

УДК 621.791.763.2

А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, Б. В. Федотов, Д. Н. Юманов, М. С. Колобова

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА КОНТАКТНОЙ РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ

UDC 621.791.763.2

A. Y. Polyakov, S. M. Furmanov, B. V. Fedotov, D. N. Yumanov, M. S. Kolobova

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF ENERGY PARAMETERS OF PROJECTION WELDING

Аннотация

Предложена методика определения величины электроэнергии, потребляемой сварочной контактной машиной из сети при рельефной сварке, основанная на использовании устройства сбора данных NATIONAL INSTRUMENTS NI USB 6251 и регистратора сварочных процессов РКДП 0401. Проведен сравнительный анализ точности определения энергетических параметров процесса рельефной сварки по предложенной и известной методикам. По предложенной методике рассчитана экономия сетевой электроэнергии, потребляемой машиной МТ-3201, при рельефной сварке нахлесточных соединений пластин на энергосберегающем режиме, разработанном авторами, в сравнении с режимом, рекомендуемым в литературе.

Ключевые слова:

контактная рельефная сварка, сопротивление контура, устройство сбора данных, регистратор сварочных процессов, параметры сварочной машины, коэффициент мощности, базовый режим, энергосберегающий режим, электроэнергия.

Abstract

The paper presents the method for determining the amount of electrical energy consumed by a resistance welding machine from the mains supply during the process of projection welding, which is based on the use of the NATIONAL INSTRUMENTS NI USB 6251 data collection device and the РКДП 0401 recorder of welding processes. A comparative analysis was performed between the accuracy of determining energy parameters of the projection welding process by the proposed technique and the already known ones. Based on the proposed technique, the saving of mains electric power consumed by the МТ-3201 welding machine was calculated for projection welding of lap joints produced in the power-saving mode proposed by the authors of this paper, compared to the welding conditions recommended in the literature.

Key words:

resistance projection welding, loop resistance, data collection device, recorder of welding processes, welding machine parameters, power factor, basic mode, power-saving mode, electric power.

Сегодня в Республике Беларусь крупные промышленные предприятия, такие как ОАО «МАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАВТОМАЗ-холдинг», ОАО «Гомсельмаш», ОАО «Лифтмаш» и другие, активно модернизируют производства. Наряду с покупкой современного импортного оборудования, модернизация подразумевает внедрение ресурсо- и энергосбе-

регающих технологий. В рамках программ импортозамещения особенно актуально применение любых отечественных разработок, не уступающих зарубежным аналогам по качеству и превосходящих их в ценовом отношении.

В настоящее время в области сварочного производства стремительно развивается перспективное направле-

ние, связанное с разработкой систем автоматического управления процессами контактной рельефной сварки (далее – КРС) и точечной сварки. КРС является высокотехнологичным процессом, хорошо поддается автоматизации и обладает высокой производительностью [1, 2]. Современные аналого-цифровые, микропроцессорные устройства позволяют не только регистрировать параметры сварочного процесса для последующего анализа и внесения в него коррективов, но и воздействовать на сварочную машину в режиме реального времени по принципу обратной связи [3]. Главная задача данного воздействия – обеспечение стабильного высокого качества формируемых сварных соединений без остановки технологического цикла, второстепенная задача – снижение энергоемкости процесса КРС.

В Беларуси до нынешнего времени КРС применялась значительно реже в сравнении с дуговыми способами сварки. Основной сферой ее применения являлось производство железобетонной арматуры, малогабаритных деталей лифтов, грузовых автомобилей и сельхозтехники. В последние годы ситуация начала изменяться. В республике уже существуют предприятия по сборке легковых автомобилей: Белорусско-Британское совместное предприятие ЗАО «ЮНИСОН» (марки автомобилей Zotye, Peugeot, Citroën, Opel, Chevrolet, Samand, спецтехника на базе Mercedes-Benz), СЗАО «БелДжи» (марка Geely). При этом в соответствии с Указом № 479 Президента Республики Беларусь к 2030 г. вместо «отверточной» сборки импортных комплектующих должно быть налажено полноценное производство белорусских легковых автомобилей, в том числе и кузовов (их доля составляет 18...20 % от стоимости автомобиля) [4]. Следует отметить, что количество соединений, получаемых способами КРС и точечной сварки, составляет минимум 5000 шт. на один автомобильный кузов. Соответ-

венно, при запуске такого производства использование отечественных разработок, в том числе энерго- и ресурсосберегающих технологий КРС и точечной сварки кузовных элементов автомобилей, может привести к существенному снижению себестоимости, особенно при крупносерийном и массовом производстве.

