

МАШИНОСТРОЕНИЕ

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-3-5-13

УДК 621.791

С. В. БОЛОТОВ, канд. техн. наук, доц.

Д. Н. ЮМАНОВ, канд. техн. наук

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

А. С. ШЕРСТОБИТОВ

Е. П. НИКИТЕНКО

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ТЕХНОЛОГИЯ КОНТАКТНОЙ РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ ДЕРЖАТЕЛЕЙ ТЕРМОПАР

Аннотация

Представлены результаты исследования по разработке технологии контактной рельефной сварки держателей термопар на основе разъемов плоских РПИ-М из латуни марки Л63 к хомуточной ленте из нержавеющей стали AISI 410. Разработана установка для реализации технологии контактной рельефной сварки на основе конденсаторной машины МТК-1601, обеспечивающая управление энергией, выделяемой в межэлектродной зоне, что позволяет обеспечить качество сварного соединения на энергосберегающих режимах сварки. Разработан виртуальный прибор в среде LabVIEW, выполняющий контроль параметров режима и программное управление циклом сварки.

Ключевые слова:

контактная рельефная сварка, технология сварки, установка, энергия в межэлектродной зоне, термопара.

Для цитирования:

Технология контактной рельефной сварки держателей термопар / С. В. Болотов, Д. Н. Юманов, С. М. Фурманов, А. С. Шерстобитов, Е. П. Никитенко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 3 (84). – С. 5–13.

Введение

Сварка разнородных материалов при помощи контактной рельефной сварки на сегодняшний день является актуальной и востребованной задачей, в особенности при получении неразъемных соединений и узлов в области изделий электротехнического назначения. Как правило, сварка разнородных материалов и изделий с наличием покрытия на поверхности требует повышенного внимания к технологическому процессу, а также к параметрам режима

сварки. Использование некорректно определенных параметров процесса сварки приводит к появлению недопустимых дефектов сварных соединений, а также искажению параметров электрической проводимости контактных элементов, что существенно снижает эксплуатационные характеристики изделий электротехнического назначения.

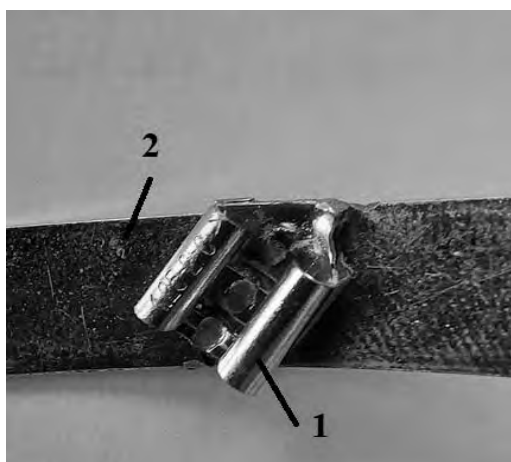
Основная трудность сварки разнородных материалов заключается в резком отличии их теплофизических и химических свойств. В процессе форми-

рования литого ядра сварного соединения при сварке разнородных материалов могут образовываться хрупкие интерметаллидные фазы, приводящие к снижению механических характеристик соединений. К наиболее выраженным проблемам также относят и смещение литого ядра в сторону металла с более высокими теплофизическими свойствами [1, 2].

Объектом исследований выступает контактный держатель термопары 3, который является соединением плоского изолированного разъема РПИ-М из латуни марки Л63 с электролитическим лужением, а также хомутной ленты 2 из нержавеющей стали AISI 410 (рис. 1). Высокотеплопроводный сплав меди и цинка Л63 обладает относительно высокой прочностью, хорошей свариваемостью благодаря однофазной структуре, а также высокими показателями

стойкости против коррозии. Нержавеющая сталь AISI 410, используемая для хомутной ленты, также обладает коррозионной стойкостью, жаропрочностью и высоким показателем ударной вязкости. Толщина элементов контактного держателя находится в диапазоне 0,5...1,0 мм – изолированный разъем $\delta_1 = 0,8$ мм, хомутная лента $\delta_2 = 0,6$ мм. На поверхности контактного держателя выполняется рельефный элемент диаметром 2 мм и высотой 1,0 мм в месте контактирования деталей между собой. Эффективным решением задачи сварки разнородных материалов разной толщины является использование различных подкладок и защитных экранов, однако в данном случае использование их затруднительно по причине геометрических особенностей исследуемого контактного держателя термопары.

