

УДК 621.791.763.2

А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, В. П. Березиенко, С. И. Лялихов

ОПТИМИЗАЦИЯ КОЛИЧЕСТВА ЭНЕРГИИ, ВВОДИМОЙ В ЗОНУ РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ ПАКЕТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

UDC 621.791.763.2

A. Y. Polyakov, S. M. Furmanov, V. P. Bereziienko, S. I. Lyalikhov

OPTIMIZATION OF THE AMOUNT OF ENERGY TO BE INPUT INTO THE ZONE OF PROJECTION WELDING OF PACKAGE JOINTS

Аннотация

Обосновано предложение использовать параметры тепловыделения, такие как мощность и энергия, для регулирования параметров режима рельефной сварки пакетных соединений с целью учета совокупности возмущающих зону сварки воздействий. Разработана методика теоретического расчета величин тепловыделения и сварочного тока для рельефной сварки пакетных соединений пластин, на основании которой определены значения полной выделяющейся энергии и тока при сварке. Предложен способ внешнего управления работой регулятора цикла сварки РКС – 801 при автоматическом регулировании параметров режима на основе анализа тепловыделения межэлектродного промежутка при рельефной сварке пакетных соединений.

Ключевые слова:

пакетное соединение, рельефная сварка, возмущающие воздействия, параметры режима, мощность и энергия, автоматическое регулирование.

Abstract

The paper substantiates the offer to use such parameters of heat generation, as power and energy, to control the parameters of conditions of projection welding of package joints with the purpose of recording the totality of influences perturbing the welding zone. The methods of theoretical calculation of magnitudes of heat generation and welding current for projection welding of plate packages are suggested. Based on these methods, magnitudes of total released energy and welding current are determined. The method of external control of the operation of RKS – 801 welding regulator in projection welding of package joints is presented, with welding conditions being automatically regulated based on the analysis of heat generation in the inter-electrode gap.

Key words:

package joint, projection welding, perturbing influences, performance parameters, power and energy, automatic control.

Рельефная сварка пакетных соединений [1] имеет некоторые особенности по сравнению с процессом получения типичных рельефных соединений из двух деталей: увеличенные в 1,5...2 раза начальные сопротивления холодных контактов на межэлектродном участке, двукратное (и более) перемещение подвижного электрода, повышенное усилие сжатия электродов и др. На зону сварки

оказывает влияние совокупность возмущающих воздействий: колебания напряжения питающей сети, изменение усилия сжатия электродов вследствие инерционности привода контактной машины, шунтирование сварочного тока после смятия рельефов по их периферии, изменение параметров вторичного контура контактной машины и др. [2]. Воздействие указанных факторов

неизбежно приводит к увеличению тепловложения в зону сварки, необходимого для формирования литой зоны требуемых размеров и формы. В производственных условиях зачастую на зону сварки могут оказывать негативное влияние и другие факторы, например, неправильный выбор параметров режима и циклограммы процесса сварки, ненадлежащая периодическая зачистка электродов, плохая подготовка поверхностей деталей перед сваркой и др. В таких условиях обеспечить стабильное качество получаемого пакетного рельефного сварного соединения крайне сложно. Определенное значение имеет и быстротечность самого процесса рельефной сварки, ввиду чего достаточно сложно осуществлять регулировку параметров режима сварки без остановки технологического процесса и снижения его производительности.

Ранее первоочередной задачей автоматического регулирования процесса рельефной сварки являлось поддержание отдельных основных параметров процесса на постоянном уровне при действии совокупности возмущений. Данная задача была частично решена посредством создания различных регуляторов: параметра произведения $(I_{св})^n \cdot \tau_{св}$ [3], параметра произведения $I_{св}^2 \cdot \tau_{св}$, сварочного тока, напряжения на электродах [4]. Однако регуляторы параметра $(I_{св})^n \cdot \tau_{св}$ недостаточно увеличивали время сварки при уменьшении сварочного тока, т. е. работали с недокомпенсацией. Регуляторы $I_{св}^2 \cdot \tau_{св}$ в ряде случаев недопустимо увеличивали длительность протекания тока, что вызывало рост зоны термического влияния в сварном соединении и уменьшало производительность сварки, причем регуляторы не компенсировали изменения рабочей поверхности электродов, усилия сжатия между ними, шунтирования и др. Регуляторы сварочного тока позволили учесть и скомпенсировать колебание напряжения питающей сети,

изменение параметров контура сварочной машины, изменение сопротивления свариваемых деталей и др., но они работали только при определенных программах изменения сварочного тока и быстродействие их могло составлять до 2,5 периодов. При этом данные регуляторы не учитывали те же возмущения, что и регуляторы параметра $I_{св}^2 \cdot \tau_{св}$. Регуляторы напряжения на электродах позволили обеспечить постоянство мощности, выделяемой в деталях при сварке, но это было возможно только при сварке единичных точек.

Для полного решения вышеуказанной задачи необходимо добиться поддержания всех параметров процесса на постоянном уровне при действии совокупности возмущений. Это представляется возможным только при введении некоторых обобщающих показателей, наглядно и численно выражающих общую картину процесса с учетом всех возмущений.

