сварочного тока; ИН – интегрирующий усилитель; СМ – сварочная машина; ТК – тиристорный контактор; СТ – сварочный трансформатор; ПС – привод сжатия электродов; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ПК – персональный компьютер; БУ – блок управления; БП – блок питания

Питание установки осуществляется от сети переменного тока 380 В, 50 Гц через контактор К. Изменение напряжения $U_{ЭЭ}$ на выходе сварочного трансформатора (СТ), а следовательно, и сварочного тока $I_{св}$ производится за счет изменения угла открытия тиристорного контактора (ТК), расположенного в первичной цепи СТ сварочной машины

(СМ), от блока управления (БУ). В качестве сварочной машины использована однофазная машина переменного тока МТ-1617. Привод сжатия (ПС) обеспечивает основное усилие сжатия электродов $F_{сж}$. Сигналы с датчика напряжения сети (ДНС), датчика тока сети (ДТС), датчика усилия сжатия электродов (ДУС), датчика напряжения

между электродами (ДНЭ) и датчика сварочного тока (ДСТ) поступают на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП) контроллера, который передает их в цифровом виде на персональный компьютер (ПК), на котором установлена управляющая программа в среде LabVIEW. Блок управления (БУ) выполнен в виде отдельного устройства и обеспечивает управление тиристорным контактором (ТК) сварочной машины (СМ) и приводом сжатия (ПС). Блок питания (БП) обеспечивает постоянным напряжением +12 В блок управления (БУ) и двухполярным напряжением ± 15 В датчики. В качестве АЦП использован контроллер STM32F102.

Блоки ДНС и ДТС предназначены для измерения напряжения U_C и тока I_C в сети, питающей сварочную машину. В качестве датчика напряжения используется датчик напряжения компенсационный ДНК-С, работающий на эффекте Холла. Для регистрации тока питающей сети применяется компенсационный датчик тока ДТК-700С, работающий на эффекте Холла. Датчиком сварочного тока (ДСТ) является пояс Роговского ПИ-44-1. На выходе датчика установлен интегратор (ИН), построенный на операционном усилителе, необходимый для получения сигнала, пропорционального сварочному току $I_{св}$. Для фиксации показаний напряжения электродов аналогично применяется датчик ДНК-С, блок ДНЭ. В качестве датчика усилия сжатия электродов (ДУС) используются наклеиваемые резисторные тензометрические датчики с измерительным усилителем АТ5.

Установка работает следующим образом. Мгновенные значения сетевого напряжения u_c , тока i_c , напряжения между электродами $u_{ээ}$ и сварочного тока $i_{св}$ с соответствующих датчиков с частотой 10 кГц поступают на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и передаются в ОЗУ микроконтроллера в виде массива двоичных кодов. Для полу-

чения реальных значений сетевого напряжения и тока производится программное умножение полученных данных на калибровочные коэффициенты по напряжению k_U и току k_I .

Полная мощность, потребляемая машиной контактной сварки, определяется по формуле

$$S_C = U_C \cdot I_C, \quad (1)$$

где U_C , I_C – действующие значения напряжения и тока.

$$U_C = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_C^2(t) dt};$$

$$I_C = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_C^2(t) dt}. \quad (2)$$

Используя метод прямоугольников, перейдем от интеграла к приближенной сумме:

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{k=1}^n U_{Ck}^2 \Delta t} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{k=1}^n I_{Ck}^2 \Delta t} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n U_{Ck}^2 \Delta t} \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n I_{Ck}^2 \Delta t}, \quad (3) \end{aligned}$$

где U_{Ck} , I_{Ck} – отсчеты (выборки) сетевого напряжения и тока соответственно; Δt – период дискретизации; n – количество отсчетов (выборок) за период.

