

DOI: 10.24412/2077-8481-2026-3-74-85

УДК 621.791.763.2

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

А. О. СЕРГЕЙЧИК

А. Д. МИХАЛЮТО

К. А. ЯКОВЛЕВ

Г. Ю. ЧАПЛЫГИН

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

РАЗРАБОТКА СПОСОБА КОНТАКТНОЙ РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ С АДАПТИВНЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ПО ПЕРЕМЕЩЕНИЮ ПОДВИЖНОГО ЭЛЕКТРОДА СВАРОЧНОЙ МАШИНЫ

Аннотация

Разработана экспериментальная установка для контактной рельефной сварки с адаптивным программным управлением по перемещению подвижного электрода на базе машины контактной точечной сварки МТ-3201, тиристорного регулятора мощности ТРМ-1М-У и программной среды LabView. Разработаны в среде LabView блоки адаптивного задания времени: протекания тока подогрева, нарастания тока от подогрева к сварке, начала включения повышенного усилия проковки от момента включения сварочного тока, дальнейшего протекания и отключения сварочного тока. В качестве объекта исследований выбраны соединения «винт + пластина», применяемые при изготовлении порога пассажирского лифта. Выполнена экспериментальная апробация режимов рельефной сварки, проведены металлографические исследования и механические испытания для оценки качества формируемых сварных соединений.

Ключевые слова:

контактная рельефная сварка, адаптивное программное управление, перемещение подвижного электрода, графическое программирование, виртуальный регулятор цикла сварки.

Для цитирования:

Разработка способа контактной рельефной сварки с адаптивным программным управлением по перемещению подвижного электрода сварочной машины / С. М. Фурманов, А. О. Сергейчик, А. Д. Михалюто [и др.] // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2026. – № 3 (92). – С. 74–85.

Введение

Контактная рельефная сварка является одним из наиболее производительных и экономически эффективных способов получения неразъёмных соединений в массовом и крупносерийном производстве. Однако традиционные технологические процессы с жестко заданной циклограммой (фиксированное время каждого этапа) не всегда позволяют компенсировать разброс геометрических параметров рельефа, изменение состояния поверхности электродов и деталей, а также нестабильность электрических характеристик сети. В результате возрастает вероятность образования

дефектов в виде непроваров, выплесков или недостаточной осадки. Особенно остро эта проблема стоит при сварке соединений типа «втулка + пластина», «винт + пластина» и «гайка + пластина», где проплавление литой зоны напрямую зависит от своевременного переключения этапов подогрева, сварки и проковки. Поэтому актуальной задачей является разработка системы адаптивного программного управления по перемещению подвижного электрода сварочной машины, которая в реальном времени анализирует динамику осадки рельефа и корректирует длительность этапов для каждого конкретного соединения. Исследование и разработка техноло-

гических процессов рельефной сварки указанных соединений с адаптивным регулированием мощности обеспечивают снижение уровня брака и повышение стабильности качества сварных точек.

Научная новизна работы заключается в разработке алгоритма адаптивного управления, который использует не только абсолютные значения перемещения, но и скорость перемещения электрода для переключения этапов протекания тока в процессе сварки, что позволяет контролировать провар и предотвращать выплески расплавленного металла. Практическая значимость состоит в создании технологических процессов адаптивной рельефной сварки различных типов соединений, внедрение которых на производстве либо снижает брак по сравнению с

традиционными способами рельефной сварки, либо уменьшает трудоемкость и расход материалов за счет замены механизированной дуговой сварки в защитных газах.

Основная часть

Объектом исследования выступают сварные соединения «винт + пластина» (винт М10×25 с потайной головкой и кронштейн толщиной 2 мм из стали Ст3пс). Указанные соединения применяются при изготовлении порога пассажирского лифта ЛП-0401К на ОАО «Могилевлифтамаш». Составные части узла: кронштейн, швеллер и винт М10-6gx25 (рис. 1). Шов № 1 предлагается выполнять контактной рельефной сваркой.

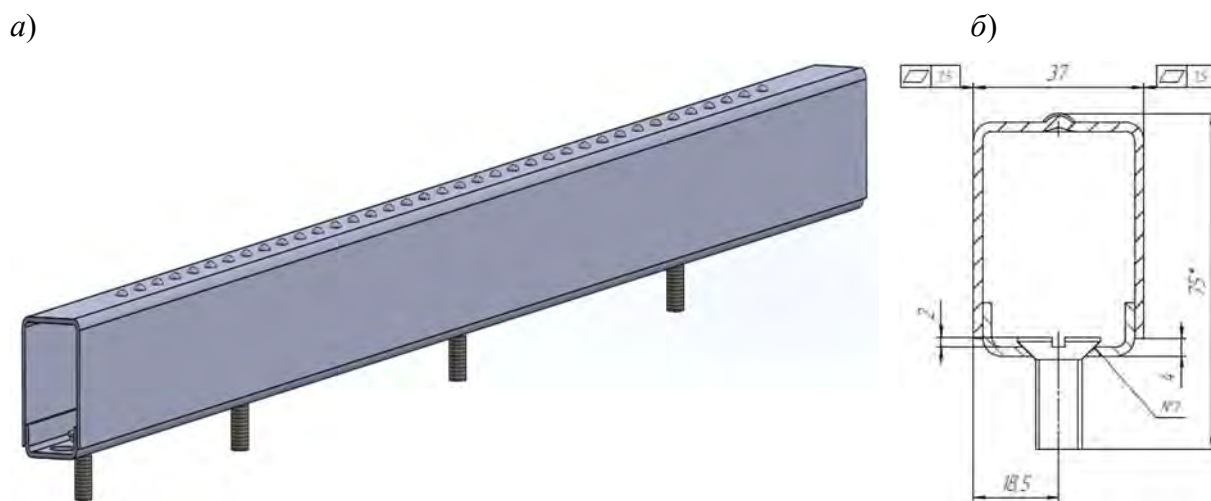


Рис. 1. Порог рамы нижней кабины лифта: а – общий вид; б – вид сварного соединения «винт + пластина» в разрезе