Мощность и энергия, выделяющиеся в зоне межэлектродного промежутка при контактной рельефной сварке, являются наиболее информативными параметрами данного процесса в сравнении со сварочным током, падением напряжения между электродами, длительностью протекания тока, усилием сжатия электродов и т. д. Их значения можно использовать для осуществления внешнего управления параметрами режима сварки с целью их стабилизации. Это позволит учесть все возмущения, имеющие место при рельефной сварке как обычных, так и пакетных соединений. Внешнее управление осуществляется воздействием управляющего импульса напряжения определенной величины на регулятор цикла сварки в результате программного анализа и оптимизации энергии, выделяемой в зоне сварки.

Нами предложена методика определения величины сварочного тока на основе уравнения теплового баланса для участка электрод–электрод [5]:

$$Q_{ЭЭ} = Q_T + Q_{Me} + Q_{ЭЛ}, \quad (1)$$

где $Q_{ЭЭ}$ – количество теплоты, выделяемой в пакетном сварном соединении при прохождении через него сварочного тока, Дж; Q_T – количество теплоты, расходуемое на повышение теплосодержания участка зоны образования сварного соединения, Дж; Q_{Me} – количество теплоты, отводимой из зоны пакетного соединения в более холодные слои металла, Дж; $Q_{ЭЛ}$ – количество теплоты, отводимой в электроды, Дж.

Особенностью процесса рельефной сварки является динамичное изменение площадей контактов деталь–деталь из-за осадки рельефов. Для рельефной сварки пакетных соединений трех пластин с тремя выштампованными рельефами на наружных пластинах перемещение подвижного электрода возрастает в 2 раза по сравнению с рельефной сваркой двух деталей. При прохождении импульсов сварочного тока происходит осадка рельефов на величину $h_{ЭЛ}$, а также рост диаметров контактов деталь–деталь d_K . В случае пакетного соединения трех пластин осадка рельефов продолжается до достижения перемещения, равного двойной высоте рельефа ($h_{ЭЛ} = 2h_P$), и диаметров контактов деталь–деталь, равных или превышающих диаметр рельефа d_P (рис. 1, а).

Распределение температурного поля в свариваемых деталях из низкоуглеродистых и среднелегированных сталей имеет следующие особенности.

1. Рост температуры в центральной детали определяется в большей мере тепловыделением, распространяющимся от мест ее контактирования с рельефами на наружных деталях.

2. Температура столбика металла центральной детали достигает более 1400 К благодаря концентрации линий сварочного тока по площади контактирования ее с рельефами наружных деталей и интенсивной деформации с последующим перемешиванием металлов

рельефов и центральной детали.

В связи с этим при расчете баланса энергии зоны сварки предполагается, что необходимо и достаточно рассчитывать тепловыделение в двух столбиках металла, общих для центральной и крайних деталей. Поэтому расчет составляющих теплового баланса мы производим для двух столбиков металла, объединяя их в один.

Для определения теплового баланса пластин использовали расчетную схему, представленную на рис. 1, б. Количество теплоты, необходимое для нагрева до температуры $T_{ПЛ}$ столбика металла диаметром d_K и высотой $3s$, вычисляли по следующей зависимости:

$$Q_T = \frac{\pi d_K^2}{4} \cdot 3s \cdot c_M \cdot \gamma_M \cdot T_{ПЛ}, \quad (2)$$

где s – толщина пластины, см; $3s$ – высота столбика металла, нагретого до температуры $T_{ПЛ}$, $H_{ст} = 3s$; d_K – диаметр контакта деталь–деталь, см; c_M – теплоёмкость свариваемой стали, Дж/(г·°C); γ_M – плотность материала пластин, г/см³; $T_{ПЛ}$ – температура, при которой происходит образование сварного соединения, °C.

В металле, окружающем центральный столбик, температура постепенно снижается с $T_{ПЛ}$ до комнатной. Средняя температура нагреваемого кольца шириной X_{1Me} приближается к $T_{ПЛ}/4$. Ширина кольца X_{1Me} растет с увеличением продолжительности нагрева и повышением температуропроводности свариваемого металла:

$$X_{1Me} = 4 \cdot \sqrt{a_M \cdot \tau_{CB}} = 4 \cdot \sqrt{\frac{a_M \cdot h_{ЭЛ}}{V_{ЭЛ}}}, \quad (3)$$

где a_M – коэффициент температуропроводности металла листовой детали, см²/с; τ_{CB} – время протекания тока, с; $h_{ЭЛ}$ – перемещение подвижного электрода, см; $V_{ЭЛ}$ – скорость перемещения подвижного электрода, см/с.