Активная мощность, потребляемая машиной контактной сварки, вычисляется по формуле

$$P_C = \frac{1}{T} \int_0^T u_C(t) \cdot i_C(t) dt. \quad (4)$$

Используя метод прямоугольников, перейдем от интеграла к приближенной сумме:

$$P_C \approx \frac{1}{T} \sum_{k=1}^n U_{Ck} \cdot I_{Ck} \cdot \Delta t = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n U_{Ck} \cdot I_{Ck} \cdot (5)$$

Реактивная мощность

$$Q_C = \sqrt{S_C^2 - P_C^2} \cdot (6)$$

Коэффициент мощности

$$\begin{aligned} \cos \varphi &= \frac{P_C}{S_C} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n U_{Ck} \cdot I_{Ck}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n U_{Ck}^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n I_{Ck}^2}} = \\ &= \frac{\sum_{k=1}^n U_{Ck} \cdot I_{Ck}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n U_{Ck}^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^n I_{Ck}^2}} \cdot (7) \end{aligned}$$

Энергия, выделяемая между электродами на сварку одной точки, рассчитывается по формуле

$$\begin{aligned} Q_{\text{ЭЭ}} &= \int_0^{t_{\text{СВ}}} u_{\text{ЭЭ}}(t) \cdot i_{\text{СВ}}(t) dt = \\ &= \sqrt{\sum_{k=1}^m U_{\text{ЭЭ}}^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^m I_{\text{СВ}}^2}, \quad (8) \end{aligned}$$

где $t_{\text{СВ}}$ – время сварки; m – количество отсчетов (выборок) за время сварки.

Блок управления (БУ) формирует импульсы управления тиристорами сварочной машины с определенным углом регулирования, определяемым в соответствии с текущим значением выделенной энергии $Q_{\text{ЭЭ}}$. Полученные значения потребляемых из сети мощностей, коэффициента мощности, потребляемой из сети и выделяемой в зоне сварной точки энергии, отображаются на экране персонального компьютера.

Основные параметры режима кон-

тактной рельефной сварки нахлесточных соединений с энергоэффективными режимами, а также качество рельефных сварных соединений и механические характеристики определялись в ходе экспериментальных исследований. Для решения поставленных задач были подготовлены партии образцов из стали Ст3сп размером: $200 \times 50 \times 2$ мм, $200 \times 50 \times 2,5$ мм, $200 \times 50 \times 3$ мм. Согласно рекомендациям технической литературы, для образцов были изготовлены рельефы размером $6 \times 1,2$ мм (для пластин $2 + 2$ мм), $6 \times 1,35$ мм (для пластин $2,5 + 2,5$ мм), $6 \times 1,5$ (для пластин $3 + 3$ мм). Экспериментальные исследования проводились с использованием разработанной установки на машине контактной сварки МТ-1601.

Для сварных соединений, полученных контактной рельефной сваркой, при толщинах $2 + 2$; $2,5 + 2,5$ и $3 + 3$ мм определены зависимости между основными параметрами процесса: временем сварки $t_{\text{СВ}}$, диаметром литого ядра $d_{\text{я}}$ и энергией, вводимой в межэлектродную зону $Q_{\text{ЭЭ}}$. На рис. 2 показана область требуемых значений минимально допустимого по ГОСТ 15878–79 диаметра литого ядра $d_{\text{я}}$ для различных групп толщин сварных соединений со сферическим рельефом.

На основании этих зависимостей определены энергосберегающие параметры режима сварки, обеспечивающие формирование минимально допустимого по ГОСТ 15878–79 диаметра литого ядра для контактной рельефной сварки. Группы соединения А: 7,0 мм (образцы $2 + 2$ мм), 8,0 мм (образцы $2,5 + 2,5$ мм), 9,0 мм (образцы $3 + 3$ мм). Группы соединения Б: 5,0 мм (образцы $2 + 2$ мм), 6,0 мм (образцы $2,5 + 2,5$ мм), 6,5 мм (образцы $3 + 3$ мм).

По результатам проведенных экспериментальных исследований установлены зависимости между основными параметрами режима контактной рельефной сварки: сварочным током $I_{\text{СВ}}$, временем сварки $t_{\text{СВ}}$, усилием сжатия

электродов $F_{\text{СВ}}$ и усилием на отрыв $F_{\text{ОТР}}$ рельефных сварных соединений для толщин 2 + 2; 2,5 + 2,5 и 3 + 3 мм (рис. 3).

Подготовка образцов и процедура испытаний проводились в соответствии с ГОСТ 6996–66.