Для реализации рельефной сварки с адаптивным управлением по перемещению подвижного электрода была разработана экспериментальная установка, позволяющая получать сварные соединения стабильно высокого качества без прерывания технологического цикла сварки (рис. 2). При этом величина перемещения электрода при подогреве используется для определения степени деформации рельефа и момента начала

нарастания мощности сварки и усилия сжатия до максимальных значений. Время нарастания мощности может контролироваться также в зависимости от скорости перемещения электрода. Время включения повышенного усилия проковки, а также время протекания максимального сварочного тока зависят от степени деформации рельефа, что в сумме позволяет исключить появление выплесков расплавленного металла,

уменьшить перегрев свариваемых деталей и вероятность возникновения дефектов формообразования сварной

точки и повысить стабильность механических свойств получаемых сварных соединений.

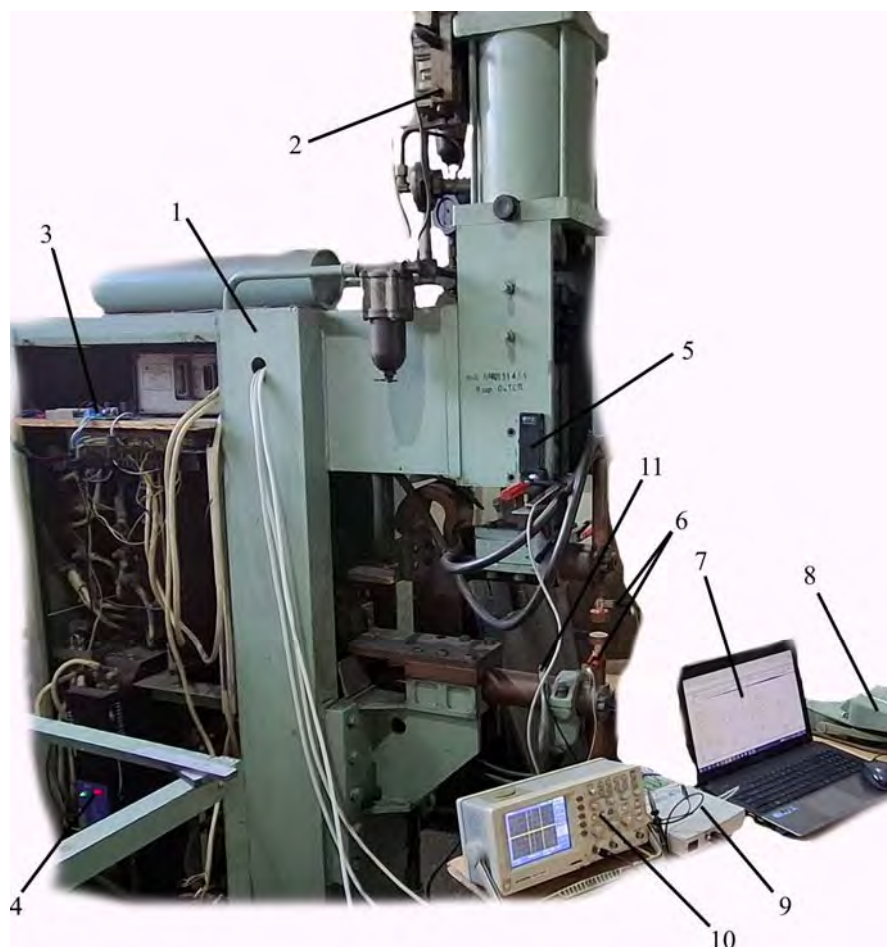


Рис. 2. Экспериментальная установка для контактной рельефной сварки адаптивным программным управлением по перемещению подвижного электрода: 1 – машина контактной точечной сварки МТ-3201; 2 – электропневмоклапаны; 3 – блоки питания и плата управления электропневмоклапанами; 4 – тиристорный регулятор мощности ТРМ-1М-У; 5 – датчик линейного перемещения электродов ЛИР-17; 6 – датчик напряжения между электродами сварочной машины; 7 – ПЭВМ с программной средой LabVIEW; 8 – педаль запуска сварочной машины; 9 – плата сбора данных NI USB; 10 – осциллограф для регистрации сигнала управления ТРМ-1М-У; 11 – датчик сварочного тока

Для реализации алгоритма адаптивного управления процессом контактной рельефной сварки на основе измеряемого перемещения подвижного электрода необходимо было решить следующие задачи: разработать в графической среде LabView блоки циклограммы сварки с переключением этапов по достижении осевой деформации рельефа заданных процентов от заданной высоты рельефа; сформировать по сигналам датчика перемещения ЛИР-17, датчика

тока (пояс Роговского) и датчика напряжения управляющие сигналы для аналогового входа 0...10 В тиристорного регулятора мощности ТРМ-1М-У; экспериментально подобрать рациональные параметры режима сварки (токи подогрева и сварки, усилие сжатия электродов, временные интервалы этапов сварки); провести металлографические исследования и механические испытания полученных соединений для оценки эффективности предложенных режимов.

