

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.791.763

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-75-81>

Расчет размеров единичной сварочной площадки при электроконтактной приварке металлической ленты

*А.В. Серов¹, Н.В. Серов^{2✉}, Д.М. Скороходов³*¹ Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет); г. Москва, Россия^{2,3} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия¹ av_serov@vk.com; <https://orcid.org/0000-0001-6114-7354>² n.serov@rgau-msha.ru ✉; <https://orcid.org/0000-0002-7676-4344>³ d.skorokhodov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6315-4184>

Аннотация. Абразивное изнашивание деталей и узлов сельскохозяйственной техники приводит к выходу ее из строя. Восстановление деталей сельскохозяйственной техники и их упрочнение функциональными покрытиями проводят с помощью электроконтактной приварки (ЭКП) металлических лент. Свойства и качество получаемых покрытий зависят от регулируемых (сила сварочного тока, скорость сварки и величина подачи) и нерегулируемых параметров ЭКП, а также от размера единичной сварочной площадки (ЕСП). Цель исследований – получение расчетных формул для определения размеров ЕСП и осадки присадочного материала при ЭКП металлической ленты. Установлено, что размеры эллиптической ЕСП зависят от силы сжатия, диаметра восстанавливаемой поверхности, ширины и диаметра роликовых электродов, физических и механических свойств присадочного материала (твердость, модуль упругости Юнга и коэффициент Пуассона). При этом свойства материала – такие, как упругость и прочность, не поддаются регулировке в процессе приварки. Регулировать размеры ЕСП можно только усилием сжатия и изменением ширины и/или диаметра электродов. В свою очередь, уменьшение или увеличение усилия сжатия электродов приводят к изменению характера контактирования поверхностей в зоне соединения, а следовательно, электрического сопротивления и степени пластической деформации, что отражается на качестве покрытий. В результате теоретических исследований и применения метода моделирования предложена математическая модель расчета геометрических параметров ЕСП при ЭКП. Произведенные по полученным зависимостям расчеты подтвердили результаты других исследований: рекомендуемая 30%-ная пластическая деформация (осадка) присадочного материала для детали диаметром 40 мм достигается при ширине электродов 6,3...9 мм, а для диаметра 80 мм – при 4,6...6,4 мм. Применение формул для расчета размеров ЕСП позволит повысить качество и эффективность электроконтактной приварки.

Ключевые слова: покрытия; восстановление деталей; упрочнение; ремонт; электроконтактная приварка; деформация; металлическая лента

Для цитирования: Серов А.В., Серов Н.В., Скороходов Д.М. Расчет размеров единичной сварочной площадки при электроконтактной приварке металлической ленты // *Агроинженерия*. 2025. Т. 27, № 5. С. 75-81. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-75-81>

ORIGINAL ARTICLE

Calculation of welding point dimensions during electrical contact welding of a metal tape

*A.V. Serov¹, N.V. Serov^{2✉}, D.M. Skorokhodov³*¹ Bauman Moscow State Technical University; Russia, Moscow^{2,3} Russian Timiryazev State Agrarian University; 127434, Russia, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49¹ av_serov@vk.com; <https://orcid.org/0000-0001-6114-7354>² n.serov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7676-4344>³ d.skorokhodov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6315-4184>

Abstract. Abrasive wear causes widespread failure of agricultural machinery parts and assemblies. Electrical contact welding (ECW) of metal tapes is a common method for restoring and reinforcing these parts with functional coatings. The properties and quality of the resulting coatings are influenced by both regulated (welding current,