а)



б)

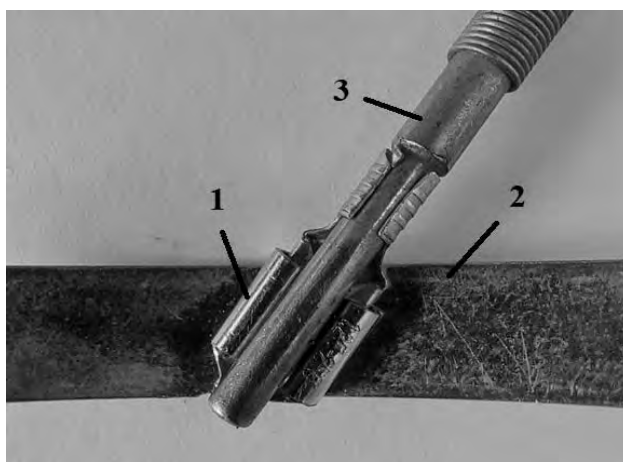


Рис. 1. Держатель термопары: а – соединение плоского изолированного разъема 1 и хомутной ленты 2; б – крепление термопары 3

Держатель термопары входит в состав автоматизированной системы регистрации сварочных процессов РСП-БРУ-01 [3]. С помощью хомутной ленты на трубах диаметром от 89 до 325 мм на расстоянии 50...100 мм от сварного шва на равном удалении друг от друга крепится шесть термопар

ТХА(К)-1199/-/51/-1/2/20/3/-/27, обеспечивающих контроль температуры предварительного нагрева и температуры околосварочной зоны в процессе дуговой сварки.

Рекомендуемыми параметрами процесса сварки изделий из латуни и нержавеющей стали при контактной

сварке на однофазной машине переменного тока могут быть $I_{св} = 9...12$ кА, $\tau_{св} = 0,16...0,26$ с, $F_{св} = 1,5...1,7$ кН [4]. Однако эти параметры процесса являются в большей степени рекомендательными. На практике же следует подбирать их в зависимости от геометрических особенностей сварного соединения. Для предотвращения выплесков необходимо обеспечить плавное приложение импульсов сварочного тока, возможно проводить сварку по циклограмме с постоянным усилием сжатия при подогреве, сварке, проковке. С целью повышения прочностных характеристик рельефную сварку латуни Л63 и нержавеющей стали AISI 410 возможно осуществлять с использованием нескольких импульсов сварочного тока $I_{св}$.

При получении сварных соединений разнородных материалов способом контактной рельефной сварки наблюдается получение 80 % площади соединения от площади основания контакта, причем качественное и высокопрочное соединение может образовываться как с наличием расплавления, так и без него. Как правило, область сварного соединения из-за различия свойств свариваемых материалов может представлять собой четкую границу в виде линии или прослойки из непрерывного ряда кристаллов. Литое ядро образуется в виде столбчатых кристаллов, при увеличении времени нагрева оно может достигать всей толщины более тонкого изделия. С целью предотвращения возможного выхода литого ядра на поверхность детали и прилипания к поверхности электрода следует ограничивать количество теплоты, вводимое в зону соединения [6].

В связи с относительно небольшой толщиной свариваемых деталей с целью корректного задания параметров режима сварки и предупреждения появления выплеска или перегрева изделий применяется способ конденсаторной контактной рельефной сварки. Применение

конденсаторной сварки также обусловлено и использованием разнородных материалов, где строгое соблюдение и отслеживание параметров режима сварки является важным условием получения качественного соединения.

Экспериментальная установка

Одним из возможных решений может стать использование оборудования для конденсаторной сварки с применением современных средств управления и контроля сварочного цикла. Создание таких систем управления сталкивается сопределёнными трудностями: сложным взаимодействием между основными и сопутствующими процессами, протекающими в сварном соединении; кратковременным протеканием сварочного тока, соизмеримым с миллисекундами; другие факторы. Для обеспечения экспериментального исследования различных циклограмм и схем активного контроля точечных сварных соединений целесообразным решением является применение современных микропроцессорных средств, при этом необходимо по максимуму использовать возможности программного обеспечения, которое предоставляет гибкость и минимальные затраты при изменении схемы регулирования [7].

