

МАШИНОСТРОЕНИЕ

DOI: 10.24412/2077-8481-2025-1-5-13

УДК 621.791.763.2

С. В. БОЛОТОВ, канд. техн. наук, доц.

Д. Н. ЮМАНОВ, канд. техн. наук

С. М. ФУРМАНОВ, канд. техн. наук, доц.

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КОНТАКТНОЙ РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ Т-ОБРАЗНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Аннотация

Приведены результаты разработки энергоэффективной технологии контактной рельефной сварки. Исследовано влияние энергоэффективных параметров режима сварки на механические характеристики сварных соединений, а также на потребление электрической энергии контактной сварочной машиной. Разработанная технология позволяет получать сварные соединения требуемого уровня прочности с меньшим вводом энергии, что благоприятно влияет на экономические показатели. По проведенным механическим испытаниям соединений установлено, что разрушающая нагрузка лежит в диапазоне от 19,45 до 22,34 кН, в то же время сокращение потребляемой энергии снижено на 10,63 %...16,17 %. Это свидетельствует об эффективности предлагаемой технологии контактной рельефной сварки.

Ключевые слова:

контактная сварка, энергоэффективные процессы, технология контактной сварки, Т-образные соединения.

Для цитирования:

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 (86). – С. 5–13.

Введение

Контактная рельефная сварка находит все более широкое применение на машиностроительных предприятиях. Однако рекомендуемые в источниках технической литературы параметры режима контактной рельефной сварки значительно завышены с точки зрения энергоэффективности процесса, что связано с универсальными методиками их определения [1–3].

За счет системы автоматического программного управления машиной контактной сварки возможно в разы уменьшить количество вводимой энергии в

межэлектродную зону, обеспечив при этом сохранение требуемой прочности сварных соединений [3, 4]. Направление исследований с целью снижения энергетических затрат связано не только с корректировкой параметров режима контактной сварки, но также и применением модифицированного оборудования для управления процессом, обладающего расширенными возможностями.

Таким образом, разработка энергоэффективной технологии и оборудования для контактной рельефной сварки является актуальной задачей [3, 5].

Основная часть

В Белорусско-Российском университете разработаны системы программного управления параметрами режима контактной сварки, позволяющие регулировать количество вводимой энергии в межэлектродную зону [6–8]. Система управления с регулятором вводимой

энергии $Q_{\text{ЭЭ}}$ используется для решения поставленных задач данного исследования.

На рис. 1 представлена структурная схема установки для контактной рельефной сварки с регулятором вводимой в межэлектродную зону энергии $Q_{\text{ЭЭ}}$.

