

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.791.79

DOI: 10.26897/2687-1149-2022-6-64-69

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПОЛУЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ ПРИВАРКИ. ЧАСТЬ 2

СЕРОВ АНТОН ВЯЧЕСЛАВОВИЧ , канд. техн. наук, доцент¹av_serov@vk.com ; <https://orcid.org/0000-0001-6114-7354>**ЛАТЫПОВ РАШИТ АБДУЛХАКОВИЧ**, д-р техн. наук, профессор²latipov46@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9988-2765>**БУРАК ПАВЕЛ ИВАНОВИЧ**, д-р техн. наук, доцент³

paveliburak@gmail.com

СЕРОВ НИКИТА ВЯЧЕСЛАВОВИЧ, канд. техн. наук³n.serov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7676-4344>¹ Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет); 105505, Российская Федерация, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1² Московский политехнический университет; 107203, Российская Федерация, г. Москва, ул. Б. Семеновская, 38³ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Аннотация. Электроконтактная приварка (ЭКП) является перспективной ресурсосберегающей технологией получения функциональных покрытий из отходов инструментального и машиностроительного производства. Для выбора применяемых материалов, оборудования и инструментов, порядка и описания выполняемых операций (переходов), технологических режимов (параметров) необходима разработка четкой методики. С целью разработки методики получения, упрочения и восстановления деталей машин исследовались функциональные покрытия, полученные электроконтактной приваркой на установке 011-1-10 «Ремдеталь». Длительность сварочного импульса и паузы задавалась при помощи регулятора РВИ-501. Тарирование силы сварочного тока проводилось через полосу, изготовленную из меди марки ММ толщиной 5 мм, с помощью прибора ИСТ-02. Анализ сопротивления зоны соединения при ЭКП показал, что для стальной ленты У12 оптимальное значение усилия сжатия сварочных электродов на лемех плуга из стали 65Г составит 1,7 кН. Для обеспечения наибольшей производительности процесса ЭКП и полного перекрытия сварочных площадок (с учётом взаимного перемещения электродов и детали) представлены зависимости, позволяющие назначать для всех схем и вариантов оборудования основные параметры электроконтактной приварки: силу сварочного тока, время его протекания и паузу между импульсами, усилие сжатия сварочных электродов, скорость приварки, коэффициенты перекрытия сварочных точек, расход охлаждающей жидкости. Рассмотрено их влияние на протекание процесса и качество получаемых покрытий. Представленный алгоритм расчёта и назначения режимов приварки позволяет упростить использование технологии и повысить качество получаемых покрытий за счёт минимизации брака, возникающего вследствие ошибок при назначении параметров приварки. Алгоритм может быть использован в машиностроительном и, в частности, ремонтном производстве при проектировании технологических процессов получения функциональных покрытий при упрочнении и восстановлении деталей машин.

Ключевые слова: функциональные покрытия, назначение параметров режима электроконтактной приварки, сила сварочного тока, пауза между импульсами, усилие сжатия сварочных электродов, скорость приварки, коэффициенты перекрытия сварочных точек

Формат цитирования: Серов А.В., Латыпов Р.А., Бурак П.И., Серов Н.В. Технологические процессы получения функциональных покрытий методом электроконтактной приварки. Часть 2 // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 6. С. 64-69. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-64-69>.

© Серов А.В., Латыпов Р.А., Бурак П.И., Серов Н.В., 2022



ORIGINAL PAPER

TECHNOLOGICAL PROCESSES OF OBTAINING FUNCTIONAL COATINGS BY ELECTRIC CONTACT WELDING. PART 2

ANTON V. SEROV , PhD (Eng), Associate Professor¹av_serov@vk.com ; <https://orcid.org/0000-0001-6114-7354>**RASHIT A. LATYPOV**, DSc (Eng), Professor²latipov46@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9988-2765>

PAVEL I. BURAK, DSc (Eng), Associate Professor³

paveliburak@gmail.com

NIKITA V. SEROV, PhD (Eng)³

n.serov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7676-4344>

¹ Bauman Moscow State Technical University; p 1, 5, 2nd Baumanskaya Str., Moscow, 105505, Russian Federation

² Moscow Polytechnic University; 16, Avtozavodskaya Str., 111280, Moscow, Russian Federation

³ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., 127434, Moscow, Russian Federation