Разработанная система программного управления машиной конденсаторной сварки МТК-1601 призвана заменить устаревшую аппаратуру на базе «Логик-Т» [8]. Функциональная схема управления конденсаторной машиной МТК-1601 представлена на рис. 2.

Питание машины конденсаторной сварки осуществляется от сети переменного тока 380 В через магнитный пускатель КМ1 посредством трансформатора TV1. Зарядка батареи конденсаторов С производится от мостового выпрямителя, собранного на диодах VD1, VD2, VD3, VD4, через органичи-

вающие ток резисторы R1, R2. Включение цепи зарядки осуществляется тиристором VS2. При достижении заданного напряжения на батарее конденсаторов U_c через тиристор VS1 включается цепь шунтирования выпрямителя. Разряд батареи конденсаторов

на первичную обмотку сварочного трансформатора TV2 выполняется включением IGBT-транзистора VT1. Для защиты транзистора от перенапряжений используется обратный диод VD1.

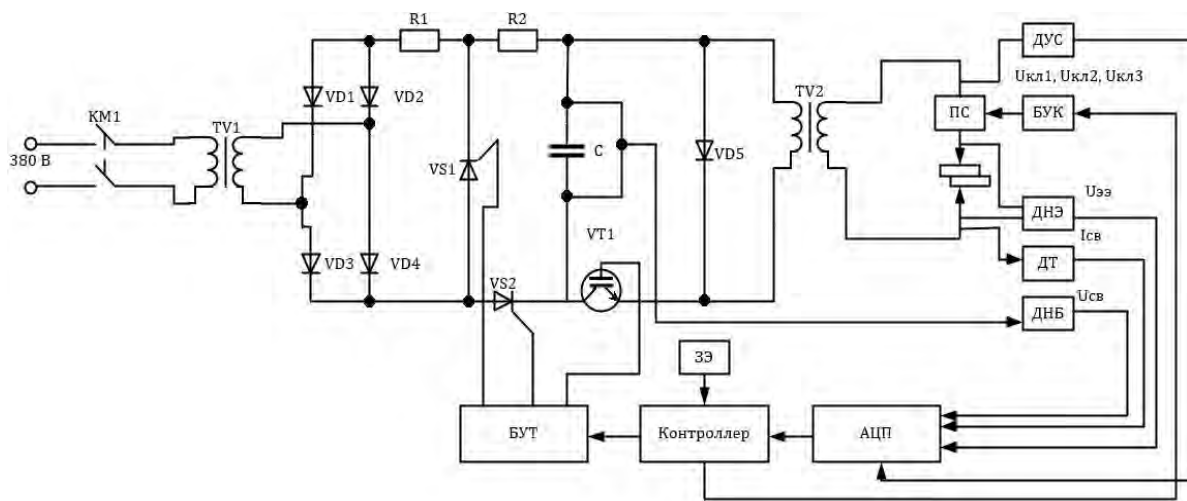


Рис. 2. Функциональная схема управления конденсаторной машиной МТК-1601: ПС – привод сжатия; БУК – блок управления клапанами; ДУС – датчик усилия сжатия электродов; ДНЭ – датчик напряжения между электродами; ДТ – датчик тока; ДНБ – датчик напряжения батареи; БУТ – блок управления тиристорами и транзистором; ЗЭ – задатчик энергии; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; TV1 – трансформатор питания; TV2 – трансформатор сварочный; KM1 – магнитный пускатель; R1, R2 – ограничивающие ток сопротивления; VS1 – шунтирующий тиристор; VS2 – зарядный тиристор; VT1 – разрядный транзистор; C – батарея конденсаторов; VD1, VD2, VD3, VD4 – диоды-выпрямители; VD5 – обратный диод