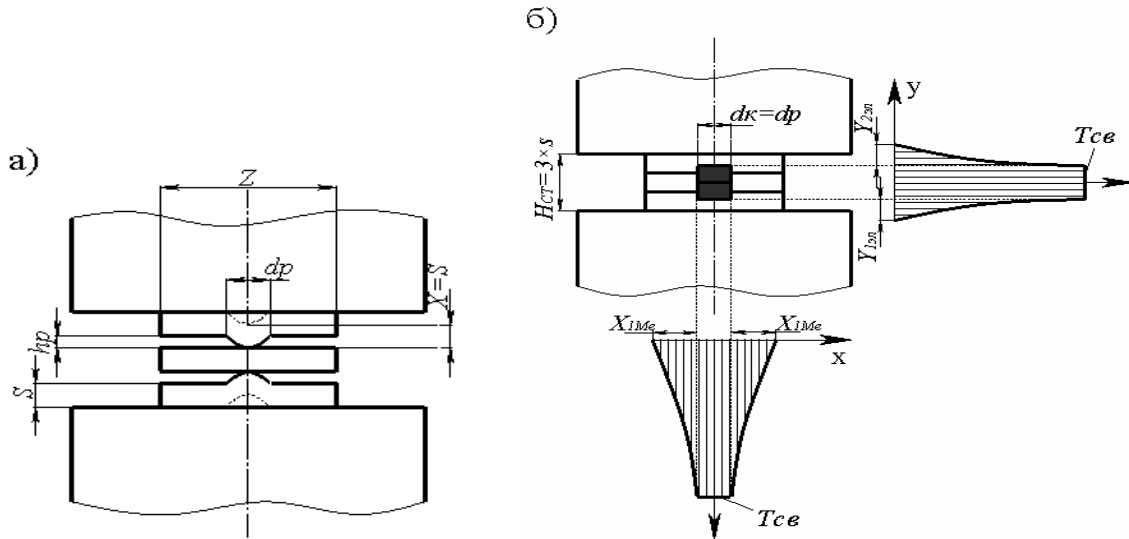


Рис. 1. Расчетная схема сварного соединения: а – геометрия соединения перед сваркой; б – схема расчета теплового баланса деталей

Теплота Q_{Me} , расходуемая на нагрев объема металла, окружающего зону сварки, до средней температуры $T_{Пл}/4$, определялась по формуле

$$Q_{Me} = 3k_1 \cdot \pi \cdot x_{1Me} \cdot (d_p + x_{1Me}) \times s \cdot c_M \cdot \gamma_M \cdot \frac{T_{Пл}}{4}, \quad (4)$$

где $3s \cdot \pi \cdot x_{1Me} \cdot (d_p + x_{1Me})$ – объем условного кольца, см³; k_1 – коэффициент, учитывающий, что действительная средняя температура кольца меньше $T_{Пл}/4$.

Потери теплоты в плоские электроды можно определить, принимая температуру на их контактной поверхности равной $T_{Пл}/2$. При этом средняя температура интенсивно нагреваемого участка электродов длиной $Y_{эл1}$ (объем $k_2 \cdot \pi \cdot d_K^2 \cdot Y_{эл1} / 4$) равна $T_{Пл} / 8$.

Область распространения теплоты в электроды определялась по формуле

$$Y_{эл1} = 4 \cdot \sqrt{a_{эл} \cdot \tau_{св}} = 4 \cdot \sqrt{\frac{a_{эл} \cdot h_{эл}}{V_{эл}}}, \quad (5)$$

где $a_{эл}$ – температуропроводность материала электродов, см²/с; $\tau_{св}$ – время протекания тока, с.

Сумма потери тепла в верхний и нижний электроды равна:

$$Q_{эл} = 2k_2 \cdot \frac{\pi \cdot d_K^2}{4} \cdot Y_{эл1} \times c_{эл} \cdot \gamma_{эл} \cdot \frac{T_{Пл}}{8}, \quad (6)$$

где k_2 – коэффициент формы электрода; $c_{эл}$ – теплоемкость материала электродов, Дж/(г·°С); $\gamma_{эл}$ – плотность материала электродов, г/см³; d_K – в данном случае взяли диаметр плоского электрода, имитирующего электродную плиту, $d_K = 5,3$ см.

Согласно, формуле (1), общее количество выделившейся теплоты при рельефной сварке трех пластин из стали толщиной 2 + 2 + 2 мм по трем парам одновременно свариваемых рельефов составило 9863,1 Дж.

Зная общее количество теплоты $Q_{ЭЭ}$, была определена средняя величина действующего сварочного тока по закону Джоуля–Ленца по формуле

$$I_{CB}^D = \sqrt{\frac{Q_{ЭЭ}}{r_{ЭЭ} \cdot \tau_{CB}}}, \quad (7)$$

где $r_{ЭЭ}$ – сопротивление межэлектродной зоны, Ом.

Для пакетного соединения трех пластин толщиной 2 + 2 + 2 мм среднее действующее значение сварочного тока для трех пар рельефов $I_{CB}^D = 26,2$ кА.