Перспектива применения в производстве энергосберегающих технологий КРС подразумевает наличие расчетов потребления сетевой электроэнергии сварочной машиной, потребления активной мощности непосредственно на формирование сварного соединения, потерь активной мощности в сварочном контуре и трансформаторе.

В литературе по КРС имеются формулы расчета активной, реактивной и полной мощности, потребляемой сварочной машиной из сети при регулировании тока переключением ступеней трансформатора и изменением угла включения тиристорного контактора [3, 5]. Однако для осуществления подобных расчетов на практике возникают следующие трудности:

- сложность математического расчета активного сопротивления вторичной цепи контактной машины по известной методике [6], т. к. точные значения контактных сопротивлений вторичного контура не известны, а расчет активных сопротивлений отдельных элементов вторичного контура с учетом их геометрических параметров и теплофизических свойств весьма приближен (в частности, это расчет коэффициентов поверхностного эффекта и пересчет суммарного активного сопротивления вторичного контура с учетом его нагрева до температуры 70...80 °С);

- сложный характер кривой изменения сопротивления межэлектродной зоны (далее – $R_{\text{ЭЭ}}$) при КРС (в формулы обычно подставляются значения стабилизированного $R_{\text{ЭЭ}}$ в момент включения сварочного тока);

– сложность математического расчета полного индуктивного сопротивления вторичного контура при КРС (расчетные формулы для определения индуктивного сопротивления вторичного контура весьма приближительны);

– сетевое напряжение, имеющее колебания $\pm 10\%$, что вызывает соответствующие колебания напряжения холостого хода во вторичной цепи машины, значение которого необходимо подставлять в расчетные формулы;

– непосредственно в процессе КРС фактическое сетевое напряжение уменьшается приблизительно на 20...25 В по сравнению с холостым ходом в связи с потерями напряжения в сетевых кабелях и на тиристорном контакторе (например, для машины МТ-3201 на ступени № 6 напряжение, подаваемое на первичную обмотку трансформатора,

в режиме холостого хода составляет 407 В, а при КРС двух деталей толщиной 2 + 2 мм током 14,9 кА – 388 В);

– в случае использования при КРС ступенчатого импульса тока на участках его синусоиды с неполнофазным включением присутствуют интервалы выключенного состояния тиристорov, которые не должны учитываться при расчетах действующего значения сварочного тока и, соответственно, сетевого энергопотребления сварочной машины (рис. 1);

– коэффициенты мощности контактной машины на разных уровнях тока при КРС ступенчатым импульсом будут различны, т. к. стабилизированное значение R_{Σ} в процессе сварки деталей также различно при разных токах.