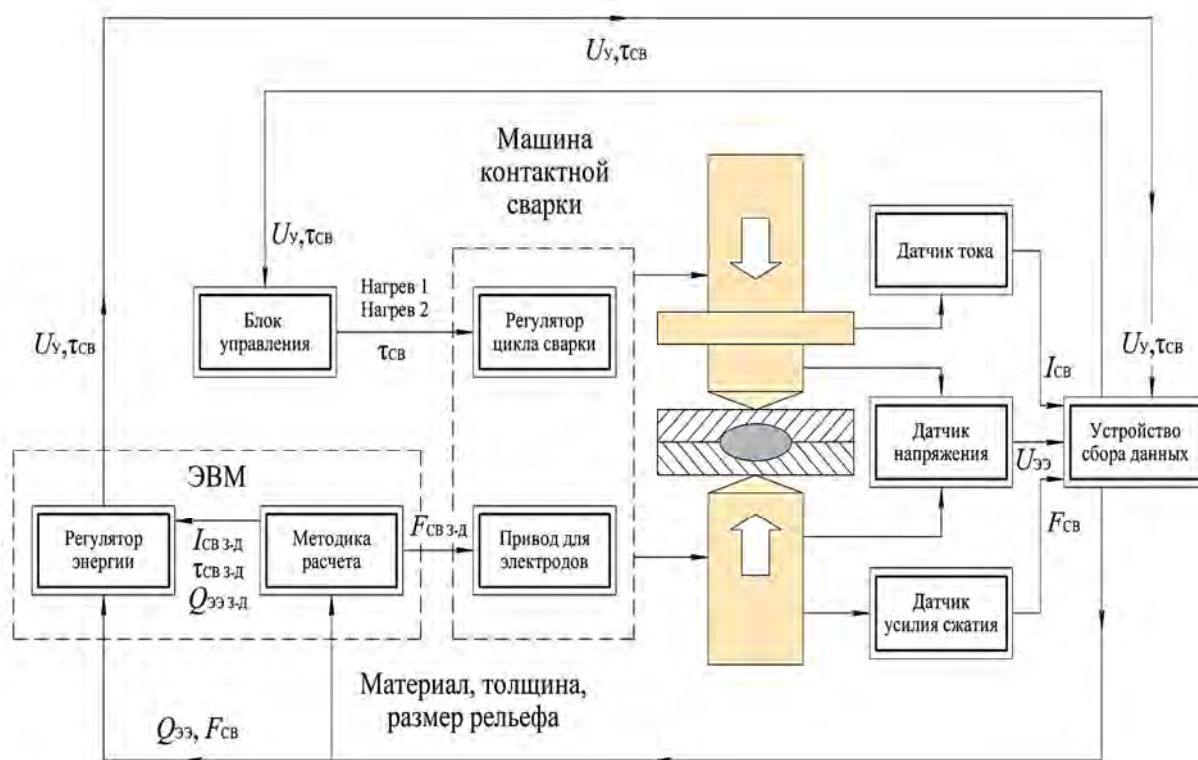


Рис. 1. Структурная схема установки для контактной рельефной сварки

На основании толщины и материала свариваемых деталей, размеров рельефа осуществляется математическое моделирование процесса сварки с определением величины энергии $Q_{\text{ЭЭ}}$ и требуемых параметров режима (сварочного тока $I_{\text{св}}$, времени сварки $t_{\text{св}}$ и усилия сжатия электродов $F_{\text{св}}$), необходимых для формирования требуемых с точки зрения прочности соединения размеров взаимного расплавления свариваемых деталей.

В процессе сварки устройством сбора данных производится контроль мгновенных значений параметров режи-

ма с помощью датчика тока, напряжения и усилия сжатия электродов и рассчитывается величина энергии $Q_{\text{ЭЭ}}$, введенной в межэлектродную зону, и с помощью блока управления регулятором цикла сварки корректируются значения нагрева (сварочного тока $I_{\text{св}}$) и времени сварки $t_{\text{св}}$.

Технология сварки Т-образных сварных соединений должна осуществляться с приложением достаточного по времени усилия сжатия электродов для образования пластических деформаций и установления стабильного контакта поверхностей. Режимы сварки могут

быть скорректированы с целью энергосбережения в направлении уменьшения времени протекания сварочного тока $t_{св}$, а также уменьшения величины импульсов сварочного тока $I_{св}$ и тока подогрева $I_{под}$. Приложение сварочного тока при таком способе сварки является необходимым условием формирования качественного и прочного соединения по причине того, что в процессе нагрева металл в контакте становится более пластичным и, соответственно, объемное взаимодействие протекает более эффективно. Сварка без приложения импульсов тока подогрева $I_{под}$ и сварки $I_{св}$ возможна в случае получения сварных соединений из очень пластичных материалов.

С целью определения оптимальных параметров энергосберегающего режима, а также их влияние на скорость образования сварного соединения при рельефной сварке, проводится компьютерное моделирование процесса в ANSYS Workbench с использованием модуля Thermal-Electric, который предлагает большой выбор и возможности задания электрических и термических нагрузок, что и является отражением влияния протекания импульсов тока подогрева $I_{под}$ и сварки $I_{св}$. Критерием, который показывает образование сварного соединения при изменении параметров режима, выбрана область высоких температур в области контактирования изделий. Для достижения поставленной цели энергосбережения процесса сварки изначально параметры режима снижались, что приводит к снижению потребляемой энергии. Снижение параметров режима, в частности длительности протекания и значений тока подогрева $I_{под}$ и сварки $I_{св}$, влечет за собой уменьшение сварного соединения в связи со снижением температуры. По результатам моделирования процесса определены энергоэффективные параметры режима сварки, при которых область сварного соединения по-прежнему об-

ладает необходимыми геометрическими размерами.

На рис. 2 приведено графическое отображение температурных полей в зоне сварного соединения, а также сравнительные результаты металлографических исследований.