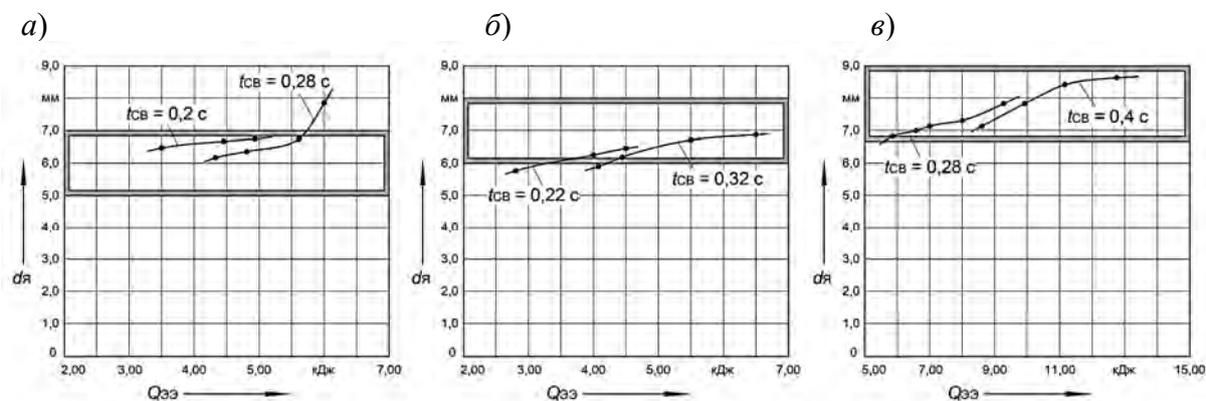


Рис. 2. Зависимости диаметра литого ядра сварной точки от энергии, вводимой в межэлектродную зону для различных значений времени сварки: а – толщина образцов 2 + 2 мм; б – толщина образцов 2,5 + 2,5 мм; в – толщина образцов 3 + 3 мм

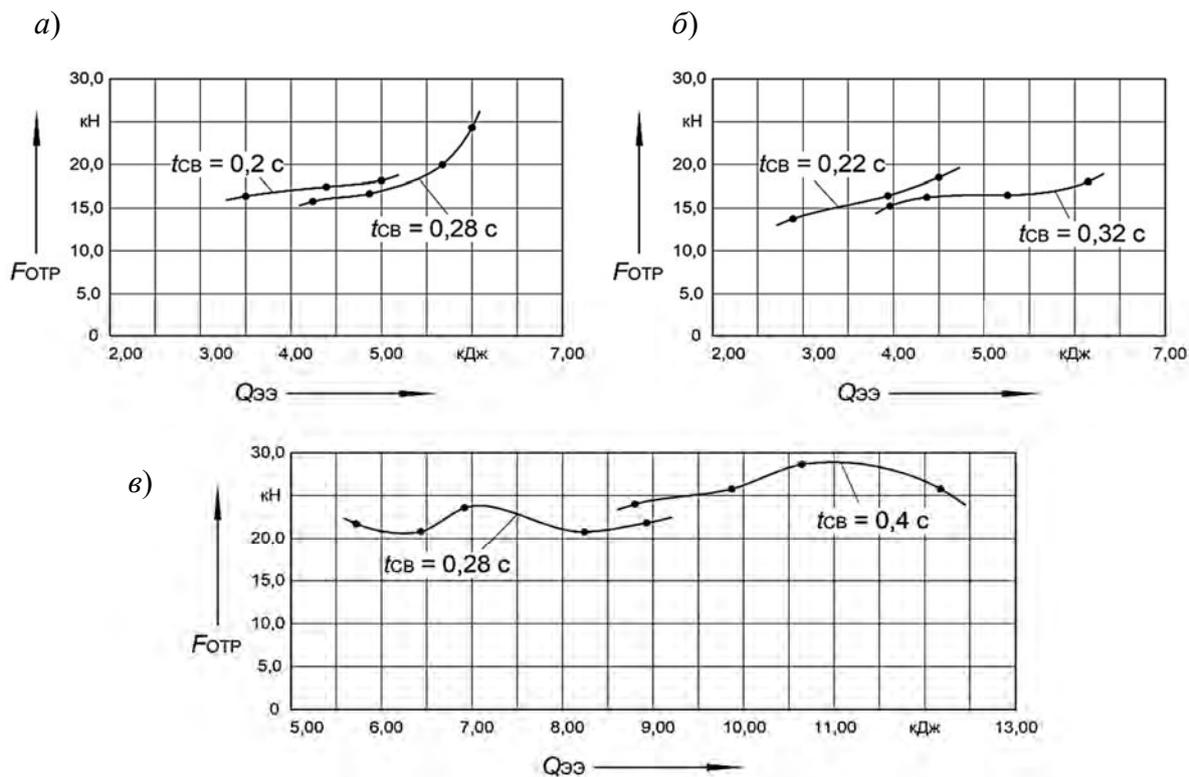


Рис. 3. Графические зависимости разрушающей нагрузки от энергии межэлектродного участка: а – толщина образцов 2 + 2 мм; б – толщина образцов 2,5 + 2,5 мм; в – толщина образцов 3 + 3 мм