speed, and feed rate) and unregulated ECW parameters, as well as the size of a single welding site (SWS). This study aims to develop calculation formulas for determining the SWS dimensions and the filler material upset during ECW of a metal tape. The authors have established that the elliptical SWS dimensions depend on compression force, the diameter of the restored surface, electrode width and diameter, and physical and mechanical properties of the mounting material (hardness, Young's modulus, Poisson's ratio). While material properties like elasticity and strength are inherent, SWS size can be adjusted by manipulating compression force and/or electrode dimensions. However, altering the compression force affects contact characteristics of the surfaces in the joint area, electrical resistance, and the degree of plastic deformation, which ultimately influences coating quality. Through theoretical research using physical and mathematical models, the authors have derived a mathematical model for calculating SWS geometric parameters for ECW. Calculations based on these dependencies confirmed previous findings: achieving the recommended 30% plastic deformation (upset) of filler material for a 40 mm diameter part requires an electrode width of 6.3 to 9 mm, while a diameter of 80 mm requires 4.6 to 6.4 mm. The use of these SWS calculation formulas will improve the quality and efficiency of electrical contact welding.

Keywords: coatings; restoration; hardening; repair; electrical contact welding; deformation; metal tape

For citation: Serov A.V., Serov N.V., Skorokhodov D.M. Calculation of welding point dimensions during electrical contact welding of a metal tape. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(5):75-81 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-75-81>

Введение

Причиной выхода из строя сельскохозяйственной техники является абразивное изнашивание деталей и узлов под воздействием твердых частиц почвы и агрессивных сред. На фоне постоянного повышения стоимости и дефицита некоторых запасных частей актуальным является совершенствование технологий ремонта машин и оборудования. Перспективным методом получения функциональных покрытий является электроконтактная приварка (ЭКП) металлических лент. Процесс ЭКП имеет множество задаваемых, регулируемых и нерегулируемых параметров, оказывающих большое влияние на свойства и качество получаемых покрытий.

При назначении регулируемых параметров процесса электроконтактной приварки (ЭКП) металлических лент [1-3] – таких, как сила сварочного тока, скорость сварки и величина подачи, важно знать размеры единичной сварочной площадки (ЕСП) [4, 5].

Регулировать размеры ЕСП можно только усилием сжатия и изменением ширины и/или диаметра электродов. При ЭКП диаметр роликов, как правило, больше диаметра восстанавливаемой наружной цилиндрической поверхности, поэтому геометрические параметры ЕСП будут определяться шириной роликовых электродов и диаметром восстанавливаемой поверхности, а также свойствами присадочного материала. При этом для образования соединения необходимо создать усилие сжатия, обеспечивающее следующие воздействия: механический контакт соединяемых материалов; оптимальный электрический контакт; упругая деформация – запас потенциальной энергии; пластическая деформация, проявляющаяся в изменении

структуры (повышение плотности дислокаций) и выделении теплоты [5].

Цель исследований: получение расчетных формул для определения размеров ЕСП при электроконтактной приварке металлической ленты.

Материалы и методы

В исследованиях использованы методы физического и математического моделирования, проведен обзор источников и теории электроконтактной приварки металлических лент.

Результаты и их обсуждение

Для определения размеров ЕСП необходимо рассмотреть деформацию присадочного материала между электродом и заготовкой.

При приварке ленты шириной меньше длины заготовки, но превышающей ширину рабочей части электрода b_z , электрод-ролик вдавливаются в ленту подобно индентору при измерении твердости. Под действием нагрузки в плоскости, проходящей через центр заготовки и перпендикулярной ее поверхности, происходит деформация: материал ленты обтекает заготовку, электрод вытесняется вперед и назад вдоль оси, а также в поперечном направлении.

Полная поперечная деформация ленты при этом будет складываться из суммы ее деформации вокруг заготовки и от вдавливания электрода:

$$\Delta h = \Delta h_z + \Delta h_d, \quad (1)$$

где Δh – полная усадка ленты, м; Δh_z – осадка ленты под электродом; Δh_d – осадка ленты над заготовкой.

Необходимо отметить, что полная деформация будет складываться из упругой и пластической деформаций.

Площадь поперечного сечения ЕСП контакта в общем случае будет представлять собой эллипс, а в частном случае – окружность (рис. 1).