Выразим из равенства (7) закон изменения сварочного тока I_{CB}^D в зависимости от величины перемещения и скорости осадки рельефов:

$$I_{CB}^D = \frac{Q_{ЭЭ} \cdot V_{ЭЛ}}{u_{ЭЭ}^D \cdot h_{ЭЛ}}, \quad (8)$$

где $V_{ЭЛ}$ – скорость перемещения подвижного электрода, см/с; $u_{ЭЭ}^D$ – действующее значение напряжения в межэлектродной зоне, В; $h_{ЭЛ}$ – перемещение подвижного электрода, см.

Для нахождения величин $h_{ЭЛ}$, $V_{ЭЛ}$ и $u_{ЭЭ}^D$ нами использовались результаты математического моделирования и экспериментальные данные, полученные в ходе осциллографирования параметров процесса сварки [6].

Для получения экспериментальных данных была разработана установка на основе устройства сбора данных NATIONAL INSTRUMENTS (NI) и программной среды LABVIEW (LVW) (рис. 2).

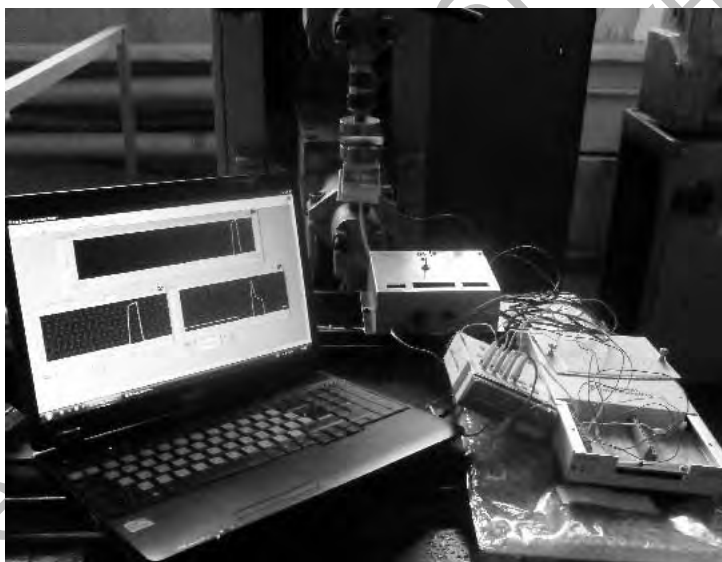


Рис. 2. Экспериментальная установка

Суть предлагаемого способа регулирования можно описать поэтапно:

1) в ходе быстротекущего процесса рельефной сварки посредством датчиков тока, напряжения и перемещения устройство сбора данных NI автоматически регистрирует мгновенные сигналы сварочного тока, напряжения межэлектродного промежутка и перемещения подвижного электрода;

2) полученные сигналы за сотые доли секунды визуализируются в про-

граммной среде LVW, представляющей собой симулятор любых физических электротехнических приборов, а в данном случае датчиков и платы NI (рис. 3);

3) с помощью специальных операторов умножения, деления, интегрирования и др. в среде LVW автоматически строятся кривые действующих значений тока, напряжения и сопротивления межэлектродного промежутка (рис. 4);

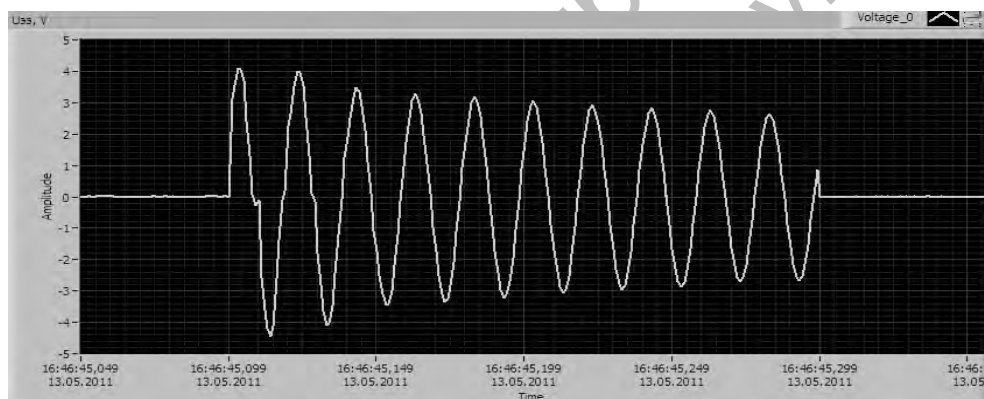
4) осуществляется построение кривых мощности и энергии зоны свар-

ки на различных стадиях осадки рельефов (рис. 5);

5) в LVW автоматически с помощью блока «Greater or Equal» (рис. 6) происходит сравнение фактических максимальных значений величин энергии или мощности зоны сварки и пороговых значений, достижение которых является неотъемлемым условием формирования соединений с полным проплавлением, соединений с частичным проплавлением либо соединений в твердой фазе. Нормированные пороговые значения мощности и энергии для рельефной сварки могут быть значительно уменьшены, т. к. прочность рельефных соединений иногда в 1,5 раза превышает прочность точечных;

б) при достижении фактических значений мощности и энергии до заданных значений устройством NI посредством среды LVW с помощью блока «Simulate Arbitrary Signal» происходит подача информационного сигнала напряжения заданной амплитуды на блок «DAQ Assistant OUTPUT», который выдает сигнал напряжения на аналоговый выход А0 устройства NI, связанный с аналоговым входом регулятора цикла сварки РКС-801. При этом можно изменять длительность импульсов тока по отдельности или их величины (при сварке пакетных соединений иногда рекомендуется многоимпульсный режим сварки).