Механические характеристики нахлесточных сварных соединений с применением энергоэффективной технологии сварки оценивались по касательным

допускаемым напряжениям. Для образцов толщиной 2 + 2 мм минимальная разрушающая нагрузка составила $F_{\text{ОТР}} = 16,72$ кН при диаметре литого

ядра $d_{\text{я}} = 7,32$ мм; здесь касательное напряжение $\tau = 397,5$ МПа. Для образцов рельефных сварных соединений толщиной $2,5 + 2,5$ мм минимальная разрушающая нагрузка составила $F_{\text{отр}} = 15,12$ кН при диаметре литого ядра $d_{\text{я}} = 6,58$ мм. Для этого случая касательное напряжение $\tau = 278,1$ МПа. Для образцов толщиной $3 + 3$ мм минимальная разрушающая нагрузка составила $F_{\text{отр}} = 20,95$ кН при диаметре литого ядра $d_{\text{я}} = 7,32$ мм. Напряжение в этом случае составляет $\tau = 498$ МПа, что также находится в требуемом диапазоне. Средние значения нагрузок по партиям образцов толщиной $2 + 2$; $2,5 + 2,5$ и $3 + 3$ мм составляют 17,74; 16,12 и 24,45 кН соответственно. Таким образом, установлено, что при сварке в энергосберегающих режимах обеспечивается

требуемая прочность сварных соединений, т. к. полученные значения разрушающей нагрузки соответствуют требуемому диапазону.

Для серий образцов значения энергии регистрировались также при различных значениях времени сварки $t_{\text{св}}$. С увеличением времени сварки наблюдается рост энергии, потребляемой контактной сварочной машиной Q_1 , что также увеличивает и количество энергии, выделяемой в зоне сварки $Q_{\text{ЭЭ}}$. При минимально допустимом диаметре литого ядра значения энергии для различных толщин приведены в табл. 2.

Определенные зависимости $Q_{\text{ЭЭ}} = f(I_{\text{св}})$ и $Q_1 = f(I_{\text{св}})$ для партий образцов разных толщин показаны на рис. 4.