Меньшую полуось эллиптической ЕСП в случае радиусных фасок электрода вычислим из прямого треугольника CFD , предположив, что ширина контакта не может быть больше ширины роликового электрода, м:

$$2b = b_3 + 2FD = b_3 + 2\sqrt{CD^2 - CF^2} = \\ = b_3 + 2\sqrt{r_\phi^2 - (r_\phi - \Delta h_3)^2} = b_3 + 2\sqrt{\Delta h(2r_\phi - \Delta h)}. \quad (2)$$

В случае фаски с прямолинейной поверхностью ширину ЕСП можно найти как

$$2b = b_3 + 2\Delta h \tan \beta, \quad (3)$$

где r_ϕ – радиус фаски роликового электрода, м.

Значение твердости по шкале Мартенса с достаточной точностью позволит вычислить величину упругопластической деформации ленты при вдавлении в нее электрода и заготовки [6-7].

При вычислении твердости по рассматриваемой шкале приложенную нагрузку F делят на функцию площади поверхности $A_s(h)$ рабочей части наконечника – в частности, для алмазного наконечника Виккерса формула для определения твердости имеет вид, Па:

$$HM = \frac{F}{A_s(h_m)}. \quad (4)$$

Следовательно, из определения твердости можно считать, что для конкретного материала при одинаковых условиях отношение нагрузки к площади контакта будет постоянным:

$$\frac{P}{A_3} = \frac{P}{A_d} = HM, \quad (5)$$

где P – усилие сжатия электродов, Н; A_3 и A_d – площади отпечатков электрода и детали на присадочном материале (ленте) соответственно, м².

Из выражения (5) получим:

$$A_3 = A_d = \frac{P}{HM}. \quad (6)$$

Приблизненно площадь поверхности отпечатка роликового электрода можно найти как произведение длины дуги сегмента электрода, вдавленного в присадочный материал, на его ширину:

$$A_3 = A_d = 2bl_3 = 2bl_d, \quad (7)$$

где l_3 и l_d – длина дуги сегмента электрода и детали вдавленных в поверхность присадочного материала, м. Поскольку они равны, примем

$$l = l_3 = l_d = \frac{A_3}{2b}, \quad (8)$$

с учетом (6) –

$$l = \frac{\frac{P}{HM}}{2b} = \frac{P}{2bHM}. \quad (9)$$

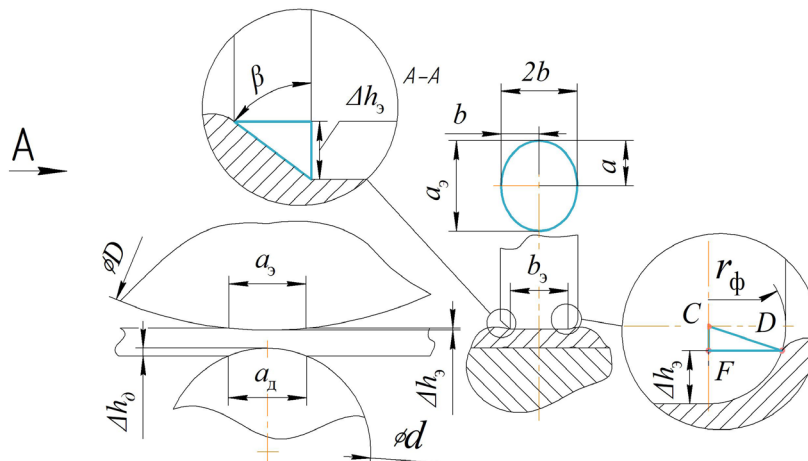


Рис. 1. Схема деформации присадочного материала при электроконтактной приварке:

D – диаметр роликового электрода; d – диаметр детали; Δh_3 – осадка ленты под электродом; Δh_0 – осадка ленты над заготовкой; b_3 – ширина роликового электрода; r_ϕ – радиус скругления роликового электрода; β – угол катета фаски; a_d – длина ЕСП со стороны детали; a_3 – длина ЕСП со стороны электрода