Главным элементом системы управления машиной конденсаторной сварки является контроллер STM32, который осуществляет подачу открывающих импульсов на тиристоры VS1, VS2 и транзистор VT1 через блок управления тиристорами и транзистором БУТ. Управление клапанами пневматического привода сжатия ПС машины контроллер производит через блок управления БУК. Клапан 1 обеспечивает сжатие электродов, клапан 2 – расжатие и клапан 3 – ковальное (повышенное) усилие. Контроль напряжения на батарее конденсаторов U_c выполняет датчик напряжения ДНБ, напряжения между электродами $U_{ээ}$ – датчик ДНЭ, а усилия сжатия электродов – датчик ДУС на основе тензорезисторов. Контроль тока $I_{св}$ производится датчиком ДТ, представляющим

пояс Роговского. Сигналы с датчиков поступают на контроллер через внешний аналого-цифровой преобразователь АЦП.

Задание требуемого сварочного цикла обеспечивается определённым сочетанием из шести управляющих импульсов, которые отвечают за работу трёх пневматических клапанов, двух тиристоров (зарядного и шунтирующего) и разрядного транзистора. Пневматические клапаны привода сжатия предоставляют возможности по разведению токоведущих электродов, сжатую свариваемых деталей и приложению повышенного усилия сжатия за счет задействования вспомогательного поршня пневматического привода. Управление всеми перечисленными рабочими органами конденсаторной машины осуществляется посредством

цифровых сигналов контроллера.

Для программной реализации системы управления процессом сварки на конденсаторной машине и задания циклограммы её работы было использовано программное обеспечение NI LabVIEW, представляющее собой среду прикладного графического программирования и предназначенное для

создания так называемых виртуальных приборов – программ, написанных в среде LabVIEW [9]. Блок-диаграмма и лицевая панель, являясь основными компонентами виртуального прибора, заключают в себе функции алгоритма программы и пользовательского интерфейса (рис. 3) [10].