Полная последовательность работы виртуального регулятора цикла сварки контактной сварочной машины была представлена ранее в [1–3]. При разработке системы адаптивного управления в программный код были внесены некоторые изменения.

Задание и отсчет времени протекания тока подогрева $t_{под}$ осуществляется таймером «Tick Count (ms)» (рис. 3). Таймер отсчитывает относительное машинное время в миллисекундах. Базовое эталонное время (ноль миллисекунд) не определено, поэтому невозможно преобразовать значение миллисекундного таймера в реальное время. Для организации отсчета времени $t_{под}$ исполь-

зуется разница текущего значения таймера, действующего в данном блоке циклограммы, и значения таймера предыдущего блока после его остановки. Разница данных сигналов поступает на индикатор «Время подогрева» и на блок сравнения с заданным максимальным временем протекания тока подогрева. Если время задания подогрева становится меньше текущего времени отсчета, ток подогрева выключается и цикл завершается вместе со срабатыванием индикатора «Стоп подогрев». Такое завершение цикла является нежелательным, а подогрев неэффективным. Поэтому следует скорректировать режим подогрева и запустить циклограмму заново.

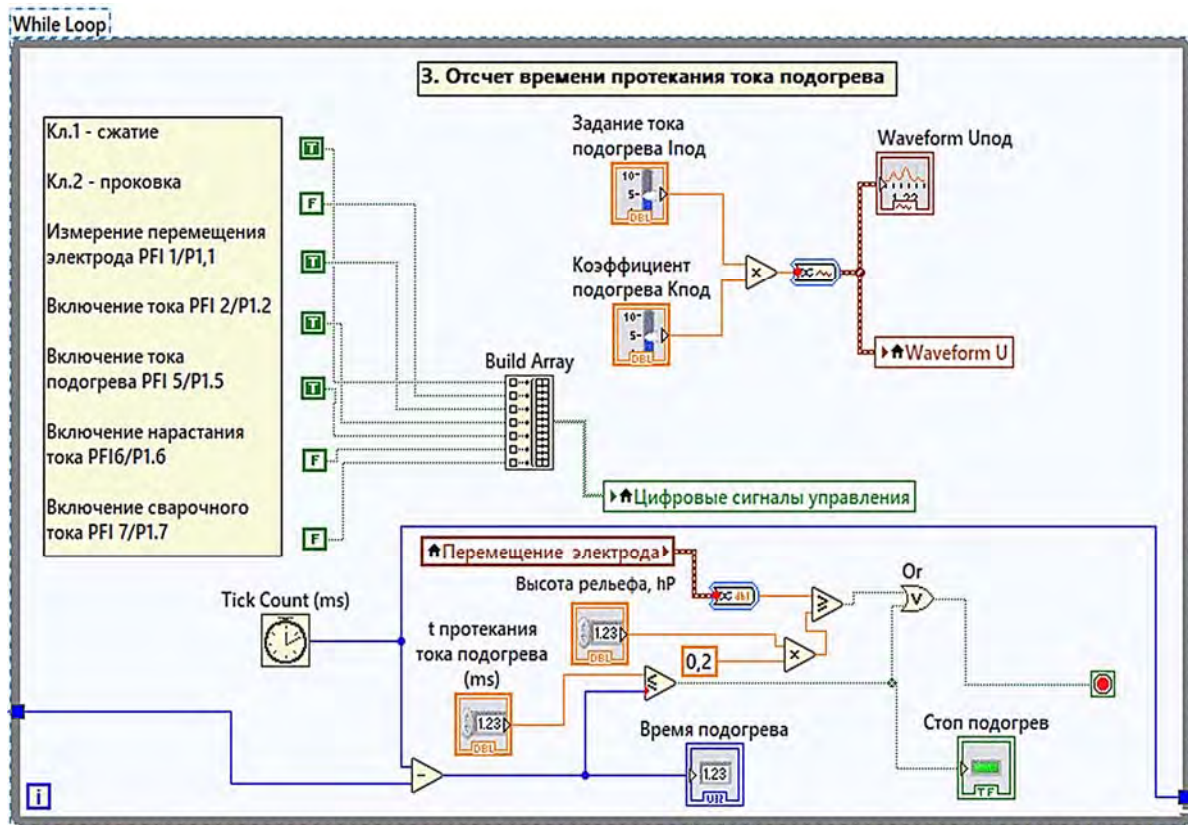


Рис. 3. Блок отсчета времени протекания тока подогрева

Величина тока подогрева $I_{под}$ может изменяться в зависимости от отклонения величины усилия сжатия электродов $F_{св}$ от оптимального значения, что учитывается с помощью коэффициента

подогрева $K_{под}$.

Нормальное окончание цикла подогрева происходит при достижении перемещения электрода величины $h_{эл} = 0,2h_p$, где h_p – заданная высота

рельефа. Степень деформации рельефа до 20 % указывает на его достаточный разогрев и возможность продолжения цикла сварки.

Величина напряжения управления при подогреве «Waveform Uпод» передается в следующий блок программы и используется для формирования общей осциллограммы «Waveform U» сигнала управления U_y тиристорного регулятора мощности ТРМ-1М.