Abstract. Electric contact welding (ECW) is a promising resource-saving technology for obtaining functional coatings from the waste of tool-making and machine-building production. A clear methodology is a pre-requisite for selecting the materials, equipment, and tools used; stating the order and describing the operations (transitions) performed; and choosing technological modes (parameters). To develop a technique for obtaining, strengthening, and restoring machine parts, the authors studied functional coatings obtained by electric contact welding at the 011-1-10 “Remdetal” installation. The duration of the welding pulse and pauses was set using the RVI-501 controller. The welding current strength was calibrated through a strip made of 5 mm thick copper grade with the welding current meter IST-02. Based on the analysis of the ECW zone resistance, the authors found that, for the steel belt U12, the optimal value of the compression force of the welding electrodes on the plowshare made of 65G steel will be 1.7 kN. To ensure the highest efficiency of the ECW process and complete overlap of welding sites, and taking into account the mutual movement of electrodes and parts, the authors present the relationships that help pre-set the main parameters of electrical contact welding for all circuits and equipment options: the strength of welding current, its flow time and the pause between pulses, the compression force of welding electrodes, welding speed, overlap coefficients of welding points flow rate of the cooling liquid and their influence on the process flow and the quality of coatings obtained. The presented algorithm can be used in machine-building production and, in particular, repair production for designing technological processes of obtaining functional coatings during the hardening and restoration of machine parts.

Keywords: functional coatings, parameter settings for electric contact welding mode, welding current, pulse interval, welding electrode clamping force, welding speed, welding point overlap ratios

For citation: Serov A.V., Latypov R.A., Burak P.I., Serov N.V. Technological processes of obtaining functional coatings by electric contact welding. Part 2. Agricultural Engineering (Moscow), 2022; 24(6): 64-69. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-64-69>.

Введение. При проектировании технологических процессов получения функциональных покрытий электроконтактной приваркой необходимы выбор, расчет и назначение материалов, оборудования, инструментов, приспособлений и технологических параметров (режимов), влияющих на свойства и качество получаемых данным методом покрытий^{1,2} [1-7].

На механические и эксплуатационные свойства функциональных покрытий, получаемых электроконтактной приваркой (ЭКП), влияют контролируемые (задаваемые) и неконтролируемые (незадаваемые) факторы.

Неконтролируемые факторы – это температура, влажность и давление окружающей среды, температура холодной сетевой воды, величина, стабильность и частота напряжения в сети электроснабжения установки.

К контролируемым факторам, задаваемым в процессе приварки, относятся: сила сжатия сварочных электродов, задаваемая давлением в пневмоцилиндрах сварочной головки; сила сварочного тока; время протекания импульса сварочного тока и паузы между импульсами; подача или скорость движения подачи сварочных электродов (заготовки) в зависимости от схемы процесса ЭКП; величина расхода охлаждающей жидкости (сетевой холодной воды); скорость сварки, которая так же, в зависимости от схемы процесса и типа используемого оборудования, задаётся частотой вращения заготовки в случае обработки тел вращения либо скоростью продольной подачи заготовки относительно электрода (или наоборот) при обработке плоских деталей [8]. Именно контролируемые параметры оказывают наибольшее влияние на свойства и качество получаемых покрытий и являются параметрами режима приварки. Их

рациональный и обоснованный выбор на основе накопленного экспериментального опыта и проведённых теоретических исследований позволит управлять свойствами (программировать) и качеством получаемых функциональных покрытий. Для расчёта основного времени приварки, используемого для оценки экономических показателей процесса ЭКП, необходимо определение производительности процесса.

Цель исследований: разработка методики выбора, расчета и назначения параметров режима ЭКП при проектировании технологических процессов упрочения и восстановления деталей машин.

Материалы и методы. Исследование проводилось на оборудовании «011-1-10» производства ВНПО «Ремдеталь». Определение величины сварочного тока осуществлялось измерителем сварочного тока ИСТ-02. Длительность сварочного импульса и паузы задавалась при помощи регулятора РВИ-501. Тарирование силы сварочного тока проводили через полосу, изготовленную из меди марки ММ толщиной 5 мм.

Порядок тарировки: на сварочном регуляторе РВИ, последовательно изменяя значения тиристорного регулятора от «1» до «9», измеряли амплитудные и действующие значения силы тока, а также напряжение на сварочных электродах при прохождении тока через медную полосу и плужный лемех из стали 65Г. Величины электрического сопротивления в зоне контакта рассчитывали по формуле, определяющей напряжение вторичной цепи трансформатора: $U_2 = I_2 R$. При этом расчётное сопротивление увеличивалось с 0,00022 Ом при «1» на тиристорном регуляторе до 0,00024 Ом при установке значения «9». Измерение силы тока и напряжения при приварке ленты из стали У12 к лемеху плуга, изготовленному из стали 65Г, производилось при различных значениях тиристорного регулятора и усилия сжатия сварочных электродов, постоянном значении времени импульса $t_{\text{и}} = 0,12$ с и времени паузы $t_{\text{п}} = 0,80$ с. Значения сопротивления рассчитывались по закону Ома $U_2 = I_2 R$.

Давление воздуха в пневмоцилиндре, осуществляющем сжатие сварочных электродов, регулировалось редуктором

¹ Бурак П.И. Интенсификация электроконтактной приварки лент при восстановлении деталей: Монография. М.: МГАУ им. В.П. Горячкина, 2012. 330 с.