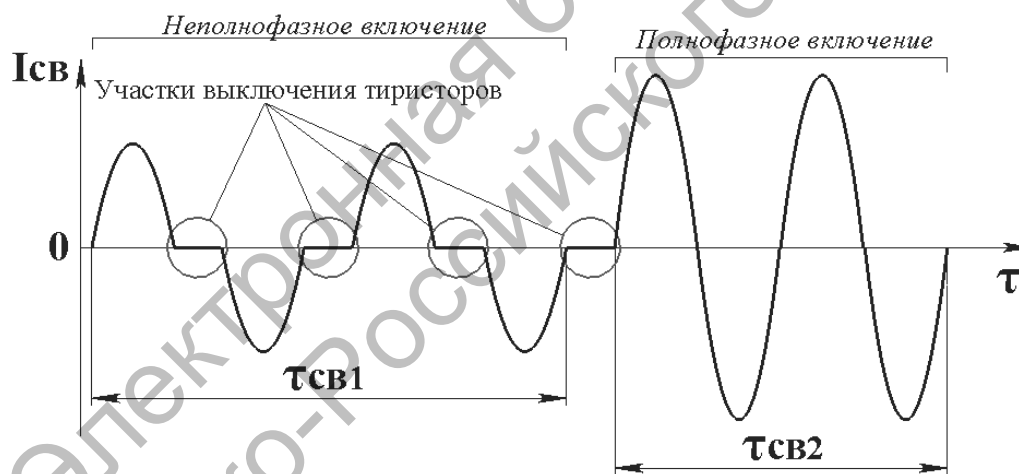


Рис. 1. Синусоидальный сигнал двухступенчатого импульса сварочного тока $I_{св}$: $\tau_{св1}$ – номинальная длительность протекания тока на первой ступени импульса; $\tau_{св2}$ – номинальная длительность протекания тока на второй ступени импульса

Авторами предложен расчет энергетических параметров процесса КРС путем регистрации необходимых сигналов с помощью высокоточных аналого-цифровых устройств сбора данных, компьютерной обработки и совмещения зарегистрированных сигналов с выделением необходимых параметров.

Процесс КРС рассматривался на

машине контактной точечной сварки МТ-3201 с электродами, имеющими увеличенную площадь контакта. В качестве свариваемых деталей принимались пластины толщиной 2 + 2 мм из низкоуглеродистой стали с одним круглым выштампованным сферическим рельефом на одной из деталей (диаметр и высота рельефа – 6 и 1,2 мм соот-

ветственно). На сварочном трансформаторе выставлялась ступень № 6 из восьми возможных.

В начале работы с помощью цифрового микроомметра MMR-610, предназначенного для измерения активных сопротивлений электрических цепей, было измерено активное сопротивление вторичного контура машины МТ-3201

($R_2 = 158 \text{ мкОм}$) (рис. 2). Активное сопротивление первичного контура составило $R_1 = 30 \text{ мОм}$. Активное сопротивление вторичного контура при коротком замыкании $R_{2к}$ определялось с учетом приведенного активного сопротивления первичной обмотки сварочного трансформатора R'_1 .



Рис. 2. Измерение активного сопротивления вторичного контура машины МТ-3201 цифровым микроомметром MMR-610

С помощью цифрового мультиметра UTB-150D в первичной цепи измерялось напряжение холостого хода ($U_{1XX} = 407 \text{ В}$).

К машине подключались:

- система автоматического управления процессом КРС (далее – САУ КРС) на базе аналого-цифрового устройства сбора данных NATIONAL INSTRUMENTS (далее – устройство NI USB 6251) и среды графического программирования LABVIEW (далее – среда LVW), позволяющая с игнорированием первоначальных настроек регу-

лятора цикла сварки контактной машины задавать многоступенчатый импульс сварочного тока и на каждом из уровней тока поэтапно дозированно вводить в межэлектродную зону определенную электрическую энергию [7, 8];

- регистратор сварочных процессов (далее – РКДП 0401), позволяющий с высокой точностью записывать и визуализировать различные сигналы процессов контактной и дуговой сварки.

Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 3.