Блок управления временем нарастания тока от подогрева до максимального сварочного представлен на рис. 4. Время нарастания тока может

определяться двумя способами. В первом случае задается конкретная величина сварочного тока $I_{св}$, при достижении которой нарастание прекращается, при этом скорость изменения тока определяется коэффициентом датчика скорости $K_{дс}$, зависящим от соотношения заданного и измеренного значений скорости перемещения $v_{эл}$ подвижного электрода. Во втором случае рост тока завершается при достижении критической скорости перемещения электрода $v_{эл} = 10$ мм/с, а соответствующее значение тока $I_{св}$ определяется как максимальное при дальнейшем его протекании.

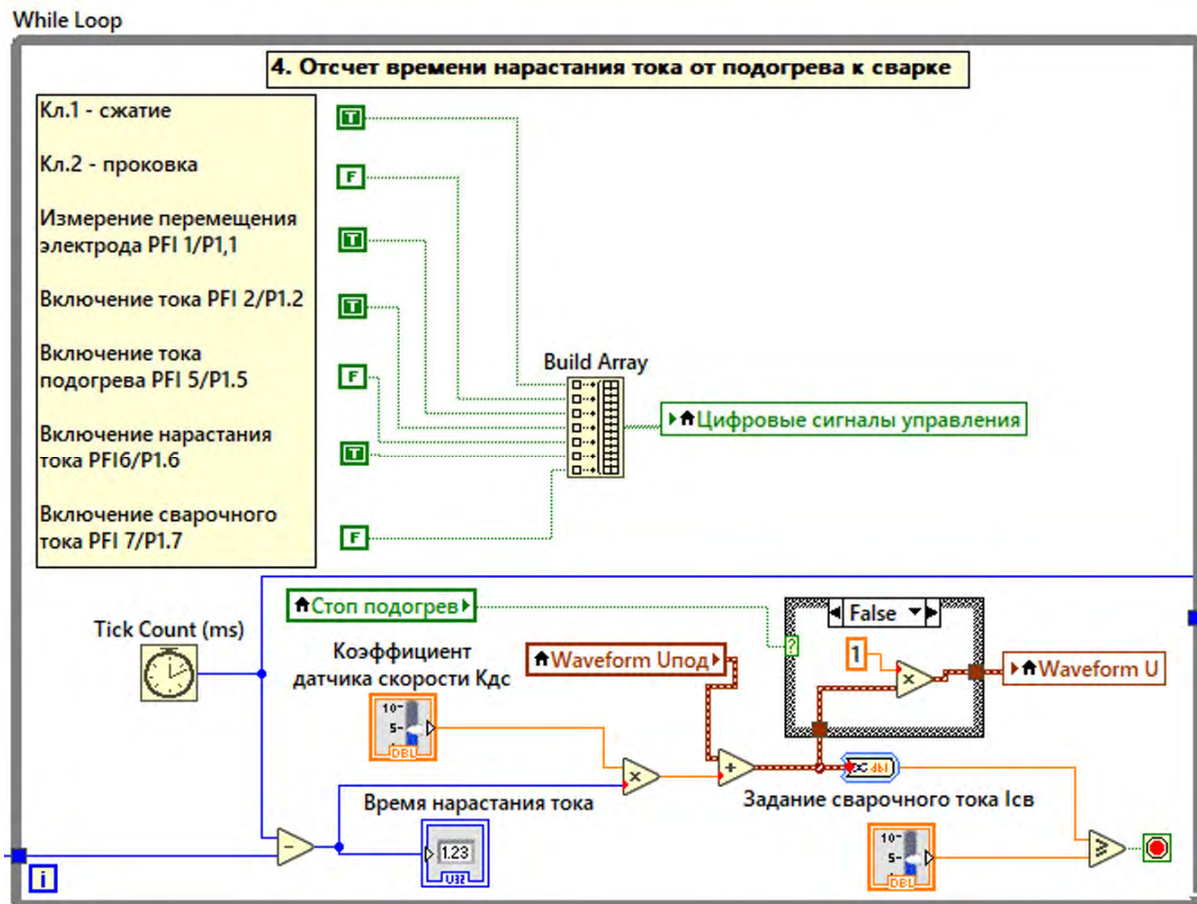


Рис. 4. Блок управления нарастанием тока от подогрева к сварке при задании величины сварочного тока $I_{св}$

В серийных регуляторах контактной сварки время включения повышенного усилия проковки отсчитывается от

момента включения сварочного тока. При этом если повышенное ковочное усилие прикладывается значительно

раньше выключения сварочного тока, возможно появление таких дефектов сварного соединения, как полный или частичный непровар, недостаточные размеры литой зоны, чрезмерные вмятины от электродов, большие зазоры между свариваемыми деталями.

Если включение повышенного ковочного усилия запаздывает, возможно появление растягивающих остаточных

напряжений, приводящих ко внутренним трещинам в околошовной зоне, и раковин в литом ядре.

Для учета инерционности пневмопривода момент включения повышенного ковочного усилия $F_{ков}$ определяется достижением перемещения электрода величины $h_{эл} = 0,6h_p$ (рис. 5).