Оценку адекватности разработанных математических моделей проводили на основании сравнительного анализа результатов моделирования и экспериментальных исследований. В качестве входной управляемой переменной выступало время сварки. Постоянными сохранялись геометрические размеры свариваемых деталей, форма рельефа, величина сварочного тока и усилие сжатия электродов. Выходной переменной для оценки адекватности модели являлась ширина и высота области расплавления для Т-образных соединений, которые определялись по макрошлифам соединения при экспериментальных исследованиях. По результатам математического моделирования процесса сварки также определялась зона нагрева выше температуры плавления, которая соответствует области расплавления. Расхождение экспериментальных и расчетных данных составило 7,8 %...9,7 %, что подтверждает адекватность математической модели.

Проводились исследования влияния параметров режима сварки на геометрические характеристики Т-образного сварного соединения (табл. 1).

На рис. 3 показан эскиз сварного соединения, а также основные геометрические параметры, которые измерялись на металлографических образцах.

Опытным путем было выявлено, что наибольшее влияние на геометрические размеры сварного соединения оказывают величина сварочного тока $I_{св}$ и величина тока подогрева $I_{под}$. Изменение величины сварочного тока активно влияет на высоту b и ширину h литой области рельефного соединения, а также на ширину линии сплавления $h_{лс}$ рельефа и пластины. Также на геомет-

рические характеристики оказывает существенное влияние и время протекания

сварочного тока $t_{св}$.