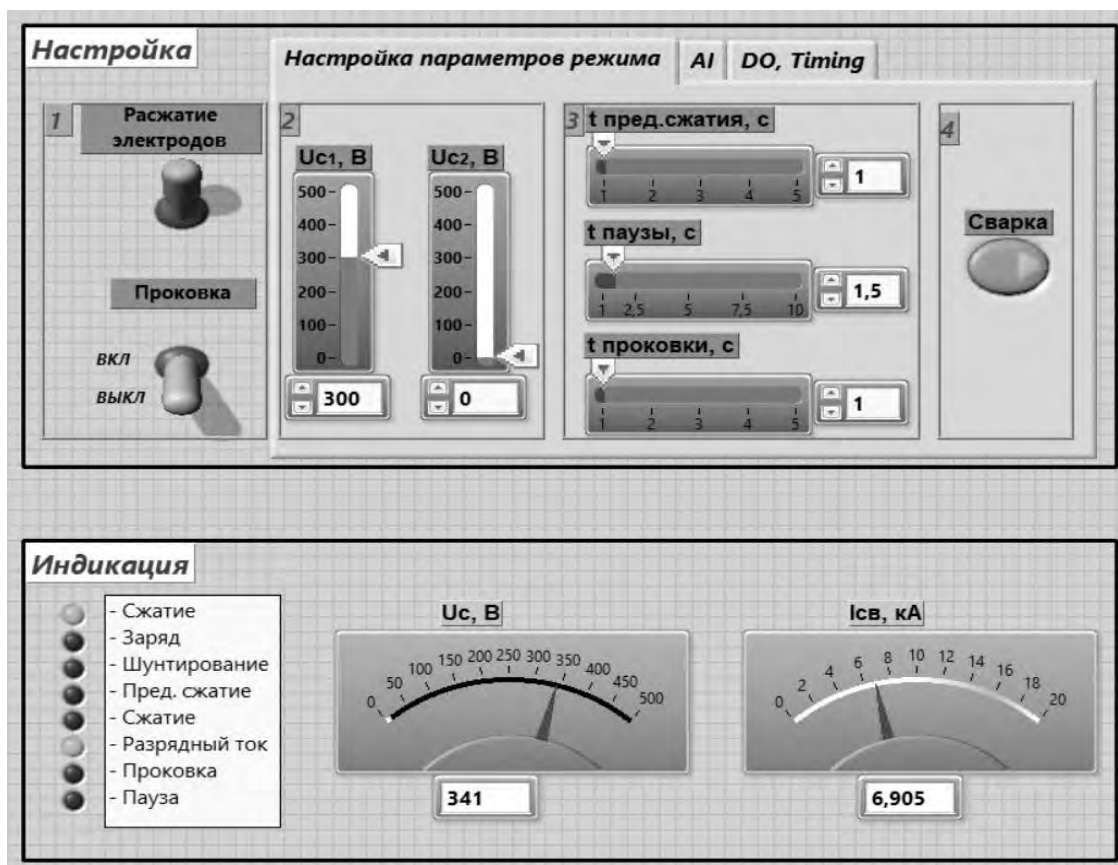


Рис. 3. Лицевая панель виртуального прибора системы управления

Система управления обеспечивает выполнение как одноимпульсного, так и двухимпульсного режима сварки (см. рис. 3) с заданием величины напряжения на конденсаторной батарее U_{c1} и U_{c2} , времени предварительного сжатия, паузы и проковки. Предусмотрен тумблер для расжатия электродов и включения проковки (ковочного усилия $F_{ков}$). Запуск цикла сварки осуществляется при нажатии кнопки «Сварка» на панели виртуального прибора.

На панели «Индикация» производится включение светодиодов при прохождении соответствующей позиции цикла: сжатие, заряд, шунтирование, предварительное сжатие, сжатие, разрядный ток, проковка, пауза.

Разработана плата, обеспечивающая работу БУК и БУТ. Цифровые сигналы управления с контроллера усиливаются с помощью ключей на биполярных транзисторах КТ972Б, обеспечивая формирование напряжений для

управления клапанами привода сжатия ПС и тиристорами заряда, шунтирования и транзистором разряда.

Напряжение батареи конденсаторов (0...500 В) снимается с делителя напряжений, а напряжение между электродами (0...10 В) непосредственно подаётся на АЦП контроллера. Сварочный ток с пояса Роговского через интегрирующее устройство поступает на вход АЦП. Проведена калибровка датчиков напряжения, тока и усилия сжатия электродов.

Результаты исследований

Сварку образцов держателей термодпар выполняли на разработанной установке.

Перед сваркой на поверхности плоского изолированного разъема РПИ-М из латуни марки Л63 в его центральной части (см. рис. 1) изготавливали рельефный элемент диаметром 2 мм и высотой 1,0 мм.

Сварку плоского изолированного разъема РПИ-М и хомутной ленты из

нержавеющей стали AISI 410 выполняли при изменении параметров режима конденсаторной сварки: напряжение конденсаторной батареи C_p (1920 и 3200 мкФ); коэффициент трансформации K_T (30; 60); усилие сжатия электродов $F_{сж}$ (1,5; 2,0; 2,5 и 3,0 кгс); напряжение конденсаторной батареи U_c (180...320 В).

На рис. 4 представлены осциллограммы сварочного тока $i_{св}$, напряжения между электродами $u_{ээ}$, мощности в межэлектродной зоне $p_{ээ}$ при сварке держателей термодпар на следующих режимах: напряжение конденсаторной батареи $C_p = 3200$ мкФ; коэффициент трансформации $K_T = 60$; усилие сжатия электродов $F_{сж} = 2,5$ кгс; напряжение конденсаторной батареи $U_c = 260$ В. Мощность $p_{ээ}$ определяется программно, как произведение сварочного тока $i_{св}$ на напряжение между электродами $u_{ээ}$. Расчёт выделяемой энергии в межэлектродной зоне $Q_{ээ}$ производится суммированием произведений мощности $p_{ээ}$ при каждом измерении на интервал времени Δt между измерениями.