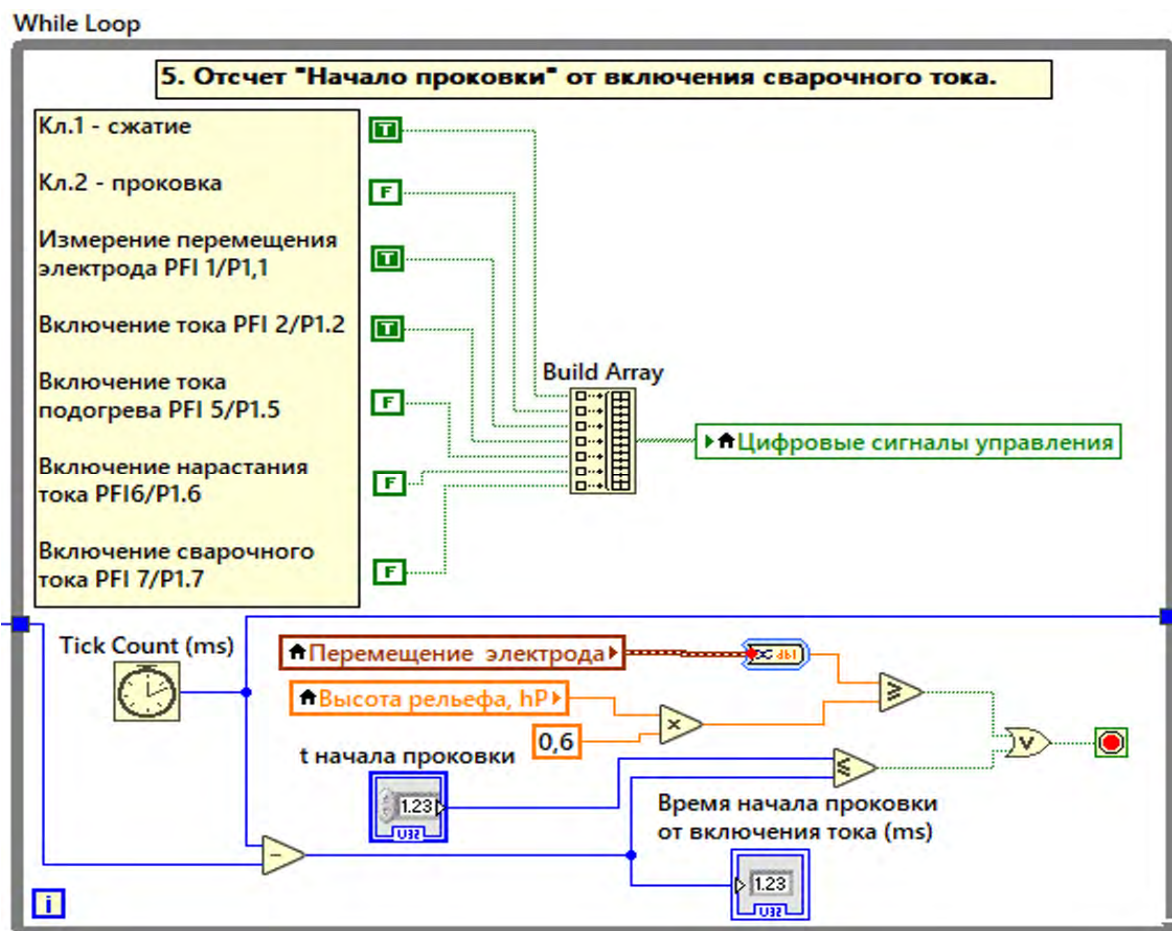
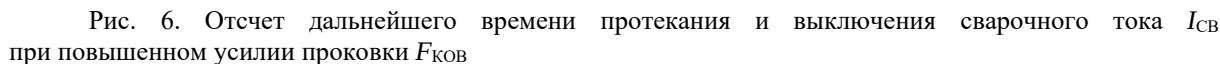


Рис. 5. Отсчет времени включения повышенного усилия проковки $F_{ков}$ от начала протекания сварочного тока $I_{св}$

Отсчет дальнейшего времени протекания сварочного тока $I_{св}$ при повышенном усилии проковки $F_{ков}$ обеспечивается блоком, представленным на рис. 6. Выключение сварочного тока $I_{св}$ происходит при достижении величины перемещения электрода 100 % от высоты рельефа: $h_{эл} = h_p$.

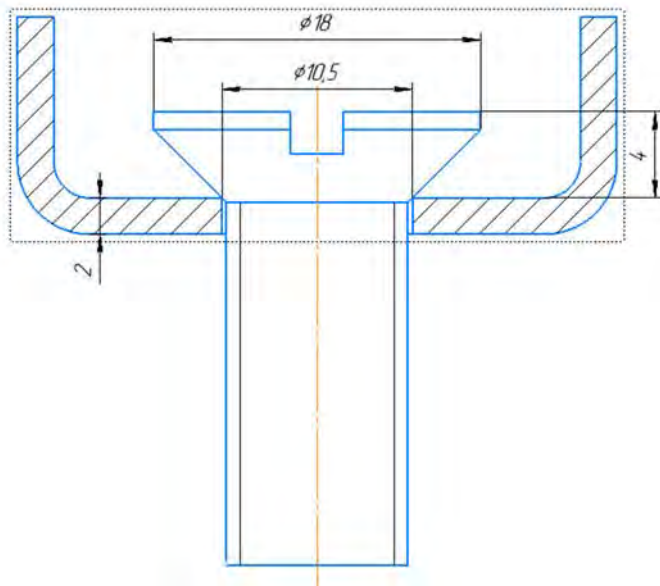
Таким образом, соблюдается основное условие оптимального хода процесса рельефной сварки – исключение шунтирования сварочного тока по околошовной зоне при полной деформации рельефа и соприкосновении деталей по большой площади, а также повышается эффективность проковки соединения.