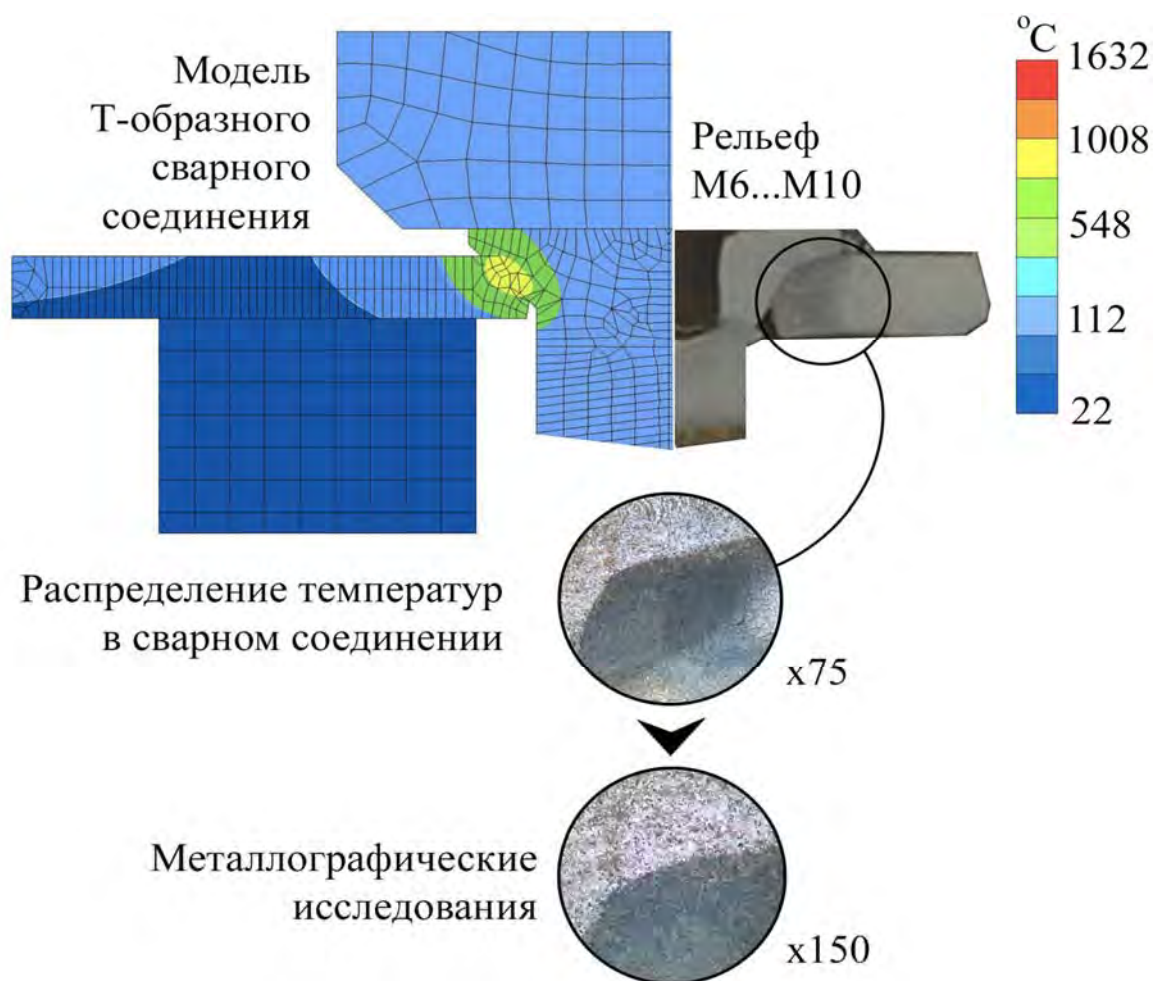


Рис. 2. Результаты математического моделирования процесса контактной рельефной сварки Т-образных соединений на энергосберегающих режимах в сравнении с металлографическими исследованиями

Табл. 1. Геометрические параметры сварного соединения в зависимости от времени протекания сварочного тока $t_{св}$

Время сварки $t_{св}$, с	$h_{лс}$, мм	b , мм	h , мм
0,1	1,8	1,4	1,65
0,15	1,95	1,8	2,0
0,2	2,65	2,7	2,75

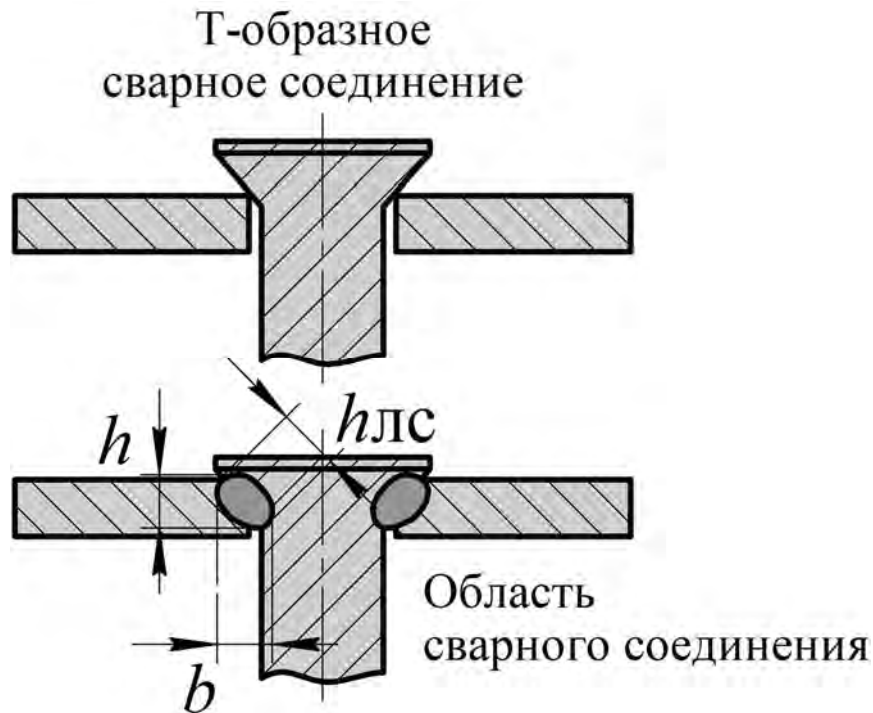


Рис. 3. Измеряемые геометрические параметры Т-образного соединения

Определено также и влияние сжатия на геометрические характеристики сварных соединений. Время и значение сжатия при контактной рельефной сварке влияет определяющим образом на конечные геометрические размеры сварного соединения. Ковочное усилие, как отмечалось в [1, 2], значительно повышает прочностные характеристики рельефных соединений. Это суждение справедливо и для энергосберегающих параметров режима сварки. Реализуемый механизм управления параметрами

режима рельефной сварки позволяет в большей степени проводить корректировку энергетических параметров, что и приводит к экономии. Управление усилием сжатия при сварке и проковке не проводится, осуществляется только его контроль.

В табл. 2 сведены результаты измерения геометрических характеристик Т-образного сварного соединения в зависимости от вариации параметров режима сварки.

Табл. 2. Геометрические параметры сварного соединения в зависимости от величины сварочного тока $I_{св}$ и тока подогрева $I_{под}$

$I_{под}$, кА	$I_{св}$, кА	$h_{лс}$, мм	b , мм	h , мм
8,5	16	1,95	1,8	2,0
10	20	2,65	2,85	2,55
12	24	2,8	2,9	2,7

В ходе исследования в конечном результате были найдены параметры, которые необходимы для более прочного и качественного Т-образного соединения, с практически одинаковыми геометрическими размерами. Все же стоит отметить то, что параметры режима, которые необходимы для формирования области сварного соединения, нужно подбирать опытным путем, в зависимости от размерности и типа рельефа, т. к. они непосредственно влияют на геометрические размеры сварного соединения.