Fig. 1. Schematic diagram of the deformation of the filler material during electrical contact welding:

D – diameter of the roller electrode; d – diameter of the part; Δh_3 – tape upset under the electrode; Δh_d – tape upset over the workpiece; h – tape thickness; b_3 – width of the roller electrode; radius of rounding of the roller electrode r_ϕ ; β – angle of the chamfer catheter; a_3 – length of the SWS on the part side; a_d – length of the SWS on the electrode side

Длиной ЕСП в соответствии с данными рисунка 1 является хорда, образованная окружностями электродов и детали, а значит:

$$a_3 = D \sin(\alpha), \quad (10)$$

где α – центральный угол, рад.

Со стороны электрода

$$\alpha_3 = \frac{l}{D}, \quad (11)$$

со стороны детали –

$$\alpha_d = \frac{l}{d}. \quad (12)$$

Для первоначальных расчетов примем $b = b_3$, тогда

$$a_3 = D \sin\left(\frac{P}{Db_3HM}\right). \quad (13)$$

Аналогично можно найти деформацию со стороны детали:

$$a_d = d \sin\left(\frac{P}{db_3HM}\right). \quad (14)$$

Значения твердости по Мартенсу известны не для всех материалов, поэтому на практике чаще используются значения твердости по Бринеллю или Виккерсу [8], которые в пределах интервала измерения твердости по шкале Бринелля различаются незначительно, а данных по этим методам для различных материалов и условий испытаний (температуре) накоплено достаточно. Тогда

$$a_3 = D \sin\left(\frac{P}{Db_3HB_{HV}}\right); \quad (15)$$

$$a_d = d \sin\left(\frac{P}{db_3HB_{HV}}\right). \quad (16)$$

При наличии данных о твердости по обеим шкалам предпочтительной является твердость по Бринеллю, так как сферический индентор по форме ближе к рассматриваемому случаю, чем алмазная пирамида.

Зная хорду, вычислим величину пластической деформации ленты со стороны электродов Δh_3^n и детали Δh_d^n , м:

$$\Delta h_3^n = \frac{D(1 - \cos\left(\frac{P}{Db_3HB_{HV}}\right))}{2}; \quad (17)$$

$$\Delta h_d^n = \frac{d(1 - \cos\left(\frac{P}{db_3HB_{HV}}\right))}{2}. \quad (18)$$

Однако при измерениях эти методы не учитывают упругую деформацию, поэтому ее величину определим с помощью расчетной модели Г.Р. Герца.

Упругая составляющая деформации (a^y , м) ленты под действием усилия сжатия по модели Г.Р. Герца (рис. 2) определяется по выражению:

$$a^y = 2\sqrt{\frac{F_i R}{\pi C}}, \quad (19)$$

где F_i – равномерно распределенная по длине сила на единицу длины рабочей поверхности индентора (интенсивность силы), Н/м.

$$F_i = \frac{P}{b_3}; \quad (20)$$

$$C = \frac{E}{1 - \mu^2}, \quad (21)$$

где μ – коэффициент Пуассона; E – модуль Юнга, Па. Тогда

$$a^y = 2\sqrt{\frac{P}{b_3} \frac{R_{3-д}}{\pi C}}. \quad (22)$$

Длина ЕСП при упругом контакте –

$$a_3^y = 4\sqrt{\frac{(1 - \mu^2)PD}{2E\pi b_3}}; \quad (23)$$

$$a_d^y = 4\sqrt{\frac{(1 - \mu^2)Pd}{2E\pi b_3}}. \quad (24)$$

Для определения величины упругой деформации необходимо вычислить центральный угол при известных значениях хорды и диаметра:

$$\alpha_3^y = \sin^{-1}\left(\frac{a_3^y}{D}\right); \quad (25)$$

$$\alpha_d^y = \sin^{-1}\left(\frac{a_d^y}{d}\right). \quad (26)$$

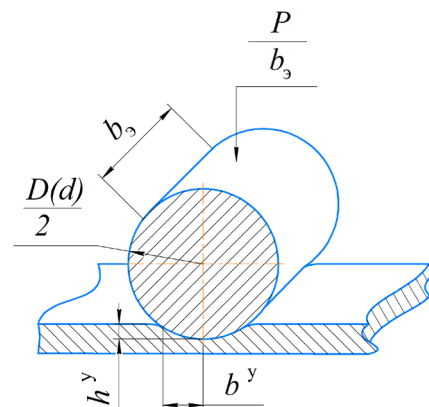


Рис. 2. Схема для расчета упругой деформации при вдавливании цилиндра по модели Г.Р. Герца
Fig. 2. Scheme for calculating elastic deformation during cylinder indentation according to the G.R. Hertz model

Упругая осадка ленты под электродом и над деталью, соответственно, находятся по выражениям:

$$\Delta h_y = \frac{D \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{a_y}{D} \right)^2} \right)}{2}; \quad (27)$$

$$\Delta h_d = \frac{d \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{a_d}{d} \right)^2} \right)}{2}. \quad (28)$$

Следовательно, полная деформация с учетом (17) и (18) –

$$\Delta h_y = \Delta h_y^n + \Delta h_y^y = \frac{D \left(1 - \cos \left(\frac{P}{Db_y HB_{HV}} \right) \right)}{2} + \frac{D \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{a_y}{D} \right)^2} \right)}{2}; \quad (29)$$

$$\Delta h_d = \Delta h_d^n + \Delta h_d^y = \frac{d \left(1 - \cos \left(\frac{P}{db_y HB_{HV}} \right) \right)}{2} + \frac{d \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{a_d}{d} \right)^2} \right)}{2}, \quad (30)$$

а с учетом формул 23 и 24 получим:

$$\Delta h_y = \frac{D \left(1 - \cos \left(\frac{P}{Db_y HB_{HV}} \right) \right)}{2} + \frac{D \left(1 - \sqrt{1 - 16 \frac{(1-\mu^2)P}{2DE\pi b_y}} \right)}{2}; \quad (31)$$

$$\Delta h_d = \frac{d \left(1 - \cos \left(\frac{P}{db_y HB_{HV}} \right) \right)}{2} + \frac{d \left(1 - \sqrt{1 - 16 \frac{(1-\mu^2)P}{2dE\pi b_y}} \right)}{2}. \quad (32)$$

Полная длина ЕСП –

$$a_y = D \sin \alpha_y; \quad (33)$$

$$a_d = d \sin \alpha_d. \quad (34)$$

После тригонометрического преобразования получим:

$$\alpha_y = \cos^{-1} \left(1 - 2 \frac{\Delta h_y}{D} \right); \quad (35)$$

$$\alpha_d = \cos^{-1} \left(1 - 2 \frac{\Delta h_d}{d} \right). \quad (36)$$

Окончательно длину ЕСП можно найти по выражениям:

$$a_y = D \sin \left(\cos^{-1} \left(1 - 2 \frac{\Delta h_y}{D} \right) \right) = D \sqrt{1 - \left(1 - 2 \frac{\Delta h_y}{D} \right)^2}; \quad (37)$$

$$a_d = d \sin \left(\cos^{-1} \left(1 - 2 \frac{\Delta h_d}{d} \right) \right) = d \sqrt{1 - \left(1 - 2 \frac{\Delta h_d}{d} \right)^2}. \quad (38)$$

На рисунке 3 представлены расчеты площади ЕСП для диаметра восстанавливаемой поверхности 50 мм и ширины роликовых электродов $b = 10$ мм в зависимости от твердости присадочной ленты и усилия сжатия электродов.

Прогнозируемая осадка присадочного материала показана на рисунке 4. Диаметр указан для меньшего из размеров, то есть если диаметр заготовки меньше размера электрода, то расчет производится по диаметру электрода, и наоборот. Деформация роликовых электродов и детали не учитывается.