Для рельефной сварки соединения «винт + пластина» порога рамы нижней кабины лифта (рис. 7, а) был разработан специальный нижний электрод из

Машиностроение

а)



б)

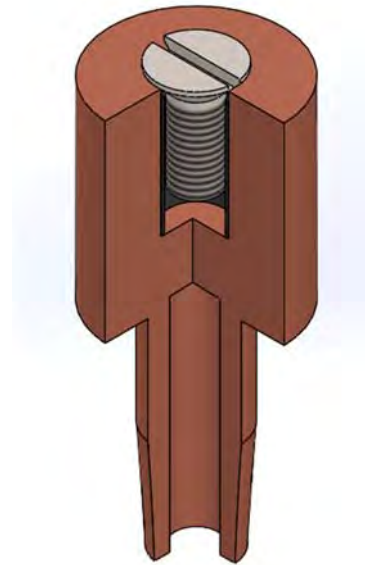


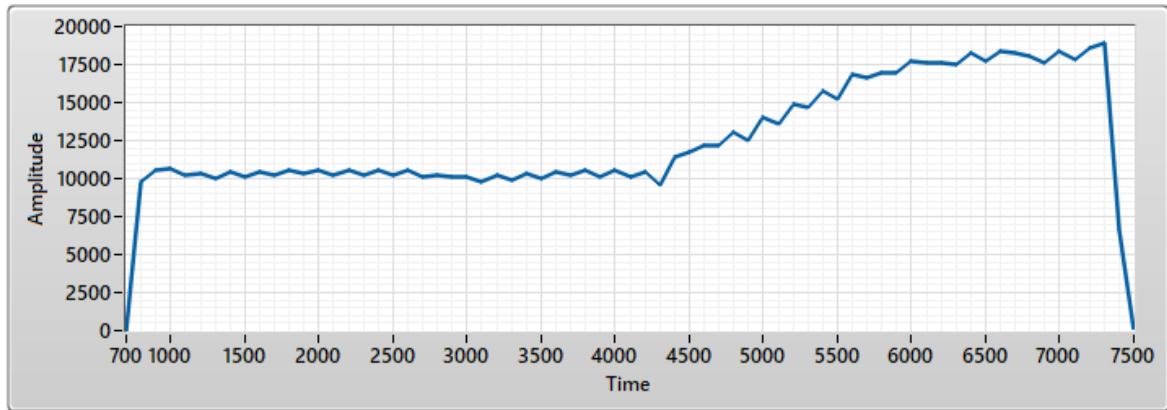
Рис. 7. Узел порога рамы нижней кабины лифта: а – вид соединения «винт + пластина» в разрезе до сварки; б – специальный нижний электрод

Экспериментальная апробация системы адаптивного управления позволила установить следующие оптимальные параметры режима рельефной сварки соединений типа «винт + пластина»: диаметр отверстия в пластине $D = 10,5$ мм; высота рельефа $h_r = 2,2$ мм; ток подогрева $I_{\text{под}} = 9,5 \dots 10,5$ кА; сварочный ток $I_{\text{св}} = 17,5 \dots 19$ кА; время подогрева $t_{\text{под}} = 0,33 \dots 0,38$ с; мощность при подогреве $P_{\text{под}} = 11 \dots 13$ кВт; время нарастания тока $t_n = 0,15$ с; время протекания сварочного тока $t_{\text{св}} = 0,16 \dots 0,19$ с; мощность при сварке $P_{\text{св}} = 25 \dots 29$ кВт; затрачиваемая энергия нагрева зоны «электрод – электрод» $Q_{\text{ээ}} = 11 \dots 12$ кДж; усилие сжатия электродов $F_{\text{св}} = 5900$ кН; время проковки $t_{\text{ков}} = 0,5$ с; допуск осадки при подогреве $\Delta_{\text{под}} = 0,2h_r$; допуск осадки при включении повышенного усилия проковки $\Delta_{\text{ков}} = 0,6h_r$; допуск осадки при сварке $\Delta_{\text{св}} = h_r$. На рис. 8 представлены осциллограммы сварочного тока, мощности и перемещения подвижного электрода в процессе сварки.

Механические свойства улучшенного промышленного образца проверялись при испытаниях на «выдавливание». Схема испытания на «выдавливание» соединения «винт + пластина», вид образцов после испытаний и таблица значений усилий на отрыв представлены на рис. 9. Испытания на «выдавливание» – это также выявление критических нагрузок на разрыв полученного соединения, однако здесь схема несколько иная. На станине пресса устанавливается втулка (поз. 4), на нее сверху соединением вниз выставляется испытываемый узел (поз. 1 и 2). На резьбу болта сверху накручивается бобышка (поз. 3) так, чтобы осталось пространство между нижней поверхностью бобышки (поз. 3) и пластиной (поз. 1). Данное пространство является «ходом» будущего разрушения. На бобышку (поз. 3) сверху давит пуансон с постепенно повышающейся нагрузкой до момента разрушения. В момент разрушения тензодатчик установки фиксирует критическую силу и выводит результат на ЭВМ.

