

УДК 621.791

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА СВАРОЧНОГО ТОКА И УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ КОНТАКТНОЙ РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ НАХЛЕСТОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

*С. В. БОЛОТОВ, В. П. КУЛИКОВ, Е. Д. КУКУШКИН, П. А. РЕЕНТОВИЧ*

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

UDC 621.791

## METHODOLOGY FOR CALCULATION OF WELDING CURRENT AND CONTROL OF CONTACT RELIEF WELDING OF OVERLAPPING JOINTS

*S. V. BOLOTOV, V. P. KULIKOV, E. D. KUKUSHKIN, P. A. REENTOVICH*

**Аннотация.** Разработаны методика и программно-аппаратные средства для расчета сварочного тока и управления процессом контактной рельефной сварки нахлесточных соединений с учетом полученных выражений, описывающих границу сварной точки для разных толщин свариваемых деталей и размеров рельефа, с учетом энергии теплоотвода в основной металл и материал электродов при изменяющихся теплофизических свойствах в процессе нагрева.

**Ключевые слова:** контактная рельефная сварка, сварочный ток, энергия теплоотвода, сварная точка, управление.

**Abstract.** A technique and software and hardware tools have been developed for calculating the welding current and controlling the process of resistance relief welding of lap joints, taking into account the expressions obtained that describe the boundary of the weld point for different thicknesses of the welded parts and relief sizes, taking into account the energy of heat removal to the base metal and electrode material with changing thermophysical properties during heating.

**Keywords:** resistance relief welding, welding current, heat removal energy, spot welding, control.

Для расчета параметров режима при контактной рельефной сварке нахлесточных соединений используют уравнение теплового баланса, которое изначально предназначалось для контактной точечной сварки. При этом определяют электрическую энергию  $Q_{ЭЭ}$ , которую необходимо ввести в межэлектродную зону для формирования сварной точки требуемых размеров [1]:

$$Q_{ЭЭ} = Q_{П} + Q_{М} + Q_{Э} + Q_{К},$$

где  $Q_{П}$  – полезная энергия, затрачиваемая на получение зоны взаимного расплавления металла свариваемых деталей;  $Q_{М}$  – энергия, затрачиваемая на

теплоотвод в основной металл свариваемых деталей;  $Q_3$  – энергия, затрачиваемая на теплоотвод в электроды;  $Q_K$  – энергия, затрачиваемая на конвективный теплообмен металла с окружающей средой.

При расчете  $Q_{II}$  принимают, что полезная энергия выделяется в столбике металла под электродами. В ходе экспериментальных исследований установлено, что зона взаимного расплавления свариваемых деталей при контактной рельефной сварке нахлесточных соединений имеет форму объемного эллипсоида (рис. 1).

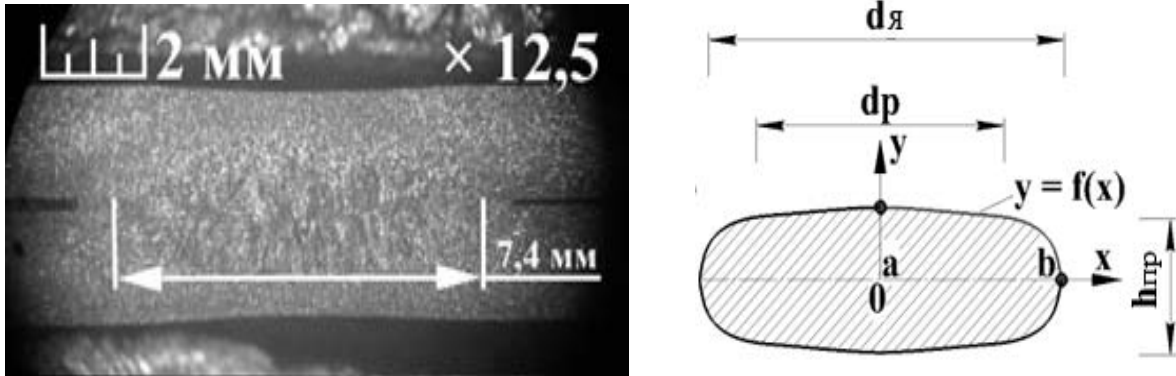


Рис. 1. Макрошлиф и форма поперечного сечения литой зоны сварного соединения

Функция кривой  $y = f(x)$ , описывающей четверть границы литой зоны для представленного на рис. 1 макрошлифа, имеет вид:

$$y = - 5,183681 - 3,159326x + 9,9734506x^{0,5} + 5,0125315e^{-x}.$$

Тогда, учитывая теплофизические свойства материала свариваемых деталей: удельную теплоемкость  $c_M$ , плотность металла  $\gamma_M$  и температуру плавления  $T_{ПЛ}$  для заданной глубины проплавления деталей  $h_{ПР}$ , полезная энергия будет определяться как

$$Q_{II} = 2\pi \int_0^{h_{ПР}} f^2(x) dx c_M \gamma_M T_{ПЛ}.$$

Учет реальной геометрии литой зоны для различных толщин свариваемых деталей и размеров рельефа позволяет уменьшить количество энергии, расходуемой на расплавление соединяемых деталей при обеспечении требуемой прочности сварного соединения.