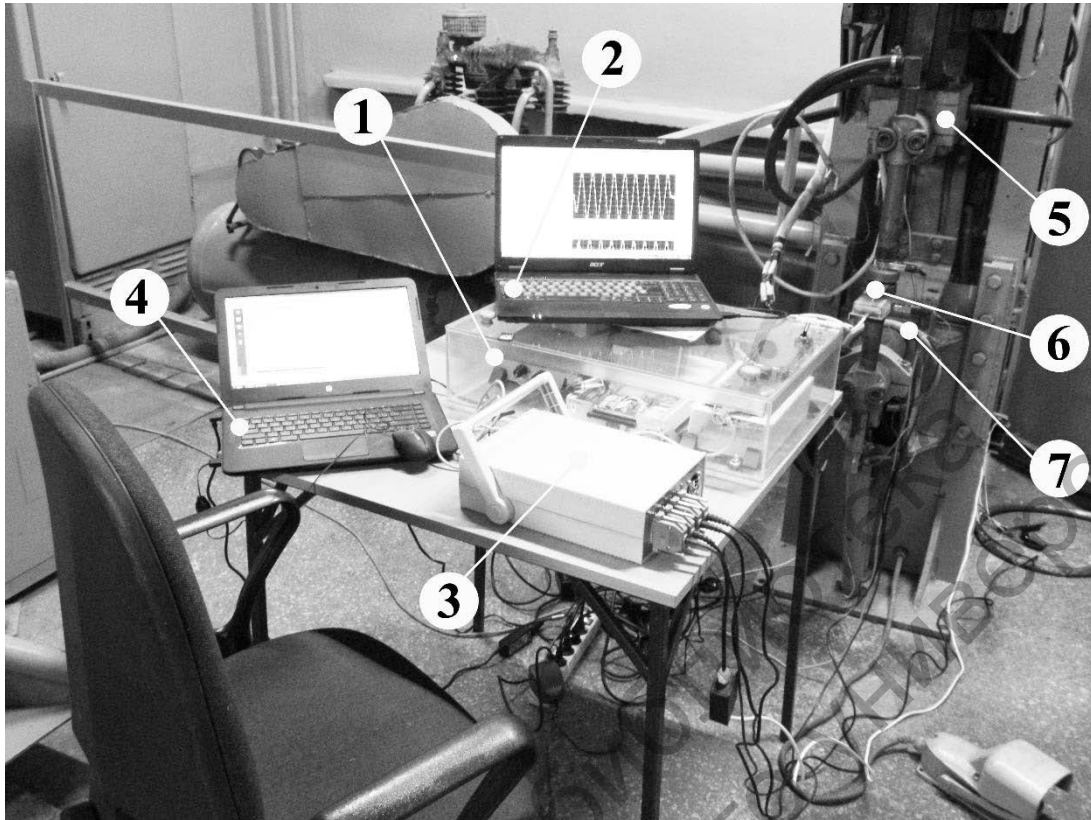


Рис. 3. Экспериментальная установка: 1 – САУ КРС на базе устройства NI USB 6251 и среды LVW; 2 – ЭВМ к САУ КРС; 3 – РКДП 0401; 4 – ЭВМ к РКДП 0401; 5 – сварочная машина МТ-3201; 6 – свариваемые детали; 7 – пояс Роговского к РКДП 0401

Режим КРС для рассматриваемых соединений, рекомендуемый в [1, 2, 9] и принимаемый за базовый: сварочный ток $I_{св} = 14,9$ кА; длительность протекания тока $t_{св} = 0,28$ с; усилие сжатия электродов $F_{св} = 3,6$ кН (размеры релье-

фа указывались выше).

С помощью экспериментальной установки были зарегистрированы параметры контактной машины в режимах холостого хода, короткого замыкания и сварки (табл. 1).

Табл. 1 Зарегистрированные параметры машины МТ-3201 (ступень № 6 трансформатора)

Параметры	Значение	Устройство регистрации
Действующее напряжение во вторичной цепи (х. х.) U_{20} , В	6,88	РКДП 0401
Действующее напряжение во вторичной цепи (к. з.) $U_{2кз}$, В	5,8	
Действующее напряжение в первичной цепи (к. з.) $U_{1кз}$, В	388	
Максимальный ток во вторичной цепи (к. з.) $I_{2кз.м}$, кА	25	
Действующий ток во вторичной цепи (к. з.) $I_{2кз}$, кА	17,1	САУ КРС, РКДП 0401
Действующий ток во вторичной цепи (сварка) I_2 , кА	14,9	
Сопротивление межэлектродной зоны $R_{ээ}$, мкОм	101	САУ КРС

Далее на основе полученных данных были рассчитаны полное сопротивление вторичного контура контакт-

ной машины, коэффициент мощности, а также пересчитан действующий сварочный ток (табл. 2).