² Агеев Е.В., Агеева Е.В., Круляков О.В., Королев М.С. Электроэрозионный порошок, полученный из отходов сплава Т5К10: Монография. Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2022. 231 с.

установки и контролировалось по манометру ТМ-310 ГОСТ 2405-88. Определение силы сжатия электродов проводилось при помощи динамометра ДОСМ-3-10У ISO 376:2011.

Результаты и их обсуждение. Для получения качественного покрытия при ЭКП необходимо обеспечить контакт соединяемых поверхностей и их активацию. При этом процесс соединения возможен, если суммарная передаваемая энергия U больше энергии активации E_a [9]:

$$E_a \leq U = U_d + U_m + U_T, \quad (1)$$

где E_a – энергия активации, Дж; U_d – энергия, выделяющаяся (запасаемая) при пластической деформации присадочного и основного материала, Дж; U_m – энергия, образующаяся при упругой деформации соединяемых материалов, Дж; U_T – тепловая энергия, выделяющаяся преимущественно при прохождении электрического тока, Дж.

Количество теплоты Q , выделяющейся при протекании электрического тока во вторичной цепи трансформатора источника сварочного тока, определяется по формуле:

$$Q = \int_0^{t_n} I_2^2(t) R(t) dt, \quad (2)$$

где R – полное электрическое сопротивление вторичной цепи, Ом; I_2 – действующая величина силы сварочного тока во вторичной цепи трансформатора, А; t – время, с.

Величина силы сварочного тока $I_{св}$ при ЭКП рассчитывается по формуле [7]:

$$I_{св} = 4,2 d_3 \sqrt{\frac{T_k \lambda}{\eta_r \rho_s}}, \quad (3)$$

где d_3 – диаметр сварочной точки, м; λ – теплопроводность вещества, Вт/(м · К); T_k – температура в зоне соединения при приварке, К; η_r – термический коэффициент полезного действия; ρ_s – удельное электрическое сопротивление, Ом · м.

Время протекания импульса сварочного тока t_n можно определить выражением [8]:

$$t_n = \frac{K_\tau \delta h_n}{\lambda}, \quad (4)$$

где δ – толщина присадочного материала, м; h_n – глубина прогрева; K_τ – коэффициент жесткости режима (для жестко-

го режима $K_\tau = 1,5$, для среднего – 2,5, для мягкого – 4).

Расход охлаждающей жидкости при ЭКП тел вращения и плоских деталей определяется аналитическим выражением [8]:

$$G = \frac{\alpha F (T_k - t_n)}{ac(t_k - t_n) + (1-a)r} = \frac{\overline{Nu}_{жд} \lambda (T_k - t_n) \pi l}{ac(t_k - t_n) + (1-a)r}, \quad (5)$$

где t_k – температура охлаждающей жидкости после контакта с поверхностью, °С; t_n – температура воды, подаваемой из городской сети холодного водоснабжения, или другой охлаждающей жидкости, °С; r – удельная теплота парообразования, Дж/кг; α – коэффициент теплоотдачи; F – площадь поверхности, омываемой водой (охлаждающей жидкостью) при ЭКП, м²; a – доля неиспарившейся воды (охлаждающей жидкости); c – удельная теплоёмкость вещества, Дж/(кг · К); $\overline{Nu}_{жд}$ – число Нуссельта.

Число Нуссельта для тел вращения (цилиндра) –

$$\overline{Nu}_{жд} = 0,5 Re_{жд}^{0,5} Pr_{ж}^{0,38} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25}, \quad (6)$$

где $Re_{жд}^{0,5}$ – число Рейнольдса; $Pr_{ж}$ и Pr_c – число Прандтля для жидкости и стенки.

При ЭКП плоских поверхностей –

$$\overline{Nu}_{жд} = 0,664 Re_{жд}^{0,5} Pr_{ж}^{0,333} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25}. \quad (7)$$

Фактором, оказывающим влияние как на механическую, так и на тепловую (электрическую составляющую) энергию, передающуюся к зоне контакта для активации взаимодействия соединяемых поверхностей (присадочного и материала основы), является усилие сжатия электродов P , обеспечивающее прижатие присадочного материала к поверхности заготовки для обеспечения электрического контакта и пластического деформирования зоны соединения. От усилия сжатия сварочных электродов зависят протекающие процессы приварки и качество получаемых покрытий. Схема зоны контакта соединяемых поверхностей при ЭКП представлена на рисунке 1.