С целью повышения энергосберегающих характеристик процесса рельефной сварки используется несколько циклограмм процесса, которые подходят по критериям вложения электрической энергии в сварное соединение, а также могут быть реализованы на предлагае-

мой системе управления – циклограмма с постоянным усилием сжатия и двумя импульсами сварочного тока, а также циклограмма с повышенным ковочным усилием сжатия. В обоих случаях приложение двух кратковременных импульсов тока ($I_{\text{под}}$ и $I_{\text{св}}$) позволяет обеспечить плавный разогрев металла, но и в то же время экономить энергию $P_{\text{ЭЭ}}$, в связи с тем, что не проводится приложение сварочного тока $I_{\text{св}}$ большой величины и длительности.

На основании результатов компьютерного моделирования и проведенных экспериментальных исследований предложены оптимальные энергоэффективные режимы сварки для Т-образных соединений от 3 до 6 мм и рельефом размерностью М6...М10. Рекомендуемые параметры показаны в табл. 3.

Табл. 3. Рекомендуемые параметры режима контактной рельефной сварки Т-образных соединений (размерность рельефа М6...М10)

Толщина изделий, мм + Размерность рельефа	Ток подогрева, кА	Сварочный ток, кА	Усилие сжатия электродов, кН	Время тока подогрева, с	Время тока сварки, с	Время нарастания (паузы), с
3 + М6	7...8,5	14...16	8,0	0,2	0,2	0,2
4 + М8	9...10	19...20	7,9	0,3	0,2	0,2
6 + М10	10...12	22...24	7,4	0,4	0,3	0,2

Оценивалось влияние параметров режима контактной рельефной сварки на количество теплоты $Q_{\text{ЭЭ}}$, выделяемой в межэлектродном участке (рис. 4). Измерение значения энергии $Q_{\text{ЭЭ}}$ проводилось при помощи регистратора сварочных процессов РКДП-0401 путем интегрирования мгновенных значений сварочного тока $i_{\text{св}}$ и напряжения $u_{\text{ЭЭ}}$.

Определено, что при повышении величины сварочного тока $I_{\text{св}}$ и времени $t_{\text{св}}$ с шагом в 0,5 кА и 0,1 с, соответственно, существенно повышает тепловыделение в зоне сварки. Как правило, повышение этих параметров при сварке

на энергосберегающих режимах приводит и к повышению прочностных характеристик сварных соединений, однако повышается и общее потребление электрической энергии контактной сварочной машиной. Поэтому определенные оптимальные параметры режима сопоставлялись также и со значением разрушающей нагрузки при проведении механических испытаний. В соответствии с нормативно-технической документацией прочность подобных Т-образных сварных соединений оценивается по минимальной разрушающей нагрузке и должна быть не менее 19,5 кН.