Табл. 2. Расчетные параметры машины МТ-3201

Параметры	Значение	Формула
Коэффициент трансформации K в режиме холостого хода на ступени трансформатора № 6	59	U_{1XX}/U_{20}
Полное сопротивление вторичного контура при коротком замыкании Z_{2K} , мкОм	402	$U_{20}/I_{2K.3}$
Сопротивление первичной обмотки трансформатора, приведенное ко вторичной обмотке, R'_1 , мкОм	10	R_1/K^2
Активное сопротивление вторичного контура при коротком замыкании R_{2K} , мкОм	168	$R_2 + R'_1$
Индуктивное сопротивление вторичного контура при коротком замыкании X_{2K} , мкОм	365	$\sqrt{Z_{2K}^2 - R_{2K}^2}$
Полное сопротивление вторичного контура при сварке Z_2 , мкОм	454	$\sqrt{(R_{2K} + R_{ЭЭ}) + X_{2K}^2}$
Действующий сварочный ток I_2 , кА	15,15	U_{20}/Z_2
Коэффициент мощности $\cos \varphi$	0,59	$(R_{2K} + R_{ЭЭ})/Z_2$

Таким образом, на основании известных формул с использованием аналого-цифровых систем регистрации и обработки сигналов (САУ КРС и РКДП 0401) были определены необходимые параметры, которых достаточно для дальнейшего расчета электроэнергии, потребляемой машиной МТ-3201 из сети при КРС рассматриваемых соединений на базовом режиме (в соответствии с рекомендациями в технической литературе).

Ранее авторами был предложен энергосберегающий режим КРС, позволяющий обеспечивать прочность соединений, аналогичных рассматриваемым, при 10-кратном уменьшении величины электрической энергии, вводимой в межэлектродную зону (в сравнении с расчетным значением энергии по уравнению теплового баланса) [2, 10–14]. Параметры энергосберегающего режима КРС: двухступенчатый импульс тока; ток на первой ступени импульса $I_{CB1} = 7,5$ кА (подогревочный); ток на второй ступени импульса $I_{CB2} = 14,9$ кА (сварочный); длительность протекания тока на первой ступени импульса

$\tau_{CB1} = 0,118$ с; длительность протекания тока на второй ступени импульса $\tau_{CB2} = 0,068$ с; усилие сжатия электродов $F_{CB} = 3,6$ кН; повышенное ковочное усилие $F_{ков} = 12$ кН; длительность приложения повышенного ковочного усилия $\tau_{ков} = 1,2$ с; электрическая энергия, вводимая в межэлектродную зону током подогрева и сварочным током, $Q_1 = Q_2 = 325$ Дж.

С целью проведения сравнительного расчета энергетических параметров процесса была осуществлена КРС рассматриваемых соединений на базовом режиме (указывался выше) и на энергосберегающем режиме.

Параметры машины МТ-3201, измеренные экспериментальной установкой, представлены в табл. 3 (I_2 – действующий ток во вторичной цепи (зарегистрирован САУ КРС); I_1 – действующий ток в первичной цепи (амперметр); U_2 – действующее напряжение межэлектродной зоны (САУ КРС); U_1 – действующее напряжение в первичной цепи (РКДП 0401); α – угол открытия тиристорov (РКДП 0401); λ – длительность включенного состоя-

ния тиристоров (РКДП 0401)). Регистрация действующего тока в первичной цепи (на тиристорном контакторе) при КРС осуществлялась посредством стрелочного амперметра с трансформатором тока 600:5 (рис. 4).

По методике [3] путем совмещения кривых сварочного тока и напряжения в первичной цепи были определены

угол открытия тиристоров, длительность включенного состояния тиристоров, а также рассчитаны коэффициент мощности $\cos \varphi$, коэффициент использования полной мощности S и коэффициент полезного действия процесса η для обоих случаев КРС (табл. 4).