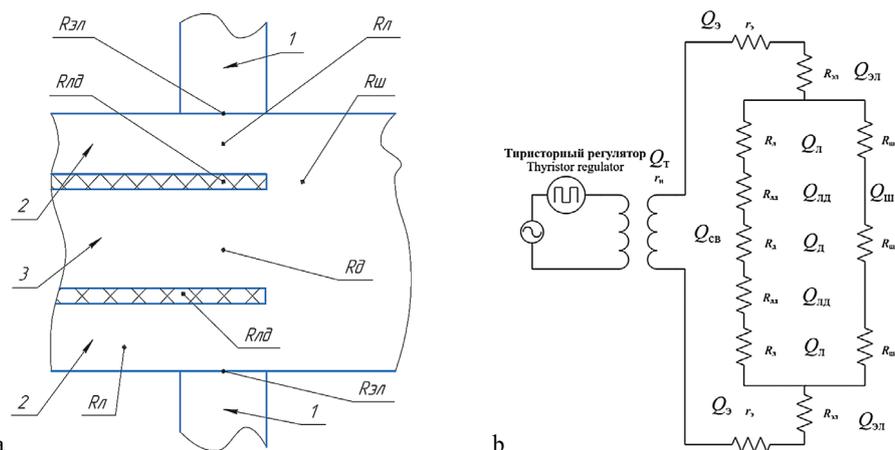


Рис. 1. Схема формирования электрического сопротивления зоны контакта (а) и расчётная схема (б):

1 – электроды; 2 – стальная лента; 3 – заготовка; $R_{эл}$ – сопротивление зоны «Электрод-заготовка»; $R_{лл}$ – сопротивление присадочного материала (ленты); $R_{лз}$ – сопротивление зоны соединения «Лента-заготовка»; $R_{лш}$ – сопротивление заготовки; $R_{д}$ – сопротивление шунта; $R_{шл}$ – сопротивление шунтирования через ленту; $R_{шз}$ – сопротивление шунтирования через заготовку; $R_{шш}$ – сопротивление шунтирования через ленту; r_s – сопротивление электродов; r_n – сопротивление вторичной обмотки трансформатора и шин

Fig. 1. Diagram of the formation of the electrical resistance of the contact zone (a) and the design scheme (b):

1 – electrodes; 2 – steel tape; 3 – part; $R_{эл}$ – resistance of the electrode- part zone; $R_{лл}$ – resistance of the filler material (tape); $R_{лз}$ – resistance of the tape – part connection zone; $R_{лш}$ – resistance of the part (workpiece); $R_{д}$ – resistance of the part; $R_{шл}$ – shunt resistance; $R_{шз}$ – shunt resistance through the tape; $R_{шш}$ – shunt resistance through the part; r_s – electrode resistance; r_n – resistance of the secondary winding of the transformer and the bus

Отметим, что в процессе ЭКП часть электрического тока вторичной цепи трансформатора шунтируется через предыдущие точки в ряду и через предыдущие ряды приварки ($R_{ш}$).

На каждом из рассматриваемых участков зоны соединения (рис. 1) будет выделяться теплота Q_i , пропорциональная сопротивлению этой зоны:

$$Q = Q_T + Q_3 + Q_{св}; \tag{8}$$

$$Q_{св} = 2Q_{эл} + 2Q_{л} + 2Q_{лд} + Q_{д} + Q_{ш}, \tag{9}$$

где Q_T , Q_3 , $Q_{ш}$, $Q_{св}$, $Q_{эл}$, $Q_{л}$, $Q_{лд}$, $Q_{д}$ – теплота, выделяемая во вторичной обмотке трансформатора (количество энергии, теряемое на реактивное сопротивление обмотки), в электродах, на шунте через соседние точки, в зоне соединения, на участке «Электрод-лента», в ленте, в зоне контакта и в заготовке соответственно, Дж.

Из представленных на рисунке 2 графиков следует, что максимальная сила тока и соответственно минимальное электрическое сопротивление зоны сварки достигаются при усилии сжатия роликовых электродов P , равном 1,7 кН. При этом дальнейшее увеличение силы сжатия снижает ток и увеличивает электрическое сопротивление. Полученный результат можно объяснить тем, что именно при этом усилии сжатия в зоне соединения выделяется достаточно тепла для активации межфазного взаимодействия основного и присадочного материалов, с образованием сварного соединения. Падение сопротивления происходит, вероятно, вследствие исчезновения зоны контакта и образования сплошного сварочного шва с сопротивлением, изменяющимся по градиенту от материала с бóльшим до материала с меньшим электрическим сопротивлением, которое меньше начального сопротивления зоны контакта этих материалов.

Рост сопротивления при дальнейшем увеличении усилии сжатия можно объяснить отсутствием схватывания поверхностей (сварки). Начальное сопротивление зоны соединения уменьшается вследствие лучшего электрического контакта увеличенной фактической площади контакта, обусловленной деформацией микронеровностей, разрушением оксидных плёнок, удалением загрязнений, и уменьшения его удельного электросопротивления. Это должно приводить к увеличению тепловыделения, интенсификации процесса схватывания поверхностей. Однако когда сопротивление зоны контакта снижается и приближается по своим значениям к сопротивлению основного и присадочного металлов, тепловыделение не локализуется в зоне соединения, а рассеивается во всём объёме материалов, находящихся между электродами установки. В результате для схватывания материалов становится недостаточно теплоты, выделяющейся непосредственно в зоне сварки. Следовательно, и дальнейшее падение электросопротивления не происходит.