Получены зависимости, позволяющие определить реальную энергию  $Q_M$ , затрачиваемую на теплоотвод в основной металл свариваемых деталей, и энергию  $Q_3$ , затрачиваемую на теплоотвод в электроды (рис. 2).

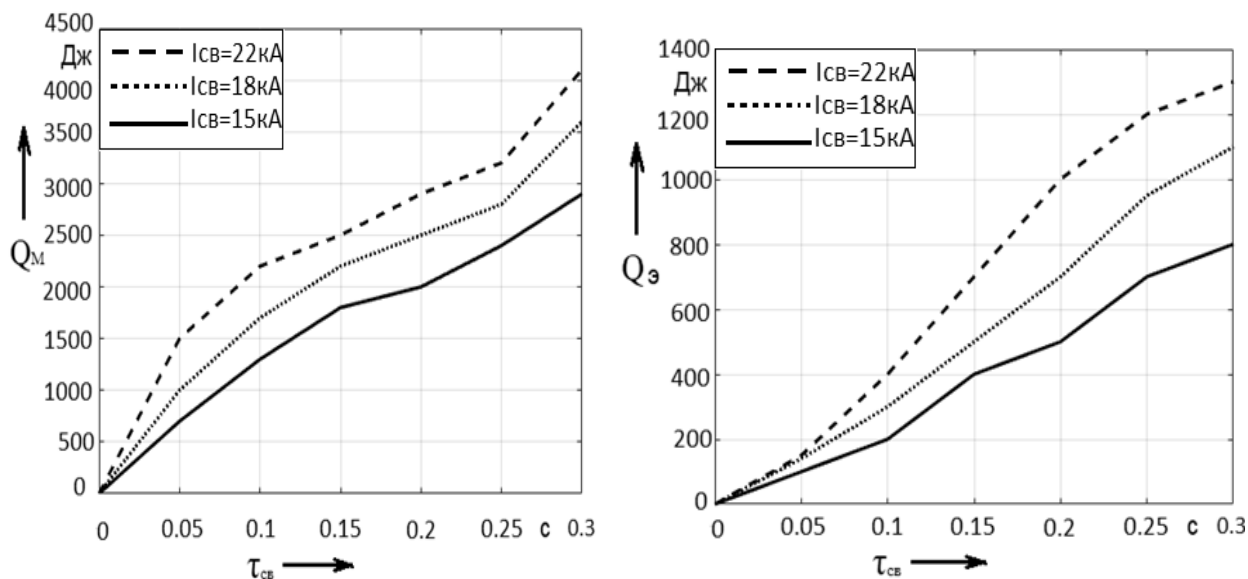


Рис. 2. Зависимость энергии, затрачиваемой на теплоотвод в основной металл свариваемых деталей,  $Q_M$  и энергии, затрачиваемой на теплоотвод в электроды,  $Q_{\text{Э}}$  от времени сварки  $\tau_{CB}$  для различных значений сварочного тока  $I_{CB}$  для пластин толщиной  $2 + 2$  мм по рельефу габаритами  $6 \times 1,2$  мм

Разработана методика расчета сварочного тока в программной среде LabVIEW с учетом полученных выражений, описывающих границу сварной точки для разных толщин свариваемых деталей и размеров рельефа, с учетом энергии теплоотвода в основной металл и материал электродов при изменяющихся теплофизических свойствах в процессе нагрева, которая включает следующие этапы.

1. Выбор программой значения длительности протекания импульса тока  $\tau_{CB}$  для задаваемого материала свариваемых деталей, толщины, размеров рельефа.

2. Определение требуемых из соображений прочности геометрических размеров сварной точки (диаметр ядра  $d_j$  и глубина проплавления  $h_{np}$ ) и функции  $y = f(x)$ , описывающей границу литой зоны.

3. Определение энергии теплоотвода в основной металл  $Q_M$  и материал электродов  $Q_{\text{Э}}$  с учетом их изменяющихся теплофизических свойств в процессе нагрева.