а)



б)

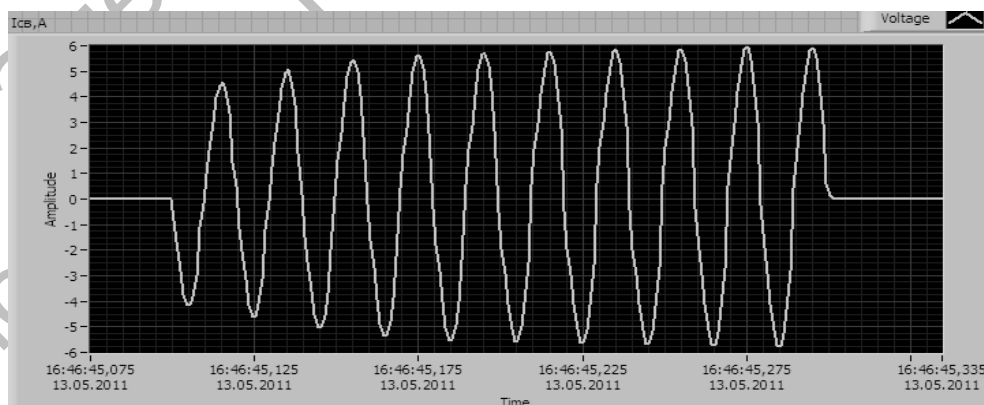
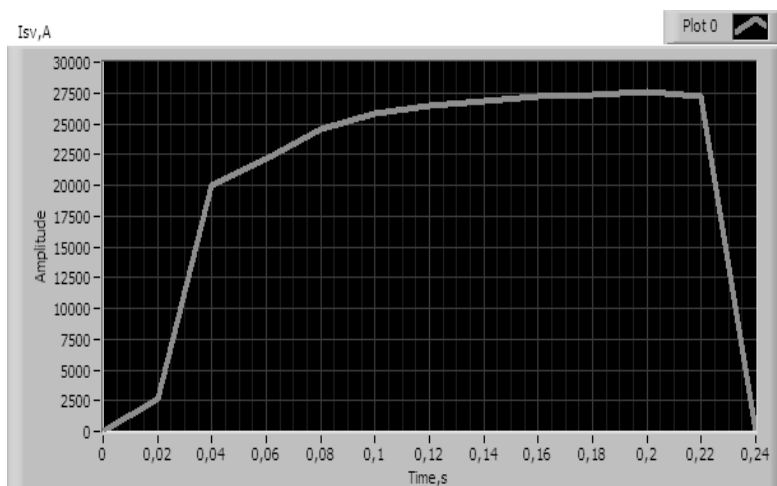
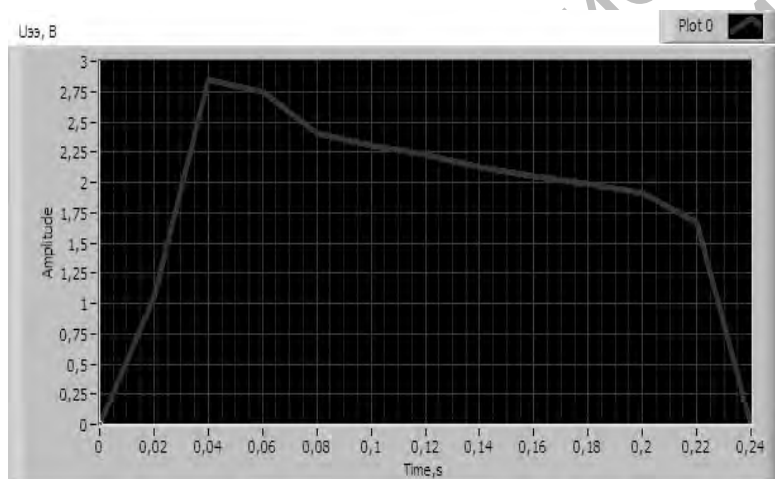


Рис. 3. Мгновенные сигналы напряжения межэлектродного промежутка (а) и сварочного тока (б)

а)



б)



в)