Фактором, оказывающим влияние на количество тепловой энергии, выделяемой и затрачиваемой, в том числе, на образование соединения, является время протекания сварочного импульса тока t_n . При ЭКП за время прохождения импульса тока t_n происходит взаимное перемещение электродов и заготовки l_n , поэтому площадь зоны контакта, через которую ток проходит в течение всего времени t_n , будет уменьшаться пропорционально скорости сварки. С учётом взаимного перемещения электрода и заготовки площадь сварочной точки будет равна удвоенной площади сегмента окружности (эллипса), отсекаемого общей хордой пересекающихся сварочных точек в начале протекания импульса тока и в его конце (рис. 3).

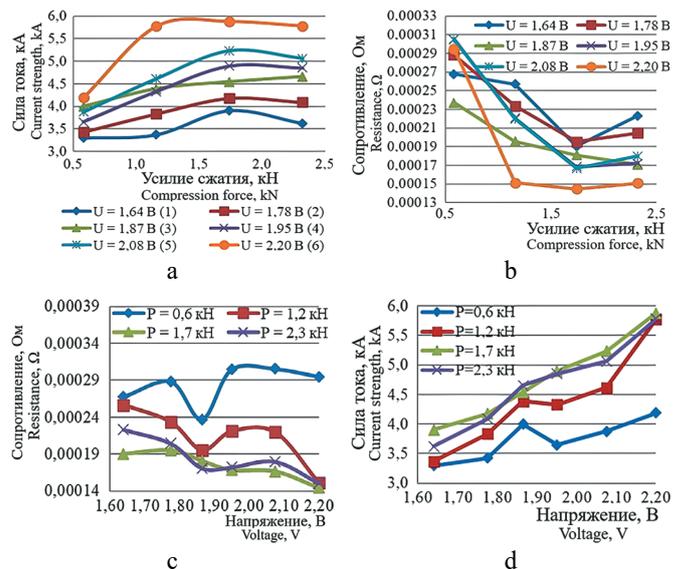


Рис. 2. Влияние усилии сжатия электродов на параметры ЭКП: а – на силу сварочного тока; б – на сопротивление зоны соединения; с – влияние установленной силы сварочного тока на характер изменения электрического сопротивления зоны соединения; д – вольтамперная характеристика зоны «Электрод-заготовка-присадочный материал-электрод»

Fig. 2. Effect of the compression force of the electrodes on the parameters of electric contact welding (ECW):

- a) the effect of the compression force on the strength of the welding current;
- b) the relationship between the resistance of the connection zone and the compression force of the electrodes;
- c) the effect of the installed welding current on the nature of changes in the electrical resistance of the connection zone;
- d) the voltage-current characteristic of the “electrode-part-part-electrode zone”

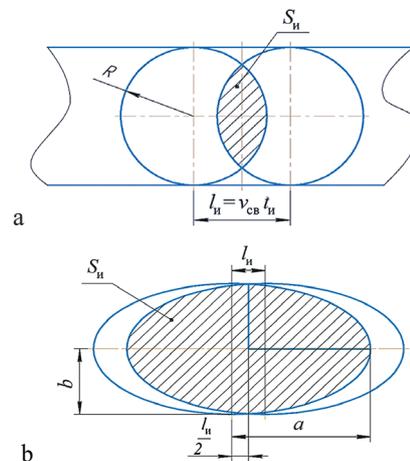


Рис. 3. Геометрические параметры сварочной точки округлой (а) и эллиптической формы (б):

- S_n – площадь присадочного материала, через которую ток проходит в течение всего импульса; l_n – взаимное перемещение электрода и заготовки за время импульса в направлении главного движения; $v_{св}$ – скорость сварки; t_n – продолжительность импульса сварочного тока; R – радиус сварочной точки; a и b – большая и малая полуоси эллипса, описанного вокруг сварочной точки
- Fig. 3. Geometric parameters of the rounded welding point (a) and the elliptical shape (b):**
- S_n – the area of the filler material through which the current passes during the entire pulse; l_n – mutual movement of the electrode and the workpiece during the pulse in the direction of the main movement; $v_{св}$ – welding speed; t_n – duration of the welding current pulse; R – radius of the welding point; a and b – the major and minor semi-axes of the ellipse described around the welding point

С учётом этого производительность процесса электроконтактной приварки W при взаимном перемещении электродов и заготовки за время протекания импульса сварочного тока с заданными коэффициентами перекрытия сварочных точек в ряду $k_{\text{Пн}}$ и между рядами приварки $k_{\text{ПС}}$ можно рассчитать по формуле [9]:

$$W = \frac{k_{\text{Пн}} d_{\text{т}} k_{\text{ПС}} d_{\text{т}}}{t_{\text{н}} + t_{\text{п}} k_{\text{Пн}}} = \frac{k_{\text{Пн}} k_{\text{ПС}} d_{\text{т}}^2}{t_{\text{н}} + t_{\text{п}} k_{\text{Пн}}}, \quad (10)$$

где $d_{\text{т}}$ – диаметр приваренной точки или ширина валика приварки (2b), мм; $t_{\text{н}}$ – время паузы, с.