Табл. 3. Зарегистрированные параметры машины МТ-3201 при КРС на базовом и энергосберегающем режимах

Режим КРС	Регистрируемый параметр						
	I_2 , кА	I_1 , А	U_2 , В	U_1 , В	$R_{ЭЭ}$, мкОм	α , мс	λ , мс
Базовый режим КРС (соответствует второй ступени импульса тока энергосберегающего режима)	14,9	490	1,52	334	101	3,9	9,15
Энергосберегающий режим КРС (для первой ступени импульса тока)	7,5	250 (I_1)	1,25	250 (U_1)	132,5	5,55	6,75



Рис. 4. Регистрация тока в первичной цепи машины МТ-3201

Табл. 4. Сравнение расчетных параметров машины МТ-3201 при КРС на базовом и энергосберегающем режимах

Параметры	Значение		Формула
	Базовый режим КРС (соответствует второй ступени импульса тока энергосберегающего режима)	Энергосберегающий режим КРС (для первой ступени импульса тока)	
α , град	70,2	99,9	Пропорционально 20 мс – 360 °
λ , град	164,7	121,5	
$\cos \varphi$	0,55	0,68 ($\cos \varphi'$)	[3, табл. 2.5]
C	0,138	0,15	$U_2 I_2 / U_1 I_1$
η , %	25	22 (η')	$(C / \cos \varphi) 100$

Таким образом, погрешность экспериментального определения коэффициента мощности (при КРС конкретного соединения) по сравнению с методикой расчета, согласно табл. 2, составила 7 %.

В результате масштабирования сигналов, зарегистрированных РКДП 0401, уточнили длительность включения тиристоров в обоих случаях КРС. Номинальная длительность протекания тока при КРС на базовом режиме составила 0,28 с. Фактическая длительность включения тиристоров при таком процессе КРС составила $t_{\text{БАЗ}} = 0,267$ с (из номинальной длительности протекания тока вычли длительность участков пауз синусоиды (см. рис. 1)).

Номинальная длительность протекания тока при КРС на энергосберегающем режиме составила на первой и второй ступенях импульса 0,1182 и 0,0684 с соответственно. Фактическая длительность включения тиристоров в таком процессе КРС составила $t_{\text{ЭН1}} = 0,0846$ и $t_{\text{ЭН2}} = 0,0636$ с соответственно.

Далее для машины МТ-3201 было рассчитано потребление электроэнергии из сети Q_c при КРС на базовом и энергосберегающем режимах, а также величина сетевой электроэнергии $Q_{\text{ЭЭ}}$, затрачиваемая непосредственно на формирование сварного соединения для обоих случаев (табл. 5).

Табл. 5. Сравнение энергетических параметров процесса КРС на базовом и энергосберегающем режимах (для машины МТ-3201)

Параметры	Значение		Формула
	Базовый режим КРС	Энергосберегающий режим КРС	
Q_c , Вт·ч	12,14	4,37	$U_1 I_1 t_{\text{БАЗ}}$ – для базового; $U_1' I_1' t_{\text{ЭН1}} + U_1 I_1 t_{\text{ЭН2}}$ – для энергосберегающего
$Q_{\text{ЭЭ}}$, Вт·ч	1,67	0,62	$U_1 I_1 t_{\text{БАЗ}} \cos \varphi \eta$ – для базового; $U_1' I_1' t_{\text{ЭН1}} \cos \varphi' \eta' + U_1 I_1 t_{\text{ЭН2}} \cos \varphi \eta$ – для энергосберегающего

Таким образом, предложенный авторами энергосберегающий режим КРС нахлесточных соединений с десятикратным уменьшением электрической

энергии, вводимой в межэлектродную зону и первоначально рассчитываемой по уравнению теплового баланса, обеспечивает почти трехкратную экономию

электроэнергии, потребляемой сварочной машиной из сети в сравнении с базовым режимом.

Выводы

1. Предложена методика экспериментального определения энергетических параметров процесса контактной рельефной сварки, основанная на использовании аналого-цифрового устройства сбора данных NI USB 6251 (в составе САУ КРС) и регистратора сварочных процессов РКДП 0401.

2. Погрешность экспериментального определения коэффициента мощности при КРС конкретного изделия составила 7 % по сравнению с методикой расчета, основанной на первоначальных

замерах составляющих полного сопротивления вторичного контура контактной машины.

3. С помощью предложенной методики экспериментально установлено энергопотребление сварочной машины МТ-3201 при КРС нахлесточных соединений пластин толщиной 2 + 2 мм из низкоуглеродистой стали при сварке по одному круглому сферическому выштампованному рельефу: на базовом режиме – 12,14 Вт·ч; на энергосберегающем режиме, предложенном авторами, – 4,37 Вт·ч. Представленный энергосберегающий режим КРС обеспечивает почти трехкратную экономию электроэнергии, потребляемой сварочной машиной из сети.