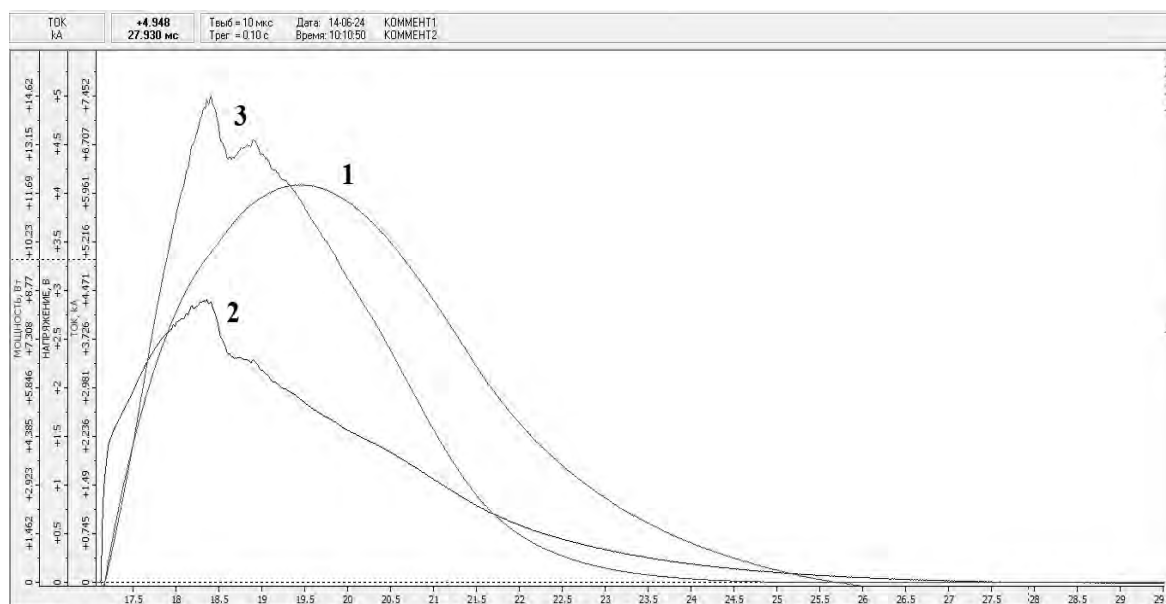


Рис. 4. Графики изменения параметров режима сварки: 1 – сварочного тока $i_{св}$; 2 – напряжения между электродами $u_{ээ}$; 3 – мощности в межэлектродной зоне $p_{ээ}$

Испытания на срез сварных соединений выполнялись на машине разрывной KASON WDW-5. Определялось максимальное усилие разрыва $F_{ср}$. На

рис. 5 представлены внешний вид образца для испытаний на срез сварной точки и вид образца после разрушения.



Рис. 5. Образец для испытания на прочность и вид образца после разрушения

Установлено, что максимальное усилие на срез клеммы для крепления термопары относительно хомутной ленты $F_{ср} = 290$ Н обеспечивается при сварке с усилием сжатия электродов $F_{сж} = 2,5$ кгс, напряжении на батарее конденсаторов $U_c = 260$ В, ёмкости батареи $C_p = 3200$ мкФ и коэффициенте трансформации $K_t = 60$ (рис. 6). При уменьшении усилия сжатия до $F_{сж} = 2,0$ кгс $F_{ср}$ снижается на 4,1 % при напряжении на батарее конденсаторов $U_c = 260$ В и на 2,0 % при уменьшении напряжения на батарее конденсаторов до $U_c = 250$ В. Снижение усилия сжатия до $F_{сж} = 1,5$ кгс при напряжении на батарее конденсаторов $U_c = 250$ В приводит к снижению максимального усилия на срез на 13,8 %. При снижении напряжения на батарее конденсаторов U_c до 210 В максимальное усилие на срез снижается до 216...225 Н, но при этом повышается вероятность образования непровара из-за недостаточного количества накопленной энергии. Увеличение напряжения на батарее конденсаторов U_c более 260 В приводит к повышению значения накопленной энергии и снижению прочности сварного соединения, особенно при усилии сжатия электродов $F_{сж}$ менее 2,0 кгс. При $U_c > 300$ В наблюдаются выплески расплавленного металла. Снижение ёмкости аккумуляторной батареи C_p не целесообразно,

т. к. приводит к уменьшению максимального сварочного тока, размеров зоны взаимного расплавления свариваемых деталей и максимального усилия на срез $F_{ср} < 200$ Н. Уменьшение коэффициента трансформации K_t с 60 до 30 также не целесообразно, т. к. увеличивается скорость нарастания энергии, вводимой в межэлектродную зону, что повышает вероятность образования выплесков расплавленного металла.