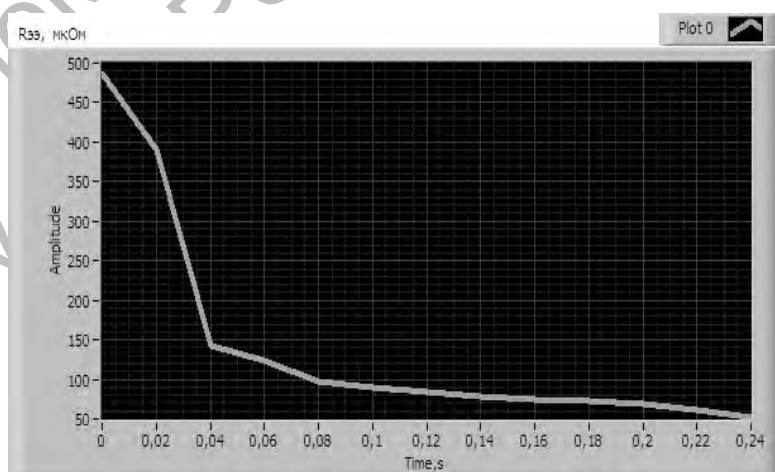
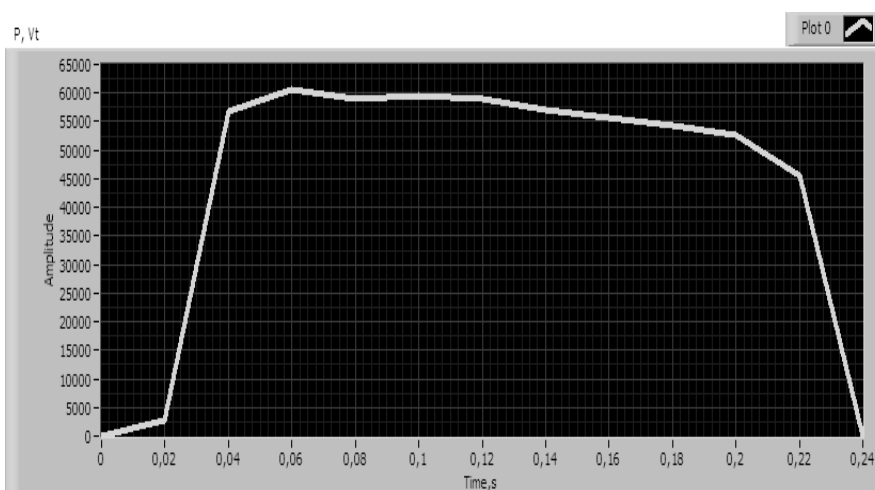


Рис. 4. Действующие сигналы тока (а), напряжения (б) и сопротивления межэлектродного промежутка (в)

а)



б)

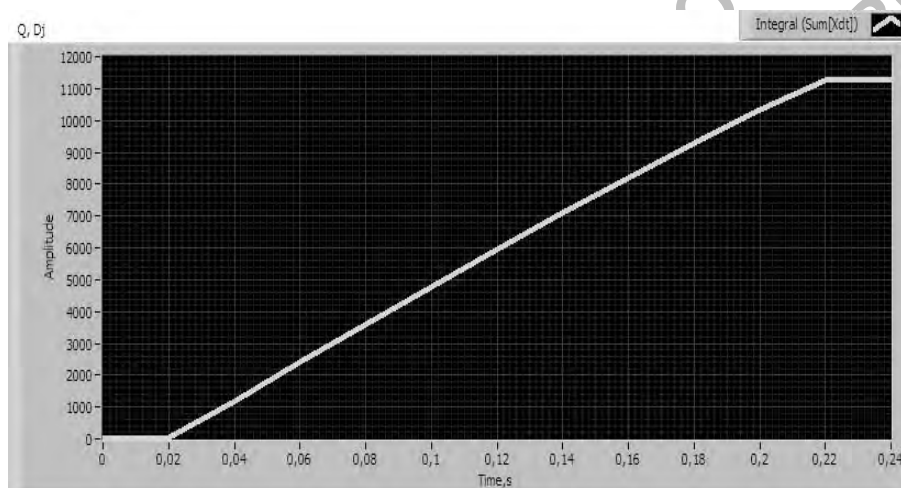


Рис. 5. Кривые мощности (а) и энергии (б), выделяемых в зоне межэлектродного промежутка

Центральным элементом программирования процесса сварки в среде LVW является виртуальная блок – диаграмма имитации физических приборов, также являющаяся и командным файлом для расчета [7] (см. рис. 6).

Управляющий сигнал напряжения величиной 1 В при необходимости с помощью виртуального усилителя увеличивается до 5...10 В. Усиленный управляющий сигнал поступает на вход регулятора цикла сварки РКС-801 и далее выключает позицию НАГРЕВ 1 регулятора. Тем самым регулируется длительность протекания первого импульса сварочного тока.

Так как устройство сбора данных NI имеет только 2 аналоговых выхода, на данном этапе исследований можно регулировать 2 параметра – длительность протекания сварочного тока и величину тока на позиции НАГРЕВ 1 регулятора (одноимпульсная сварка). При использовании в экспериментальной установке цифроаналогового преобразователя можно увеличить число аналоговых выходов платы до четырех и более, что даст возможность регулировать несколько параметров режима сварки комбинационно, например, длительность первого и второго импульсов тока по отдельности.