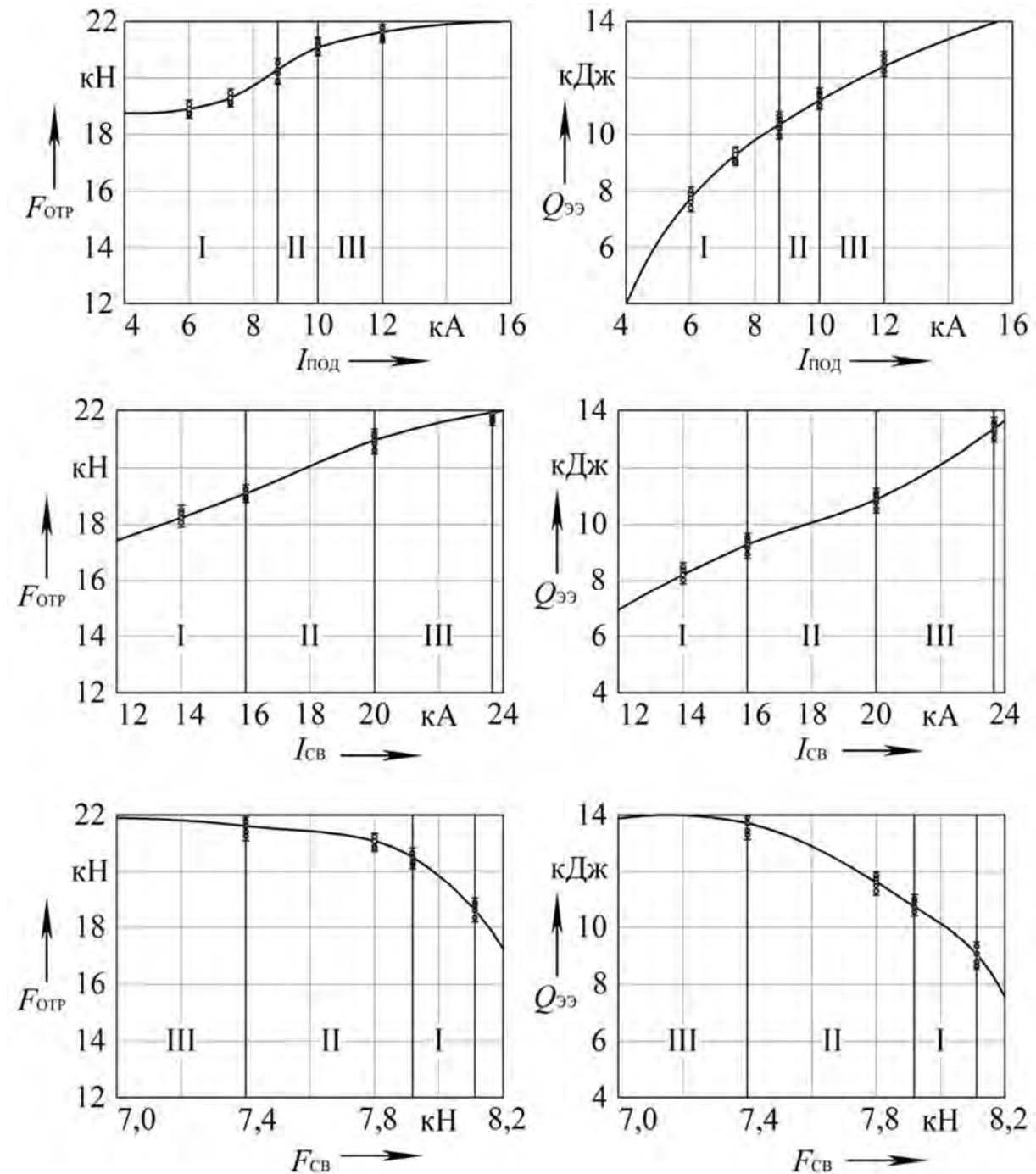


Рис. 4. Влияние энергоэффективных параметров режима рельефной сварки на прочность F_{OTR} и тепловложение $Q_{ЭЭ}$

Установлено, что при сварке на энергоэффективных параметрах режима происходит сокращение потребляемой энергии на 16,17 %, 12,2 %, 10,63 % для геометрических параметров соединений: I – рельеф М6 + 3 мм, II – рельеф М8 + 4 мм, III – рельеф М10 + 6 мм соответственно.

Механические испытания сварных соединений, полученных с использованием энергоэффективных режимов, показали, что в зависимости от вариации параметров и геометрии соединения значение разрушающей нагрузки $F_{OTR} = 19,45...22,34$ кН. Результаты ме-

ханических испытаний Т-образных соединений при энергоэффективных и стан-

дартных режимах контактной рельефной сварки показаны в табл. 4.

Табл. 4. Результаты испытаний энергоэффективной технологии рельефной сварки

Толщина изделий, мм + Размерность рельефа	Среднее значение энергии тепловложения, Дж	Среднее значение усилия на отрыв, кН	Среднее значение энергии тепловложения, Дж	Среднее значение усилия на отрыв, кН
	Энергоэффективный режим		Стандартный режим	
3 + М6	8790,54	19,45	10486,48	21,09
4 + М8	11812,38	21,68	13253,49	25,05
6 + М10	14157,33	22,34	15841,22	26,8

Сравнивая полученные результаты со стандартной технологией контактной рельефной сварки, замечено снижение прочностных характеристик соединений на 12 %...14 %. Однако в ходе исследования установлено, что это снижение является несущественным, в то время как стандартная технология сварки для обеспечения требуемых прочностных характеристик предполагает применение повышенных значений сварочного тока, что приводит к повышению общего потребления электрической энергии контактной сварочной машиной. Следует также отметить, что с использованием предлагаемых энергосберегающих параметров режима сварки прочностные характеристики сварных соединений, несмотря на снижение в 14 %, соответствуют требованию к минимальной разрушающей нагрузке в 19,5 кН при проведении механических испытаний.