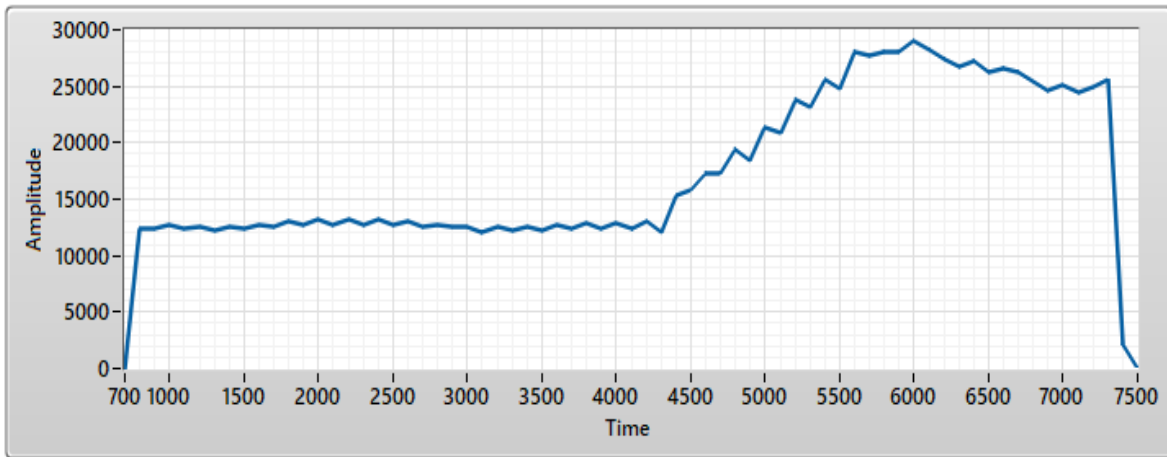
а)

Действующее значение сварочного тока $I_{св}$



б)

Действующее значение мощности $P_{св}$



в)

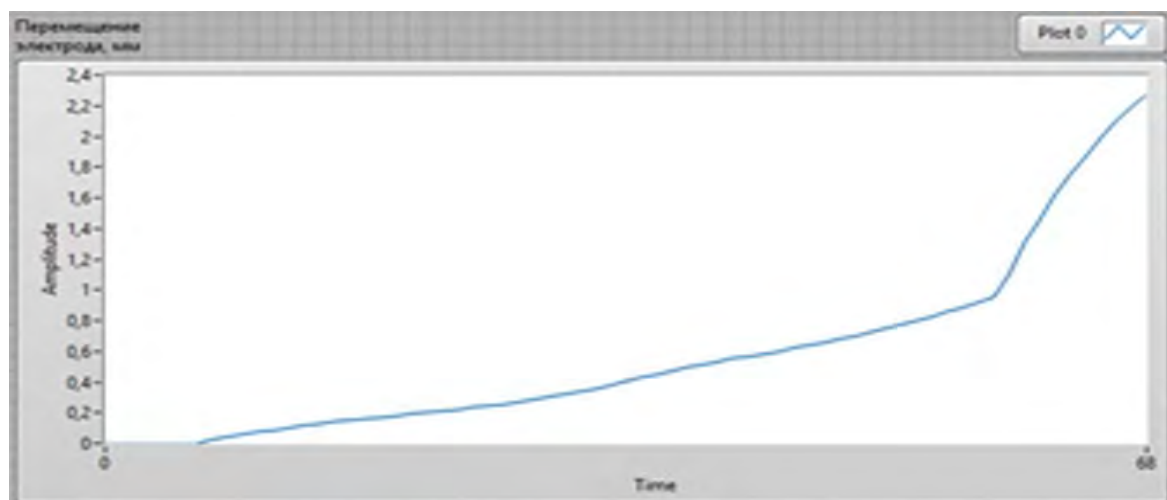
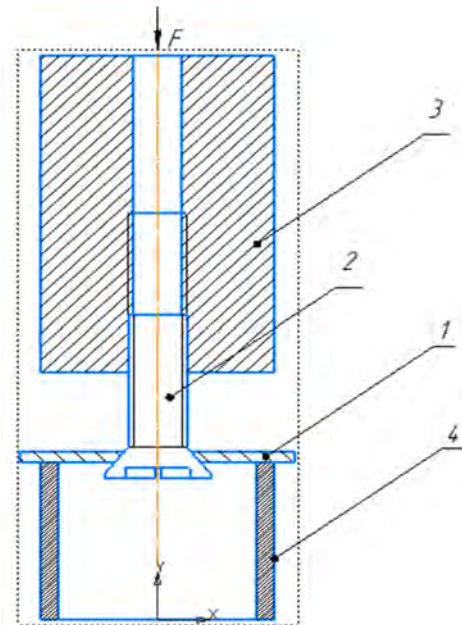


Рис. 8. Осциллограммы сварочного тока (а), мощности (б) и перемещения подвижного электрода (в) в процессе сварки

а)



б)



в)

Номер образца	Усилие отрыва $F_{отр}$, кН	Номер образца	Усилие отрыва $F_{отр}$, кН
114	9,31	119	10,10
115	19,89	120	15,03
116	13,17	121	8,31
117	16,97	122	19,07
118	8,94	123	5,0

Рис. 9. Механические испытания соединения «винт + пластина» на «выдавливание»: а – схема испытаний; б – вид образцов после испытания; в – таблица значений усилий на отрыв образцов

Среднее усилие разрушения для соединений «винт + пластина» составило около 14...15 кН при разбросе от 5 до 19,9 кН (образец № 123 с усилием отрыва 5 кН содержал критический дефект и рассматривался как единичный брак). Для большинства промышленных применений (автомобилестроение – крепление кронштейнов, кожухов, жгутов; приборостроение; бытовая техника) такая прочность достаточна, поскольку эксплуатационные нагрузки редко превышают 8...10 кН.