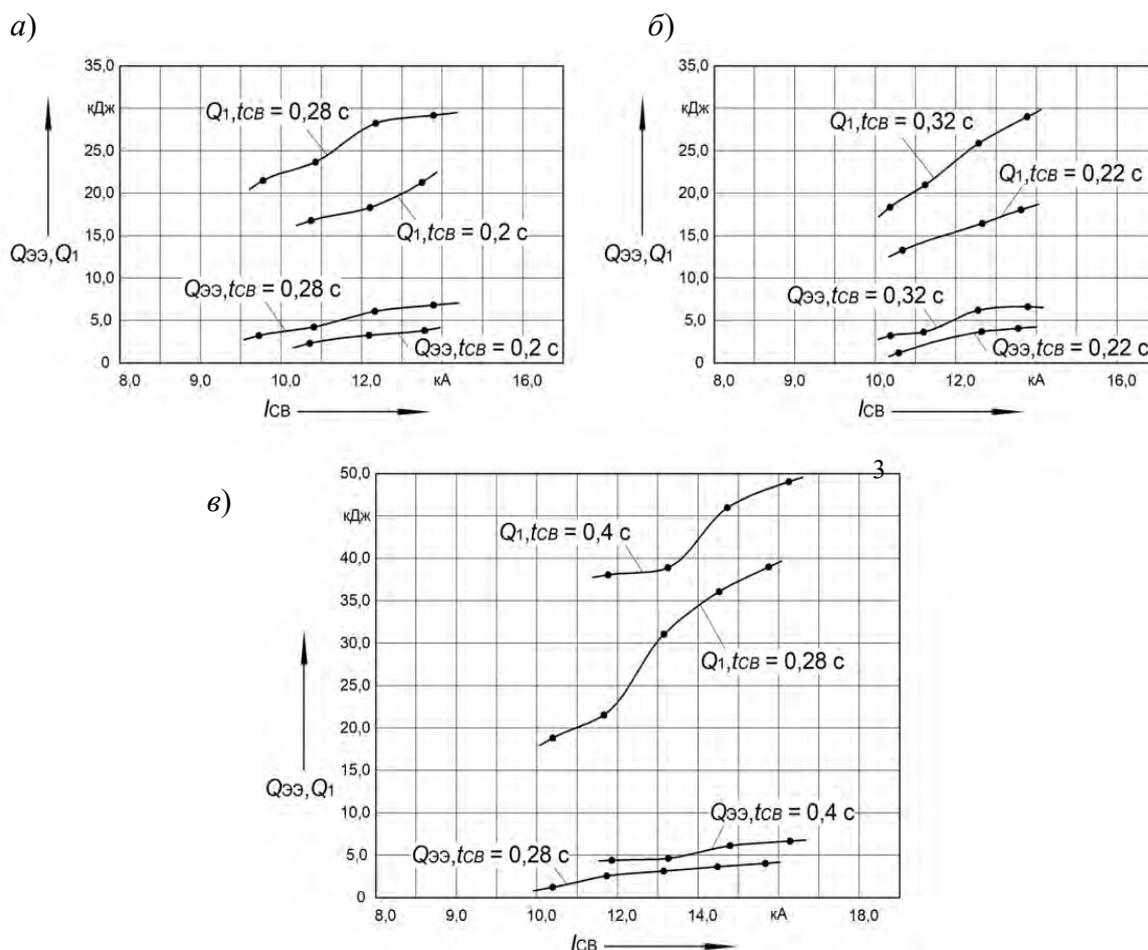


Рис. 4. Графические зависимости энергетических параметров $Q_{\text{ЭЭ}}$ и Q_1 процесса сварки от силы сварочного тока $I_{\text{св}}$ при различном времени сварки $t_{\text{св}}$

Табл. 2. Энергетические параметры процесса при энергоэффективных параметрах режима сварки

Толщина образцов, мм	Вводимая электрическая энергия в межэлектродную зону $Q_{ЭЭ}$, кДж	Потребляемая электрическая энергия контактной сварочной машиной Q_1 , кДж
2 + 2	4,3	18,95
2,5 + 2,5	2,79	14,63
3 + 3	5,74	19,69

Также по проведенным ранее исследованиям процесса были установлены оптимальные параметры режима, при

которых значения потребляемой Q_1 и вводимой энергии $Q_{ЭЭ}$ приведены в табл. 3.

Табл. 3. Энергетические параметры процесса при стандартных параметрах режима

Толщина образцов, мм	Вводимая электрическая энергия в межэлектродную зону $Q_{ЭЭ}$, кДж	Потребляемая электрическая энергия контактной сварочной машиной Q_1 , кДж
2 + 2	6,1	26,84
2,5 + 2,5	7,4	27,91
3 + 3	8,5	28,9

В целом, для образцов различной толщины наблюдается снижение количества потребляемой энергии. Для рельефных сварных соединений количество вводимой энергии $Q_{ЭЭ}$ в среднем снизилось на 33 % (на 30 % для толщин 2 + 2 мм; на 38 % для толщин 2,5 + 2,5 мм; на 32 % для толщин 3 + 3 мм). Значение потребляемой сетевой энергии Q_1 контактной сварочной машиной за один цикл сварки также, в среднем, снизилось на 36 %.

Выводы

1. Установлены зависимости между основными параметрами режима контактной рельефной сварки: энергией, вводимой в межэлектродную зону $Q_{ЭЭ}$, временем сварки $t_{СВ}$ и диаметром литого ядра $d_{я}$ рельефных сварных соединений для толщин 2 + 2; 2,5 + 2,5 и 3 + 3 мм. Определены энергосберегающие параметры режима сварки, обеспечивающие

формирование минимально допустимого по ГОСТ 15878–79 диаметра литого ядра.

2. По результатам проведенных экспериментальных исследований установлены зависимости между основными параметрами режима контактной рельефной сварки на однофазной машине переменного тока: сварочным током $I_{СВ}$, временем сварки $t_{СВ}$ и усилием на отрыв при механических испытаниях $F_{отр}$, а также энергией, потребляемой из сети Q_1 , энергией, выделяемой в межэлектродной зоне $Q_{ЭЭ}$ рельефных сварных соединений для толщин 2 + 2; 2,5 + 2,5 и 3 + 3 мм.