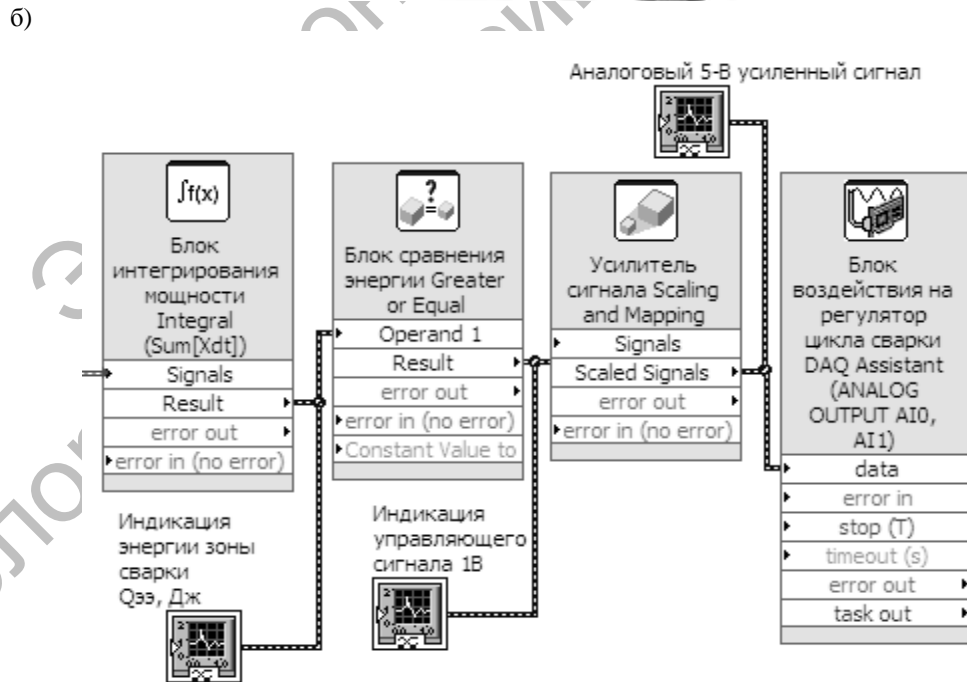
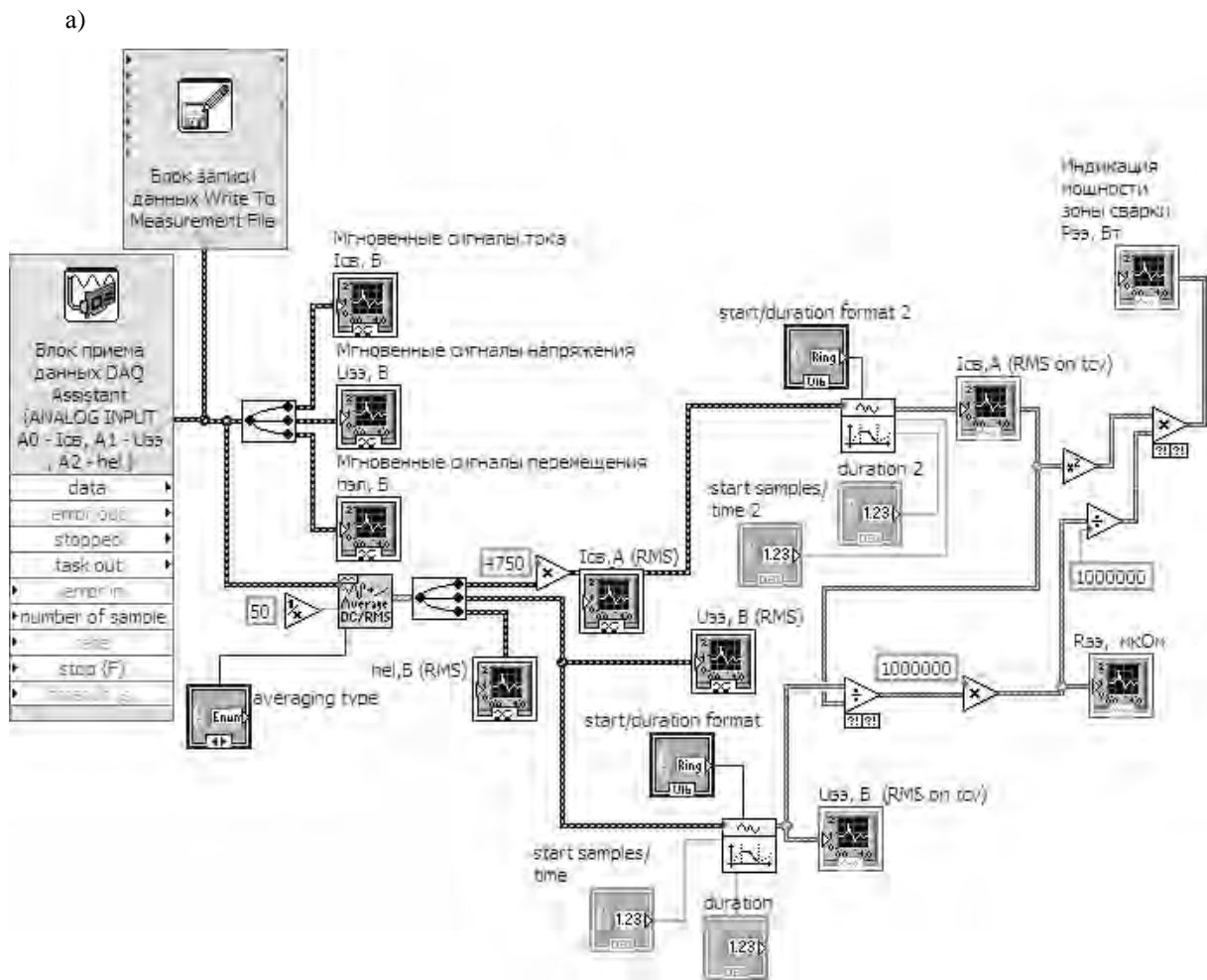