Важной особенностью данного технологического процесса с адаптивным управлением является то, что в

циклограмме введен отдельный этап с повышенным усилием проковки, который активируется после достижения осадки $\Delta_{ков} = 0,6h_p$. Это позволяет устранить выплески микропоры, уплотнить литую зону и повысить герметичность соединения.

Во-первых, система управления, реализованная в LabView, отслеживает текущую осадку рельефа в реальном времени. Как только осадка достигает порога ($\Delta_{ков} = 0,6h_p$), что соответствует началу активного пластического течения, инициируется увеличение усилия сжатия электродов до величины проковки. При этом сварочный ток еще

продолжает протекать в течение заданного времени, но уже под повышенным давлением. Это позволяет «заковать» зону расплава, не давая ему выплеснуться наружу. Во-вторых, окончание сварочного импульса привязано к полной осадке рельефа. Если бы ток отключался раньше, ядро не успело бы сформироваться полностью; если бы позже – избыточная энергия спровоцировала бы выплеск. Адаптивная система гарантирует, что отключение тока происходит именно в момент завершения осадки. В-третьих, этап проковки длительностью 0,5 с после отключения тока

обеспечивает остывание ядра под давлением, что дополнительно снижает риск образования усадочных пор и высоких остаточных растягивающих напряжений на финальной стадии кристаллизации.

Металлографический контроль образцов, сваренных на вышеописанном режиме, показал отсутствие следов выплесков (рис. 10) как на поверхности головки винта, так и на пластине. Литая зона имеет правильную форму, ее границы четкие, без разрывов.



Рис. 10. Макроструктура полученных соединений «винт + пластина»

Выводы

1. Таким образом, результаты экспериментальных исследований подтверждают принципиальную возможность и эффективность применения адаптивного регулирования мощности при контактной рельефной сварке Т-образных соединений, а также служат основой для разработки технологических процессов и электродной оснастки.

2. Разработанный технологический процесс контактной рельефной сварки соединения «винт + пластина» с адаптивным регулированием мощности, реализованный в среде LabView, не только

обеспечивает требуемые механические свойства (среднее усилие разрушения на отрыв составило 14...15 кН), но и снижает вероятность дефектов в виде выплеска. Отсутствие сильных выплесков, засоряющих резьбу, и стабильность процесса позволяют рекомендовать разработанную технологию для серийного производства. Это дает возможность использовать сварные узлы без дополнительной зачистки и контроля, что критически важно для автоматизированных сборочных линий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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 (84). – С. 72–80.
2. Разработка программного кода адаптивной системы регулирования мощности при рельефной сварке / С. М. Фурманов, Д. Н. Юманов, А. О. Сергейчик, Р. А. Ермоленко // Актуальные вопросы и передовые технологии сварки в науке и промышленности : сб. ст. I Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 24–25 нояб. 2022 г. – Могилев : Бел.-Рос. ун-т, 2022. – С. 215–220.
3. Графическое программирование системы адаптивного управления процессом рельефной сварки в среде LabVIEW / С. М. Фурманов, Д. Н. Юманов, В. П. Куликов [и др.] // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 2 (79). – С. 107–117.

Статья сдана в редакцию 29 июня 2026 года

Контакты:

pochta_furm@mail.ru (Фурманов Сергей Михайлович);
sergei4ix@gmail.com (Сергейчик Антон Олегович);
antonbackpa@gmail.com (Михалюто Антон Денисович);
kirill090zte@gmail.com (Яковлев Кирилл Алексеевич);
gleb22833711@gmail.com (Чаплыгин Глеб Юрьевич).

**S. M. FURMANOV, A. O. SERGEYCHIK, A. D. MIKHALYUTO, K. A. YAKOVLEV,
G. Y. CHAPLYGIN**

DEVELOPMENT OF A RESISTANCE PROJECTION WELDING METHOD WITH ADAPTIVE SOFTWARE CONTROL OF MOVING ELECTRODE DISPLACEMENT IN A WELDING MACHINE

Abstract

An experimental setup for resistance projection welding with adaptive software control of the moving electrode displacement was developed using a MT-3201 resistance spot welding machine, a TRM-1M-U thyristor power controller, and the LabView software environment. Adaptive timing blocks were designed in LabView for the following: flow duration of the preheating current, current ramp-up from preheating to welding, the initiation of increased forging force from the moment the welding current is switched on, and the subsequent flow and shut-off of the welding current. The study focused on «screw and plate» joints used in the manufacture of passenger elevator thresholds. Experimental testing of projection welding modes was conducted, and metallographic examinations and mechanical tests were performed to assess the quality of the welded joints.

Keywords:

resistance projection welding, adaptive software control, moving electrode displacement, graphic programming, virtual welding cycle controller.

For citation:

Development of a resistance projection welding method with adaptive software control of moving electrode displacement in a welding machine / S. M. Furmanov, A. O. Sergeychik, A. D. Mikhalyuto [et al.] // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2026. – № 3 (92). – P. 74–85.