Если осадка будет превышать толщину материала, то он практически весь будет вытесняться из-под электродов.

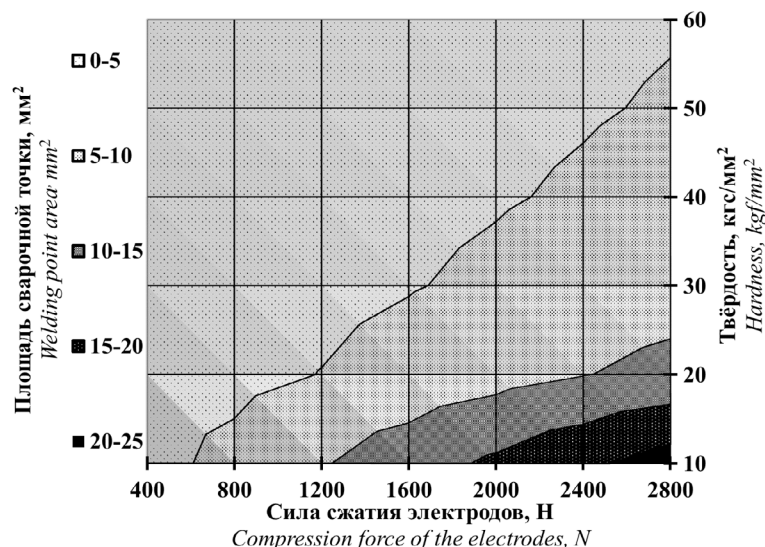


Рис. 3. Характер влияния твердости и силы сжатия на площадь ЕСП, мм²

Fig. 3. Effect of hardness and compressive force on the area of the welding point, mm²

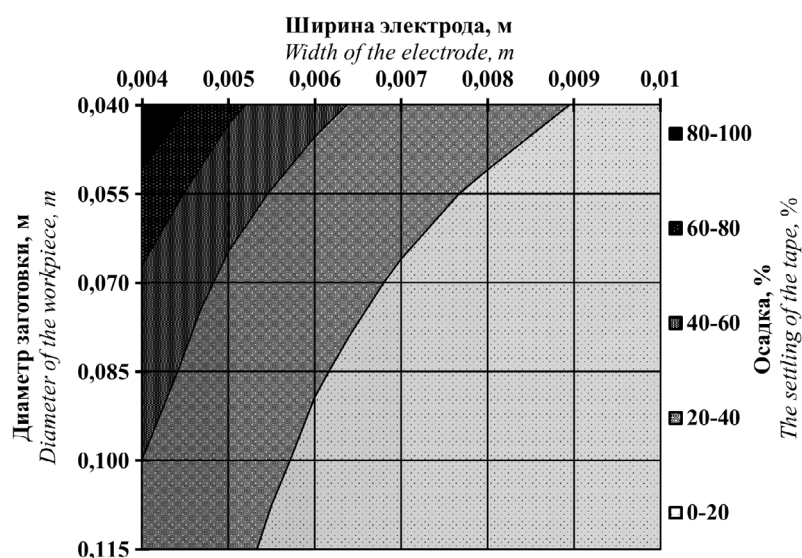


Рис. 4. Прогнозируемая осадка присадочного материала в зависимости от диаметра восстанавливаемой поверхности или электродов и ширины электродов

Fig. 4. Predicted upset of filler material depending on the diameter of the surface to be repaired or the electrodes and the width of the electrodes

Из графика (рис. 4) следует, что деформация 20...40% для диаметра детали 40 мм достигается при ширине электродов 6,3...9 мм, а для диаметра 80 мм – при 4,6...6,4 мм. Результаты расчетов согласуются с данными различных исследований. Так, учеными¹ [4, 9] установлено, что при электроконтактной приварке ленты из стали марки 50ФХА на вал диаметром 40 мм электродами шириной 10 мм и усилия сжатия 1,7 кН достигались оптимальные условия приварки, а пластическая деформация (осадка) присадочного материала при этом составляла 20...30%.