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. Климов, А. С. Контактная сварка. Вопросы управления и повышения стабильности качества / А. С. Климов. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 216 с.
4. О внесении изменений и дополнений в Указ Президента Республики Беларусь от 16 января 2014 г. № 35 «О вопросах организации производства легковых автомобилей» : Указ Президента Республики Беларусь, 3 дек. 2015 г., № 479 // Нац. правовой интернет-портал Респ. Беларусь.
5. Глебов, Л. В. Устройство и эксплуатация контактных машин / Л. В. Глебов, Ю. И. Филиппов, П. Л. Чулошников. – Л. : Энергоатомиздат, 1987. – 312 с.
6. Рыськова, З. А. Трансформаторы для электрической контактной сварки / З. А. Рыськова, П. Д. Федоров, В. И. Жемерева. – Л. : Энергоатомиздат, 1990. – 423 с.
7. Способ контактной точечной и/или рельефной сварки : пат. Респ. Беларусь, МПК В 23 К 11/11 / А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, Т. И. Бендик, С. С. Короткевич, А. О. Булышко. – № 19977 (С1) ; заявл. 25.11.13 ; опубл. 30.04.16. – 2016. – 4 с.
8. Система автоматического управления процессом рельефной сварки : пат. Респ. Беларусь МПК В 23 К 11/10 / А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, Т. И. Бендик, С. С. Короткевич, А. О. Булышко. – № 10481 (U) ; заявл. 18.11.13 ; опубл. 30.12.14. – 2014. – 5 с.
9. Гуляев, А. И. Технология и оборудование контактной сварки / А. И. Гуляев. – М. : Машиностроение, 1985. – 256 с.
10. Поляков, А. Ю. Методика расчета параметров режима рельефной сварки пакетных соединений / А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, Т. И. Бендик // Вестн. Донбас. машиностроит. акад. – 2012. – № 3. – С. 226–231.
11. Поляков, А. Ю. Система автоматического управления процессом контактной рельефной сварки / А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, Т. И. Бендик // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2013. – № 4. – С. 75–84.
12. Поляков, А. Ю. Разработка технологического процесса контактной рельефной сварки пакетных соединений засовов замков / А. Ю. Поляков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2014. – № 3. – С. 56–67.
13. Поляков, А. Ю. Об обеспечении прочности соединений, получаемых способом контактной рельефной сварки, без образования литого ядра / А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, Т. И. Бендик, А. А. Степанов, М. С. Колобова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2016. – № 3. – С. 75–81.

14. **Поляков, А. Ю.** Разработка энергосберегающего технологического процесса контактной рельефной сварки кронштейна лифта по кольцевому рельефу / А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, А. А. Степанов, М. С. Колобова, Д. А. Денисов // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2016. – № 3. – С. 51–62.

Статья сдана в редакцию 15 декабря 2016 года

Андрей Юрьевич Поляков, канд. техн. наук, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет. E-mail: mortis2008@mail.ru.

Сергей Михайлович Фурманов, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. E-mail: furm@mail.ru.

Борис Владимирович Федотов, канд. техн. наук, доц., Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Тел.: +791-18-21-87-02.

Дмитрий Николаевич Юманов, аспирант, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-298-40-04-88.

Мария Сергеевна Колобова, магистрант, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-333-75-39-66.

Andrey Yuryevich Polyakov, PhD (Engineering), senior lecturer, Belarusian-Russian University. E-mail: mortis2008@mail.ru.

Sergey Mikhailovich Furmanov, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. E-mail: furm@mail.ru.

Boris Vladimirovich Fedotov, PhD (Engineering), Associate Prof., Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Phone: +791-18-21-87-02.

Dmitry Nikolayevich Yumanov, PhD student, Belarusian-Russian University. Phone: +375-298-40-04-88.

Mariya Sergeyevna Kolobova, MSc student, Belarusian-Russian University. Phone: +375-333-75-39-66.