Испытания на срез образцов, сваренных при ёмкости батареи конденсаторов $C_p = 3200$ мкФ, коэффициенте трансформации $K_t = 60$, усилии сжатия электродов $F_{сж} = 2,0...2,5$ кгс, напряжении на батарее конденсаторов $U_c = 250...260$ В, показали, что разрушение образца происходит с вырывом металла хомутной ленты, максимальное усилие на срез при этом составляет $F_{ср} = 277...290$ Н (см. рис. 6). Данные режимы сварки позволяют обеспечить максимальную прочность сварного соединения при минимальном потреблении запасённой на батарее конденсаторов энергии.

Установлено, что максимальное значение энергии, выделяемой в межэлектродной зоне, для энергосберегающего процесса контактной рельефной сварки при напряжении $U_c = 250...260$ В не должно превышать

$Q_{\text{эз}} = 10,9$ Дж при максимальной мощности $P_{\text{max}} = 14,4...14,6$ Вт на батарее

конденсаторов емкостью $C_p = 3200$ мкФ.

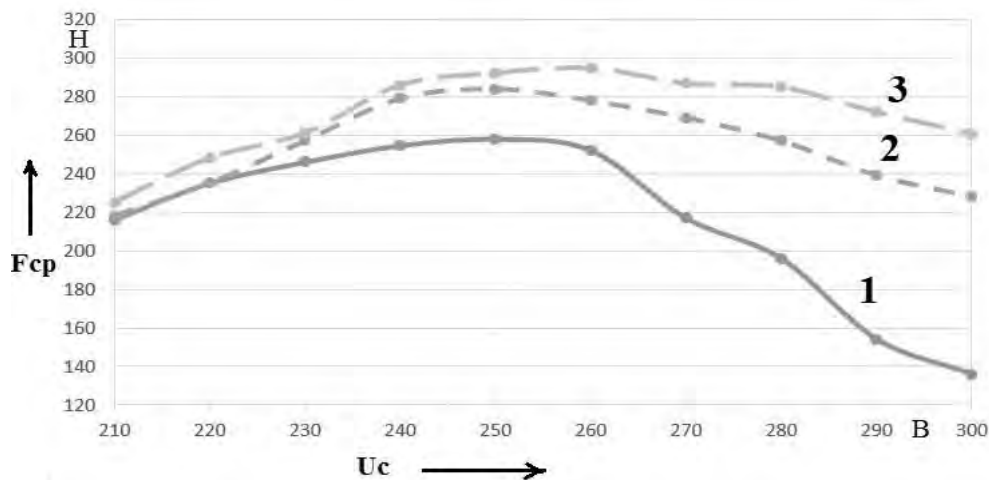


Рис. 6. Зависимость максимального усилия на срез сварной точки F_{cp} от напряжения на конденсаторной батарее U_c для различных усилий сжатия электродов: 1 – $F_{сж} = 1,5$ кгс; 2 – $F_{сж} = 2,0$ кгс; 3 – $F_{сж} = 3,0$ кгс

Использование IGBT-транзистора VT1 (см. рис. 2) вместо разрядного тиристора позволяет осуществлять управление скоростью изменения сварочного тока (мощностью) за счёт широтно-импульсной модуляции на частоте до 50 кГц, а также дозировать значение энергии $Q_{\text{эз}}$, вводимой в межэлектродную зону.

Заключение

1. Сварку изолированного разъема РПИ-М из латуни марки ЛБ3 и хомутной ленты из нержавеющей стали AISI 410 контактного держателя термпары следует выполнять на энергосберегающих режимах контактной рельефной сварки: ёмкость батареи конденсаторов $C_p = 3200$ мкФ; коэффициент трансформации $K_t = 60$; усилие сжатия электродов $F_{сж} = 2,0...2,5$ кгс; напряжение на батарее конденсаторов $U_c = 250...260$ В.