Рис. 6. Виртуальная блок-диаграмма программного расчета мощности (а), расчета и оптимизации энергии (б) зоны рельефной сварки пакетного соединения

При моделировании процесса сварки необходим анализ характера перемещения и скорости перемещения подвижного электрода, что даст возможность установить взаимосвязь между данными параметрами и энергией, выделяемой в зоне сварки на различных стадиях осадки рельефа и формирования соединения.

Таким образом, осуществляется косвенное управление величиной диаметра расплавленного ядра посредством регулирования длительности протекания сварочного тока путем оптимизации выделяющейся энергии (или мощности) в зоне сварки. При этом необходимо программно задавать сброс зафиксированных значений энергии (или мощности) от сварки к сварке для непрерывной работы системы управления.

Выводы

1. Установлено, что при рельефной сварке пакетных соединений в качестве обобщающих параметров, по которым наиболее объективно можно судить о ходе формирования соединения и изменении основных параметров режима сварки при воздействии различных возмущающих воздействий, нужно использовать показатели мощности и энергии, выделяемых на межэлектродном промежутке.

2. Разработана методика теоретического расчета энергии и ее составляющих при рельефной сварке пакетных соединений на основе уравнения

теплового баланса зоны сварки.

3. Разработана методика расчета значения полной выделившейся энергии в зоне пакетного рельефного соединения трех пластин толщиной $2 + 2 + 2$ мм и среднего значения сварочного тока, которые вводятся в систему управления для регулирования длительности протекания сварочного тока.

4. Предложен способ внешнего управления работой регулятора цикла сварки РКС-801 на основе программного анализа параметров тепловыделения в среде LABVIEW посредством устройства сбора данных NATIONAL INSTRUMENTS. Согласно предложенному способу, рассчитана кривая значений полной энергии, выделяющейся при рельефной сварке пакетного рельефного соединения трех пластин толщиной $2 + 2 + 2$ мм с тремя парами выштампованных рельефов на каждой из наружных пластин пакета. Энергия, согласно полученной кривой, плавно возрастает до максимального значения, а при достижении энергией значения теоретического расчета среда LVW вырабатывает управляющий импульс напряжения величиной до 10 В, который поступает на аналоговый вход регулятора РКС-801 и прекращает подавать управляющие сигналы в блок управления током контактной машины, тем самым регулируя длительность протекания первого импульса тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гилевич, В. А. Технология и оборудование рельефной сварки / В. А. Гилевич. – Л. : Машиностроение, 1976. – 151 с.
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. Sinclerc, P. F. Regulated resistance / P. F. Sinclerc // Welding journal, 1957. – Vol. 36, № 5.
4. Гладков, Э. А. Управление процессами и оборудованием при сварке / Э. А. Гладков – М. : Академия, 2006. — 432 с.
5. Технология и оборудование контактной сварки : учебник для машиностроительных вузов / Б. Д. Орлов [и др.] ; под общ. ред. Б. Д. Орлова. – М. : Машиностроение, 1986. – 352 с.

6. Выбор режимов контактной точечной и рельефной сварки на основе математических моделей процессов / В. П. Березиенко [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. – 2009. – № 2. – С. 21–26.

7. Курлович, И. В. Управление размерами литого ядра при контактной точечной сварке / И. В. Курлович, А. Ю. Поляков // Материалы VI межрегиональной науч.-техн. конф. – Смоленск, 2009. – С. 73–76.

Статья сдана в редакцию 20 марта 2012 года

Андрей Юрьевич Поляков, аспирант, Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0293-28-57-15.

Сергей Михайлович Фурманов, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0295-41-67-99.

Валерий Петрович Березиенко, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0295-44-11-75.

Сергей Иванович Лялихов, инженер, Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0298-46-74-57.

Andrey Yuryevich Polyakov, PhD student, Belarusian-Russian University. Tel.: 8-0293-28-57-15.

Sergey Mikhailovich Furmanov, PhD, Associate Professor, Belarusian-Russian University. Tel.: 8-0295-41-67-99.

Valery Petrovich Berezienko, DSc, Professor, Belarusian-Russian University. Tel.: 8-0295-44-11-75.

Sergey Ivanovich Lyalihov, engineer, Belarusian-Russian University. Tel.: 8-0298-46-74-57.