Зная производительность W , можно найти основное время при ЭКП:

$$T_0 = \frac{A}{60 \cdot W}, \quad (11)$$

где A – площадь наносимого покрытия, мм².

Для нахождения коэффициента $k_{\text{ПС}}$, при котором будет обеспечиваться полное перекрытие сварочных точек при различных коэффициентах $k_{\text{Пн}} \neq k_{\text{ПС}}$, необходимо воспользоваться следующими выражениями:

$$k_{\text{ПС}} = \sqrt{1 - k_{\text{Пн}}^2}; \quad (12)$$

$$k_{\text{Пн}} = \sqrt{1 - k_{\text{ПС}}^2}. \quad (13)$$

Максимальная производительность процесса ЭКП будет достигаться при таком коэффициенте перекрытия $k_{\text{Пн}}$, при котором экстремум функции (6) будет равен нулю. Подставив (13) в (11), получим

$$W' = d_{\text{т}} \left(\frac{k_{\text{Пн}} \sqrt{1 - k_{\text{Пн}}^2}}{t_{\text{н}}} - \frac{k_{\text{Пн}}}{t_{\text{п}} k_{\text{Пн}}} \right) = 0. \quad (14)$$

При решении уравнения (9) получено выражение для расчета коэффициента перекрытия $k_{\text{Пн}}$, связывающее его с временными ($t_{\text{н}}$ и $t_{\text{п}}$) параметрами процесса ЭКП:

$$k_{\text{Пн}} = \frac{2\sqrt[3]{2}(1 - t_{\text{п}}\sqrt{3})t_{\text{н}}^2}{3\sqrt[3]{3\sqrt{3}\sqrt{-32t_{\text{н}}^4 - 27t_{\text{п}}^2} - 27t_{\text{п}}t_{\text{н}} - 16t_{\text{п}}t_{\text{н}}^3} - \frac{(1 + t_{\text{п}}\sqrt{3})\sqrt[3]{3\sqrt{3}\sqrt{-32t_{\text{н}}^4 - 27t_{\text{п}}^2} - 27t_{\text{п}}t_{\text{н}} - 16t_{\text{п}}t_{\text{н}}^3}}{6\sqrt[3]{2}} + \frac{2t_{\text{п}}t_{\text{н}}}{3}}. \quad (15)$$

Продолжительность паузы $t_{\text{п}}$, необходимой для перекрытия сварочных точек, находят по формуле [10]:

$$t_{\text{п}} = \frac{k_{\text{Пн}} d_{\text{т}}}{v_{\text{св}}} - t_{\text{н}} k_{\text{Пн}}, \quad (16)$$

где $v_{\text{св}}$ – скорость сварки, м/мин.

Выразив скорость сварки $v_{\text{св}}$ из выражения (16), получим

$$v_{\text{св}} = \frac{k_{\text{Пн}} d_{\text{т}}}{t_{\text{н}} + t_{\text{п}} k_{\text{Пн}}}. \quad (17)$$

Поскольку на практике продолжительность импульса $t_{\text{н}}$ и паузы $t_{\text{п}}$ устанавливается тиристорным регулятором, их величина всегда должна быть кратной периоду переменного тока сети электроснабжения, равного 0,02 с. Для обеспечения требуемой продолжительности включения (ПВ) источника сварочного тока и минимизации площади, разупрочняемой за счёт отпуска в процессе приварки следующей точки, должно соблюдаться условие $t_{\text{н}} < t_{\text{п}}$, причём в соответствии с выражением (11) уменьшение этих параметров ведёт к увеличению производительности процесса W . В связи с этим минимальным временем импульса $t_{\text{н}}$ может быть только 0,02 с, а максимальное время

паузы $t_{\text{п}}$ на практике не превышает 0,1 с. Подставив в выражение (17) возможные рациональные сочетания продолжительности $t_{\text{н}}$ и $t_{\text{п}}$, а также оптимальные коэффициенты перекрытия $k_{\text{Пн}}$, рассчитанные по формуле (15), получим значения скорости приварки для $d_{\text{т}} = 3$ мм. Результаты выполненных вычислений представлены в виде гистограммы на рисунке 4.