2. Разработана установка на основе машины конденсаторной сварки МТК-1601, позволяющая осуществлять программное управление циклом

сварки с контролем сварочного тока, напряжения между электродами, усилия сжатия электродов и вычисляемыми на их основе мощностью и энергией $Q_{\text{эз}}$, вводимой в межэлектродную зону. Разработан виртуальный прибор в среде LabVIEW, реализующий сбор данных о процессе сварки и управление циклом сварки на конденсаторной машине.

3. Использование IGBT-транзистора в разрядной цепи машины конденсаторной сварки позволяет осуществлять управление величиной энергии, выделяемой в межэлектродной зоне, и скоростью её нарастания (мощностью), что дает возможность обеспечить высокое качество сварных соединений. Установлено, что максимальное значение энергии, выделяемой в межэлектродной зоне, для энергосберегающего процесса контактной рельефной сварки при напряжении $U_c = 250...260$ В не должно превышать $Q_{\text{эз}} = 10,9$ Дж при максимальной мощности $P_{\text{max}} = 14,4...14,6$ Вт на батарее конденсаторов емкостью $C_p = 3200$ мкФ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Березиенко, В. П.** Технология сварки давлением: учебное пособие / В. П. Березиенко, С. Ф. Мельников, С. М. Фурманов. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2009. – 256 с.
2. **Гуляев, А. И.** Технология точечной и рельефной сварки сталей в массовом производстве / А. И. Гуляев. – Москва: Машиностроение, 1978. – 246 с.: ил.
3. **Болотов, С. В.** Автоматизированная система контроля качества дуговой сварки / С. В. Болотов, К. В. Захарченков, В. П. Куликов // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2023. – № 3 (80). – С. 144–152.
4. **Гилевич, В. А.** Технология и оборудование рельефной сварки / В. А. Гилевич. – Ленинград: Машиностроение, 1976. – 152 с.: ил.
5. **Кочергин, К. А.** Контактная сварка / К. А. Кочергин. – Ленинград: Машиностроение, 1987. – 240 с.: ил.
6. **Климов, А. С.** Контактная сварка. Вопросы управления и повышения стабильности качества / А. С. Климов. – Москва: ФИЗМАТ-ЛИТ, 2011. – 216 с.
7. Оборудование для контактной сварки: справочное пособие / Под ред. В. В. Смирнова. – Санкт-Петербург: Энергоатомиздат, 2000. – 848 с.
8. **Белов, А. Б.** Конденсаторные машины для контактной сварки / А. Б. Белов. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1984. – 112 с.
9. Автоматизация физических исследований и эксперимента: компьютерные измерения и виртуальные приборы на основе Lab VIEW 7 / Под ред. П. А. Бутырина. – Москва: ДМК Пресс, 2005. – 264 с.
10. **Курлович, И. В.** Программная реализация управления контактной сваркой на конденсаторной машине / И. В. Курлович, С. В. Болотов, Т. И. Бендик // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2013. – № 4 (41). – С. 35–46.

Статья сдана в редакцию 13 июня 2024 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);
sherstobitov_lip@mail.ru (Шерстобитов Артём Сергеевич);
ep_nikitenko@mail.ru (Никитенко Егор Петрович).

**S. V. BOLOTOV, D. N. YUMANOV, S. M. FURMANOV, A. S. SHERSTOBITOV,
E. P. NIKITENKO**

TECHNOLOGY OF RESISTANCE PROJECTION WELDING OF THERMOCOUPLE HOLDERS

Abstract

The paper presents the research results on developing the technology of resistance projection welding of thermocouple holders based on flat RPI-M connectors made of L63 brass to a clamp tape made of AISI 410 stainless steel. An installation has been developed to implement resistance projection welding technology based on the MTK-1601 capacitor machine, which provides control of the energy released in the interelectrode zone, thus ensuring the quality of the welded joint in the energy-saving welding modes. A virtual device has been developed in the LabVIEW environment, which monitors mode parameters and performs software control of the welding cycle.

Keywords:

resistance projection welding, welding technology, installation, energy in the interelectrode zone, thermocouple.

For citation:

Technology of resistance projection welding of thermocouple holders / S. V. Bolotov, D. N. Yumanov, S. M. Furmanov, A. S. Sherstobitov, E. P. Nikitenko // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 3 (84). – P. 5–13.