4. Расчет энергии  $Q_{\text{ЭЭ}}$ , необходимой для ввода в межэлектродную зону, по уравнению теплового баланса [1].

5. Выбор значения усилия сжатия электродов  $F_{CB}$  по графику эмпирической зависимости  $Q_{\text{ЭЭ}} = f(F_{CB})$ , установленной ранее [2].

6. Определение значения сопротивления межэлектродной зоны  $R_{\text{ЭЭ}}$  по графику зависимости  $R_{\text{ЭЭ}} = f(F_{CB})$  для данного материала и толщины свариваемых деталей [2].

7. Расчет требуемой величины сварочного тока  $I_{CB}$  по закону Джоуля – Ленца в соответствии с принятым значением длительности протекания импульса  $\tau_{CB}$ , расчетным значением вводимой в межэлектродную зону энергии  $Q_{ЭЭ}$  и определенным значением сопротивления этой зоны  $R_{ЭЭ}$  [3].

8. Установка напряжения управления  $U_U$  для блока управления установки для контактной рельефной сварки, соответствующего рассчитанной величине сварочного тока  $I_{CB}$  (рис. 3).

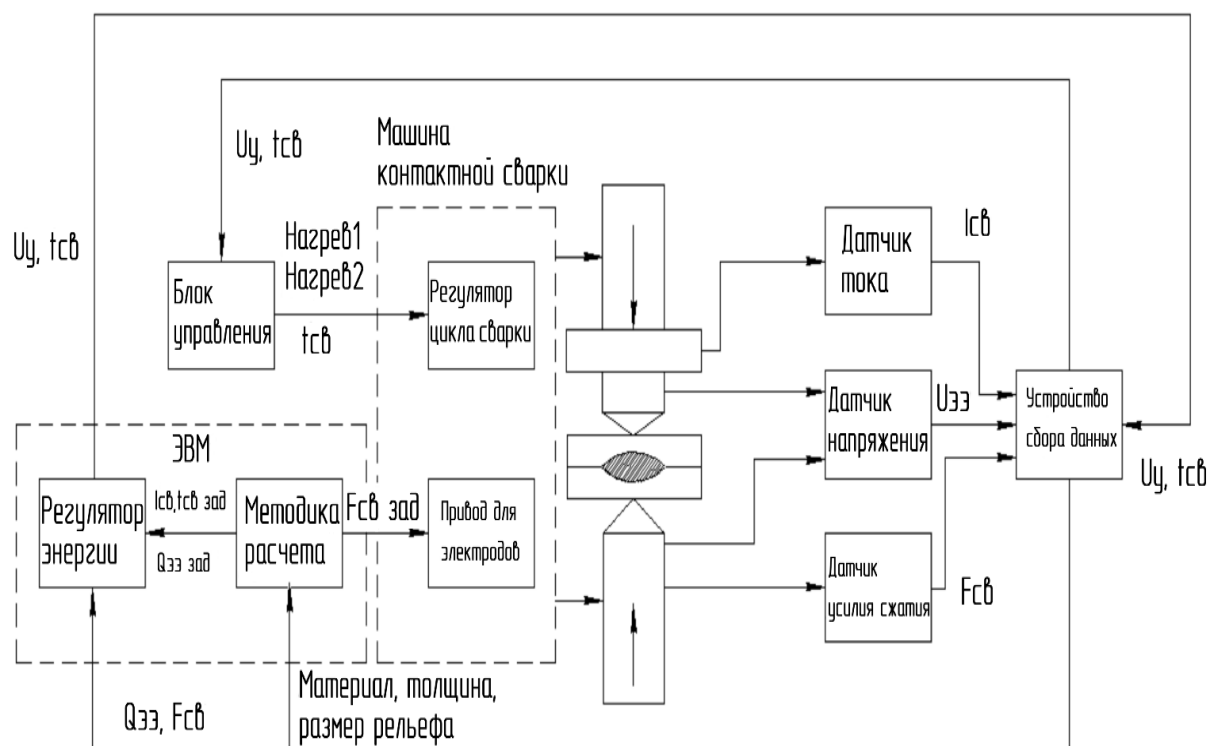


Рис. 3. Структурная схема установки для контактной рельефной сварки

9. Контроль в процессе сварки системой программного управления на базе ЭВМ сварочного тока  $i_{cb}$ , напряжения между электродами  $u_{ээ}$ , усилия сжатия электродов  $F_{cb}$  (рис. 4).

10. Определение энергии, вводимой в межэлектродную зону:

$$Q_{ЭЭ} = i_{cb} \cdot u_{ээ} \cdot \Delta t.$$

11. Корректировка напряжения управления  $U_U$ .