Площадь присадочного материала, через которую ток проходит в течение всего импульса для точек, форма которых близка к окружности (рис. 3а), определяется по формуле [8]:

$$S_{\text{н}} = \frac{1}{2} \left(d_{\text{т}}^2 \cos^{-1} \left(\frac{v_{\text{св}} t_{\text{н}}}{d_{\text{т}}} \right) - \sqrt{d_{\text{т}}^2 - (v_{\text{св}} t_{\text{н}})^2} \right). \quad (18)$$

Для точек, форма которых близка к эллиптической (рис. 3б) [14], –

$$S_{\text{н}} = 4 \frac{b}{a} \left(\frac{\pi a^2}{4} - \frac{v_{\text{св}} t_{\text{н}}}{4} \sqrt{a^2 - \frac{(v_{\text{св}} t_{\text{н}})^2}{4}} - \frac{a^2}{2} \sin^{-1} \left(\frac{v_{\text{св}} t_{\text{н}}}{2a} \right) \right). \quad (19)$$

При нанесении функциональных покрытий на плоские поверхности [10] сварочная головка перемещается относительно заготовки (или наоборот). Тогда величина подачи в перпендикулярном направлении за полный ход составит:

$$S_{\text{х}} = k_{\text{ПС}} d_{\text{т}}, \text{ мм / ход}. \quad (20)$$

Если перемещение сварочной головки или заготовки связано с вращением заготовки, подачу можно определить по формуле:

$$S_{\text{н}} = N_{\text{з}} k_{\text{ПС}} d_{\text{т}}, \text{ мм / об}. \quad (21)$$

В случае, если подача заготовки не связана с её вращением, минутная подача $S_{\text{м}}$ (скорость движения подачи $v_{\text{с}}$) определяется как

$$S_{\text{м}}(v_{\text{с}}) = \frac{N_{\text{з}} k_{\text{ПС}} d_{\text{т}}}{T} = N_{\text{з}} k_{\text{ПС}} d_{\text{т}} n, \text{ мм / мин}, \quad (22)$$

где T – период одного оборота обрабатываемой заготовки, мин.

Подача сварочных электродов или заготовки без учёта частоты вращения заготовки –

$$S_{\text{м}}(v_{\text{с}}) = \frac{60 N_{\text{з}} k_{\text{ПС}} k_{\text{Пн}} d_{\text{т}}^2}{\pi D (t_{\text{н}} + t_{\text{п}} k_{\text{Пн}})}, \frac{\text{мм}}{\text{мин}}. \quad (23)$$

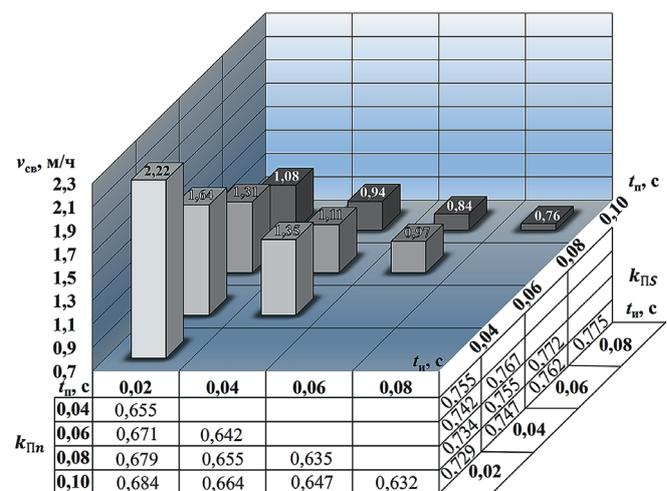


Рис. 4. Скорость приварки ($v_{\text{св}}$) и коэффициенты перекрытия сварочных точек ($k_{\text{Пн}}$ и $k_{\text{ПС}}$) в зависимости от продолжительности импульса тока $t_{\text{н}}$ и пауз между ними $t_{\text{п}}$

Fig. 4. Welding speed ($v_{\text{св}}$, m/h) and the overlap coefficients of welding points ($k_{\text{Пн}}$ and $k_{\text{ПС}}$) at different combinations of values of the current pulse duration ($t_{\text{н}}$, s) and pauses between them ($t_{\text{п}}$, s)

Представленный алгоритм, позволяющий произвести подбор оборудования, инструментов, присадочных материалов, методов интенсификации процесса, а также технологических параметров, может использоваться при проектировании технологических процессов получения функциональных покрытий при упрочнении и восстановлении деталей машин в машиностроительном и ремонтном производстве.

Выводы

1. Протекание процесса приварки и качество получаемых покрытий зависят от усилия сжатия сварочных электродов. На основе анализа сопротивления зоны соединения при ЭКП

показано, что для стальной ленты У12 оптимальное усилие сжатия сварочных электродов на плужный лемех, изготовленный из стали марки 65Г, составляет 1,7 кН.

2. Полученные выражения, позволяющие рассчитать оптимальные коэффициенты перекрытия и кинематические параметры электроконтактной приварки, позволяют проектировать технологические процессы упрочнения и восстановления деталей машин.