3. Разработана технология контактной рельефной сварки нахлесточных соединений из низкоуглеродистых сталей толщиной 2...3 мм и установка на базе однофазной машины контактной сварки модели МТ-1617, позволяющая осуществлять программное управление циклом сварки с контролем сварочного

тока $I_{св}$, напряжения между электродами $U_{ээ}$, усилия сжатия электродов $F_{св}$ и вычисляемыми на их основе мощностью и энергией $Q_{ээ}$, вводимой в межэлектродную зону.

4. Благодаря применению энергоэффективных параметров режима сварки

удалось снизить общее количество потребляемой энергии контактной сварочной машиной до 36 %, а также количество энергии, вводимой в межэлектродную зону, до 33 % при сохранении требуемого уровня прочностных характеристик сварных соединений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Климов, А. С.** Контактная сварка. Вопросы управления и повышения стабильности качества / А. С. Климов. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 216 с.
2. **Болотов, С. В.** Компьютерное управление циклом контактной конденсаторной сварки с контролем мощности тепловложения / С. В. Болотов, Е. П. Никитенко, А. С. Шерстобитов // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов : сб. ст. 9 Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев : Бел.-Рос. ун-т, 2024. – С. 47–50.
3. Разработка программных средств системы адаптивного регулирования мощности в процессе рельефной сварки / С. М. Фурманов, Д. Н. Юманов, А. О. Сергейчик [и др.] // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 3. – С. 72–80.
4. **Болотов, С. В.** Энергоэффективная технология контактной рельефной сварки Т-образных сварных соединений / С. В. Болотов, Д. Н. Юманов, С. М. Фурманов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2025. – № 1. – С. 5–13.
5. Технология контактной рельефной сварки держателей термодисков / С. В. Болотов, Д. Н. Юманов, С. М. Фурманов [и др.] // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 3. – С. 5–13.
6. Энергоэффективные параметры режима контактной рельефной сварки Т-образных сварных соединений / Д. Н. Юманов, С. В. Болотов, П. А. Прудников, Е. П. Никитенко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев : Бел.-Рос. ун-т, 2025. – С. 202.
7. **Прудников, П. А.** Разработка программных средств для оценки энергопотребления конденсаторных машин контактной рельефной сварки / П. А. Прудников, Е. П. Никитенко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев : Бел.-Рос. ун-т, 2025. – С. 116–117.

Статья сдана в редакцию 20 января 2026 года

Контакты:

s.v.bolotov@mail.ru (Болотов Сергей Владимирович);
oitsp.dmitriy.u@gmail.com (Юманов Дмитрий Николаевич);
prudnikov.p@mail.ru (Прудников Павел Анатольевич);
ep_nikitenko@mail.ru (Никитенко Егор Петрович).

S. V. BOLOTOV, D. N. YUMANOV, P. A. PRUDNIKOV, E. P. NIKITENKO

ENERGY-EFFICIENT PROJECTION WELDING TECHNOLOGY FOR LAP JOINTS WITH PROGRAM-CONTROLLED ELECTRO-THERMAL-DEFORMATION CYCLE

Abstract

The article presents the results of research into developing the energy-efficient technology for projection welding of lap joints made from low-carbon steels having a spherical relief and a thickness range of 2...3 mm. The quality of welded joints, when applying energy-saving welding modes, is achieved through using an installation developed on the basis of the MT-1617 resistance welding machine, which provides control over the energy released in the interelectrode zone. The relationships between key parameters of the projection welding mode and

shear force of the welded joints, as well as the diameter of a fused nugget of the weld spot, have been experimentally established. Studies of the energy consumed from the grid by the resistance welding machine using the proposed modes confirm the energy efficiency of the developed welding technology while ensuring stable strength characteristics of the welded joints.

Keywords:

resistance projection welding, lap joints, resistance welding technology, installation, program control, interelectrode zone energy.

For citation:

Energy-efficient projection welding technology for lap joints with program-controlled electro-thermal-deformation cycle / S. V. Bolotov, D. N. Yumanov, P. A. Prudnikov, E. P. Nikitenko // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2026. – № 1 (90). – P. 13–22.