Подводим итог вышесказанному.

Предлагаемая энергоэффективная технология контактной рельефной сварки позволяет не только обеспечить требуемые прочностные характеристики сварных соединений, но также и снизить общее энергопотребление, что благоприятно отражается на экономических показателях процесса. Применение системы управления с энергосбережением для контактной сварочной машины позволяет проводить анализ и регистрацию параметров цикла рельеф-

ной сварки, что в дальнейшем может использоваться в предложении более экономичных корректировок параметров. Проведенные исследования показывают эффективность применения энергосберегающих параметров режима контактной рельефной сварки.

Выводы

1. Предлагается энергоэффективная технология контактной рельефной сварки Т-образных сварных соединений, позволяющая повысить экономические показатели процесса за счет задания параметров режима при помощи управляющего оборудования контактной сварочной машины.

2. На основании результатов математического моделирования процесса и экспериментальных исследований определены оптимальные параметры режимов энергоэффективной технологии для ряда размерностей Т-образных сварных соединений. Проведена оценка влияния этих параметров на геометрические характеристики сварных соединений.

3. Установлено, что при сварке на энергоэффективных параметрах режима происходит сокращение потребления электрической энергии контактной сварочной машиной для рельефных соединений М6 + 3 мм на 16,17 %, М8 + 4 мм на 12,2 %, М10 + 6 мм на 10,63 %. Прочность сварных соединений снижается

на 12 %...14 %, однако, несмотря на снижение, соответствует требованиям к ми-

нимальному значению разрушающей нагрузки при механических испытаниях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гилевич, В. А. Технология и оборудование рельефной сварки / В. А. Гилевич. – Л.: Машиностроение, 1976. – 152 с.: ил.
2. Березиенко, В. П. Технология сварки давлением / В. П. Березиенко, С. Ф. Мельников, С. М. Фурманов. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2009. – 256 с.
3. Поляков, А. Ю. Снижение энергоемкости процессов контактной рельефной сварки: монография / А. Ю. Поляков. – 2-е изд., доп. – М.: Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. – 216 с.
4. Поляков, А. Ю. Энергоэффективность процесса управления сварочной машиной в режиме реального времени при контактной рельефной сварке / А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, Б. В. Федотов // Сварка и диагностика. – 2017. – № 3. – С. 51–55.
5. Климов, А. С. Контактная сварка. Вопросы управления и повышения стабильности качества / А. С. Климов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 216 с.
6. Фурманов, С. М. Пути совершенствования термомеханических циклов контактной точечной и рельефной сварки: монография / С. М. Фурманов. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2019. – 274 с.
7. 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: Белорус.-Рос. ун-т, 2024. – С. 47–50.
8. 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.

Статья сдана в редакцию 5 февраля 2025 года

Контакты:

s.v.bolotov@mail.ru (Болотов Сергей Владимирович);
oitsp.dmitriy.y@gmail.com (Юманов Дмитрий Николаевич);
pochta_furm@mail.ru (Фурманов Сергей Михайлович).

S. V. BOLOTOV, D. N. YUMANOV, S. M. FURMANOV

ENERGY-EFFICIENT RESISTANCE PROJECTION WELDING TECHNOLOGY OF T-SHAPED WELDED JOINTS

Abstract

The article presents results of the development of energy-efficient resistance projection welding technology. It has been investigated how energy-efficient parameters of the welding mode influence the mechanical characteristics of welded joints, as well as the consumption of electrical energy by a resistance welding machine. The technology developed makes it possible to obtain welded joints of the required strength level with less energy input, which has a positive effect on economic performance. The conducted mechanical tests of the obtained joints have shown that the breaking load lies in the range from 19,45 to 22,34 kN, while the energy consumption is reduced by 10,63 %...16,17 %. This indicates the effectiveness of the proposed technology of resistance projection welding.

Keywords:

resistance projection welding, energy-efficient processes, resistance projection welding technology, T-shaped joints.

For citation:

Bolotov, S. V. Energy-efficient resistance projection welding technology of T-shaped welded joints / S. V. Bolotov, D. N. Yumanov, S. M. Furmanov // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2025. – № 1 (86). – P. 5–13.