Выводы

1. Предложена физическая и математическая модель для расчета геометрических параметров единичной сварочной площадки ЕСП, образуемой электроконтактной приваркой металлической ленты к цилиндрической поверхности с помощью роликовых электродов.

¹ Серов Н.В. Восстановление и упрочнение деталей машин и оборудования агропромышленного назначения электроконтактной приваркой: Учебно-методическое пособие. Москва: Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2021. 25 с. EDN: JXTNEK

Список источников

1. 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. Vol. 2019. P. 7601792. <https://doi.org/10.1155/2019/7601792>
2. Латыпов Р.А., Серов А.В., Серов Н.В., Игнаткин И.Ю. Утилизация отходов машиностроения и металлургии при упрочнении и восстановлении деталей машин // *Металлург*. 2021. № 5. Ч. 1. С. 81-87. https://doi.org/10.52351/00260827_2021_05_81

2. Размеры эллиптической единичной сварочной площадки зависят от силы сжатия, ширины, диаметра роликовых электродов и диаметра восстанавливаемой поверхности, а также от физических и механических свойств присадочного материала: твердости, модуля упругости Юнга и коэффициента Пуассона.

3. В процессе приварки (сварки) не регулируются упругие и прочностные свойства материала, поэтому изменять величину осадки присадочного материала можно только варьированием ширины сварочных электродов: для увеличения осадки уменьшать ширину электродов, для уменьшения – наоборот, увеличивать.

4. Рассчитали, что при обработке поверхности диаметром 40...80 мм ширина электродов должна составлять 4,6...9 мм. При меньшей ширине осадка будет значительно больше, что приведет к снижению полезной толщины покрытия. При большей ширине не будет достигаться оптимальная пластическая деформация, что отрицательно отразится на качестве самого покрытия и на прочности соединения основы с присадочным материалом.

References

1. 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;2019:7601792. <https://doi.org/10.1155/2019/7601792>
2. Latypov R.A., Serov A.V., Serov N.V., Ignatkin I.Y. Utilization of wastes from mechanical engineering and metallurgy during strengthening and restoration of machine parts. Part 1. *Metallurg*. 2021;5:81-87. (In Russ.) https://doi.org/10.52351/00260827_2021_05_81

3. Yunusbaev N.M., Gabitov I.I., Farkhshatov M.N. et al. Perspective method of restoration of autotractor 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>

4. Бурак П.И., Серов А.В. Оптимизация процесса электроконтактной приварки металлической и аморфной лент с использованием статистического моделирования // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2011. № 1 (46). С. 59-61. EDN: RASSZV

5. Серов А.В., Латыпов Р.А., Серов Н.В., Чернов В.В. Расчетно-экспериментальная оценка сопротивления зоны соединения при электроконтактной приварке с использованием промежуточного слоя // *Электротехнология*. 2024. № 5. С. 19-30. EDN: PCZZOO

6. Асланиян А.Э., Асланиян Э.Г., Гаврилкин С.М. и др. Государственный первичный эталон твердости по шкалам Мартенса и шкалам индентирования ГЭТ 211-2014 // *Измерительная техника*. 2016. № 6. С. 3-6. EDN: WMCFBH

7. Асланиян А.Э. Влияние скорости приближения наконечника к образцу на твердость по шкалам индентирования // *Метрология в XXI веке: Материалы V научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и специалистов, Менделеево, Московская область, 23 марта 2017 г. М.: Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений»*, 2018. С. 106-109. EDN: YQLGNN

8. Тыллануров Ы. Зависимость давления и твердости материала по методу Виккерса // *Матрица научного познания*. 2023. № 9-1. С. 133-136. EDN: NPASNX

9. Бурак П.И., Латыпов Р.А., Серов А.В., Серов Н.В. Использование цифровых технологий при исследовании и моделировании процессов, протекающих при электроконтактной приварке // *Технический сервис машин*. 2019. № 1 (134). С. 113-121. EDN: VNWZTU

3. Yunusbaev N.M., Gabitov I.I., Farkhshatov M.N. et al. Perspective method of restoration of autotractor 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>

4. Burak P.I., Serov A.V. Optimization of electric welding of metal and amorphous ribbons using statistical modeling. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2011;1(46):59-61. (In Russ.)