3. Представленный алгоритм расчёта позволяет упростить использование технологии и повысить качество получаемых покрытий за счёт минимизации брака, возникающего вследствие ошибок при назначении параметров приварки.

Список использованных источников / References

1. Латыпов Р.А., Серов А.В., Серов Н.В., Игнаткин И.Ю. Утилизация отходов машиностроения и металлургии при упрочнении и восстановлении деталей машин. Ч. 2 // *Металлург*. 2021. № 6. С. 87-92. EDN: YVXZLL.
1. Latypov R.A., Serov A.V., Serov N.V., Ignatkin I.Yu. Disposal of mechanical engineering and metallurgy waste during hardening and restoration of machine parts. Part 2. *Metallurg*. 2021; 6: 87-92. http://dx.doi.org/10.52351/00260827_2021_06_87 (In Rus.)
2. Berezshnaya O.V., Gribkov E.P., Kuznestov V.D. Investigation of thermostressed state coating formation at electric contact surfacing of «shaft» type parts. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2016; 6597317. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/6597317>
3. Berezshnaya O.V., Gribkov E.P., Borovik P.V., Kassov V.D. The finite element modulation of thermostressed state of coating formation at electric contact surfacing of «shaft» type parts. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2019; 2019: 38697313. <https://doi.org/10.1155/2019/7601792>
4. Nafikov M.Z. Formalized description of the process of formation of the welded joint in resistance welding of wires. *Welding International*. 2015; 29 (6): 466-470. <https://doi.org/10.1080/09507116.2014.941670>
5. Yunusbaev N.M., Gabitov I.I., Farkhshatov M.N., Nafikov M.Z., Saifullin R.N., Zagirov I.I., Insafuddinov S.Z. Perspective method of restoration of tractor parts by electrocontact welding of powder materials in the magnetic field. *Tribology in Industry*. 2019; 41 (1): 115-125. <https://doi.org/10.24874/ti.2019.41.01.13>
6. Pavlov A., Saifullin R., Farkhshatov M., Fayurshin A., Gaskarov I., Islamov L., Shaymukhametova D. Study of part restoration modes using electrocontact welding with gauze filler materials. *International Journal on Engineering Applications*. 2021; 9 (2): 62-70. <https://doi.org/10.15866/irea.v9i2.19511>

Критерии авторства

Серов А.В., Латыпов Р.А., Бурак П.И., Серов Н.В. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов подготовили рукопись. Серов А.В., Латыпов Р.А., Бурак П.И., Серов Н.В. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 28.06.2022

Одобрена после рецензирования и доработки 27.09.2022

Принята к публикации 27.10.2022

7. Сайфуллин Р.Н., Фархшатов М.Н., Гаскаров И.Р. Опыт восстановления изношенных деталей электроконтактной приваркой стальной ленты // *Труды ГОСНИТИ*. 2016. Т. 125. С. 166-170. EDN: XHGAUD.

Sayfullin R.N., Farkhshatov M.N., Gaskarov I.R. Experience of restoring worn parts by electrocontact welding of steel tape. *Trudy GOSNITI*. 2016; 125: 166-170. (In Rus.)

8. Серов А.В., Серов Н.В., Бурак П.И. Определение технологических параметров электроконтактной приварки при восстановлении и упрочнении плоских поверхностей // *Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина»*. 2017. № 1 (77). С. 35-40 EDN: XVDGKL.

Serov A.V., Serov N.V., Burak P.I. Determination of technological parameters of electrocontact welding during the restoration and hardening of flat surfaces. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2017; 1(77): 35-40. (In Rus.)

9. Серов А.В., Серов Н.В., Бурак П.И., Соколова В.М. Методика назначения оптимальных режимов электроконтактной приварки // *Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина»*. 2019. № 6 (94). С. 35-39. <https://doi.org/10.34677/1728-7936-2019-6-35-39>

Serov A.V., Serov N.V., Burak P.I., Sokolova V.M. Method of choosing optimal modes of electrocontact welding. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2019; 6: 35-39. <https://doi.org/10.34677/1728-7936-2019-6-35-39> (In Rus.)

10. Нафиков М.З., Загиров И.И., Сайфуллин Р.Н. Определение размеров ролика для электроконтактной наплавки валов // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2007. № 2 (26). С. 21-22. EDN: HYZVZR.

Nafikov M.Z., Zagirov I.I., Sayfullin R.N. Determining the size of a roller for the electrocontact surfacing of shafts. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2007; 2: 21-22. (In Rus.)

Contribution

A.V. Serov, R.A. Latypov, P.I. Burak and N.V. Serov performed theoretical studies and, based on the results obtained wrote the manuscript. A.V. Serov, R.A. Latypov, P.I. Burak and N.V. Serov have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The article was received 28.06.2022

Approved after reviewing 27.09.2022

Accepted for publication 27.10.2022