12. При достижении энергии  $Q_{ЭЭ}$  заданного значения  $Q_{ЭЭ \text{ зад}}$  производится подача сигнала с цифрового выхода устройства сбора данных через блок управления на регулятор цикла сварки РКС-801 для отключения сварочного тока. Процесс сварки завершается.

Программное обеспечение системы управления реализовано в среде графического программирования NI LabVIEW [4].

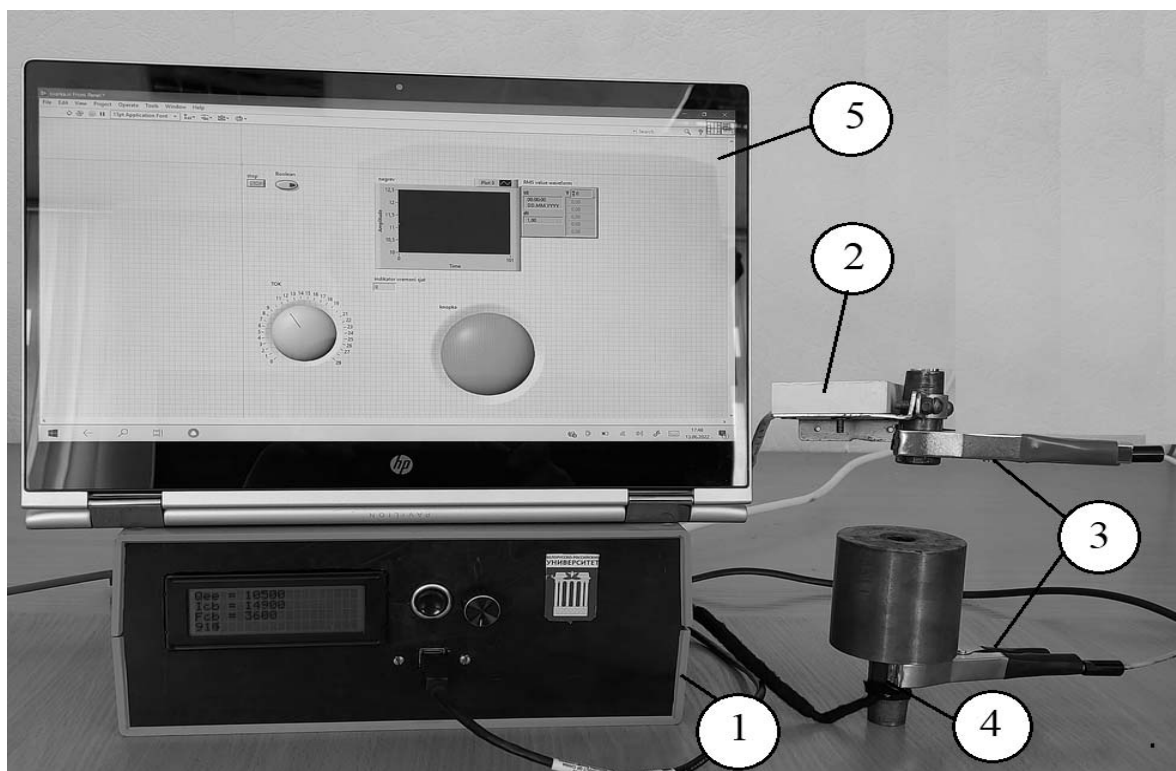


Рис. 4. Внешний вид системы программного управления машиной контактной сварки: 1 – блок управления; 2 – датчик тока; 3 – датчик напряжения между электродами; 4 – датчик усилия сжатия электродов; 5 – ЭВМ

Разработанная методика расчета и управления сварочным током позволяет использовать энергосберегающие режимы контактной рельефной сварки нахлесточных соединений.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Поляков, А. Ю.** Снижение энергоемкости процессов контактной рельефной сварки: монография / А. Ю. Поляков. – 2-е изд., доп. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. – 216 с.

2. **Поляков, А. Ю.** Влияние усилия сжатия электродов на величину вводимой энергии при контактной рельефной сварке с расплавлением / А. Ю. Поляков, А. О. Коротеев, С. В. Болотов // Сварочное производство. – 2022. – № 1. – С. 16–22.

3. Методика расчета основных параметров режима контактной рельефной сварки с автоматической корректировкой мощности тепловложения / С. В. Болотов [и др.] // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 22–22 апр. 2022 г. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – С. 180.

4. **Реентович, П. А.** Разработка программного обеспечения для реализации методики расчета основных параметров режима контактной рельефной сварки Т-образных соединений / П. А. Реентович, Е. Д. Кукушкин // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2021. – С. 100.

E-mail: s.v.bolotov@mail.ru.