5. Serov A.V., Latypov R.A., Serov N.V., Chernov V.V. Computational-and-experimental evaluation of resistance of joint zone during electrical contact welding with use of intermediate layer. *Elektrometallurgiya*. 2024;5:19-30. (In Russ.)

6. Aslanyan A.E., Aslanyan E.G., Gavrilkin S.M. et al. State primary hardness standard according to the Martens scales and GET 211-2014 indentation scales. *Izmeritel'naya tekhnika*. 2016;6:3-6. (In Russ.)

7. Aslanyan A.E. Influence of the tip approach velocity to the sample on hardness according to indentation scales. *Metrologiya v 21 veke: Proceedings of the V Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Postgraduates and Specialists, Mendeleev, March 23, 2017. FSUE "VNIIFTRI". Mendeleev, Moscow Region: Federal State Unitary Enterprise "All-Russian Scientific Research Institute of Physico-Technical and Radio-Technical Measurements"*, 2018, pp. 106-109. (In Russ.)

8. Tyllanurov Y. Dependence of pressure and hardness according to the Vickers method. *Matritsa nauchnogo poznaniya*. 2023;9-1:133-136. (In Russ.)

9. Burak P.I., Latypov R.A., Serov A.V., Serov N.V. The use of digital technologies in case of a research and simulation of the processes proceeding in case of an electrocontact welding. *Machinery Technical Service*. 2019;1(134):113-121. (In Russ.)

Информация об авторах

¹ Серов Антон Вячеславович, канд. техн. наук, доцент; av_serov@vk.com; <https://orcid.org/0000-0001-6114-7354>; SPIN-код: 8269-4840

² Серов Никита Вячеславович, канд. техн. наук, доцент; n.serov@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-7676-4344>; SPIN-код: 3364-1840

³ Скороходов Дмитрий Михайлович, канд. техн. наук, доцент; d.skorokhodov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6315-4184>; SPIN-код: 9791-9002

¹ Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет); 105505, Российская Федерация, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1

^{2,3} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Вклад авторов

А.В. Серов – создание черновика рукописи, теоретические исследования, концептуализация, визуализация;
Н.В. Серов – верификация данных, методология, формальный анализ, ресурсы, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
Д.М. Скороходов – верификация данных, методология, формальный анализ, ресурсы.

Статья поступила 28.04.2025, после рецензирования и доработки 15.09.2025; принята к публикации 16.09.2025

Author Information

Anton V. Serov¹, CSc (Eng), Associate Professor; av_serov@vk.com, <https://orcid.org/0000-0001-6114-7354>; Scopus Author ID: 55346731200; Researcher ID: MTG-6373-2025

Nikita V. Serov^{2✉}, CSc (Eng), Associate Professor; n.serov@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-7676-4344>; Scopus Author ID: 57226809065; Researcher ID AAE-5293-2022

Dmitry M. Skorokhodov³, CSc (Eng), Associate Professor; d.skorokhodov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6315-4184>; Scopus Author ID: 57223623999; Researcher ID AFH-8012-2022

¹ Bauman Moscow State Technical University, 105505

Russian Federation, Moscow, 2nd Baumanskaya Str., 5, bld. 1

^{2,3} Russian Timiryazev State Agrarian University; 127434, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49

Author Contribution

A.V. Serov – writing – original draft preparation, theoretical research, conceptualization, visualization;
A.V. Serov – data verification, methodology, formal analysis, resources, writing – review and editing of the manuscript;
D.M. Skorokhodov – data verification, methodology, formal analysis, resources.

Received 28.04.2025; Revised 15.09.2025; Accepted 16.09.2025