

УДК 621.791.76

О влиянии никелевых промежуточных слоев на сопротивление зоны соединения при электроконтактной приварке

Серов Антон Вячеславович

av_serov@vk.com

SPIN-код: 8269-4840

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрено влияние химического состава диффузионной зоны соединения сталь-сталь методом электроконтактной приварки (ЭКП) с использованием промежуточного слоя из никеля. Отмечено что с учетом этапности и стадийности состояний электрического сопротивления зоны соединения электроконтактными способами сварки промежуточные слои, как правило, оказывают положительное влияние на первом этапе соединения (точечная сварка), а на втором (шовная) и третьем (электроконтактная приварка) должны оказывать больше негативного эффекта, что однако не происходит при применении никелевых промежуточных слоев, что вероятно связано с повышением электросопротивления диффузионного слоя зоны соединения. Проведен прогноз влияния промежуточного слоя на основе никеля на сопротивление зоны соединения при ЭКП.

Ключевые слова: электрическое сопротивление, электроконтактная приварка, зона соединения, промежуточные слои, покрытия, упрочнение, восстановление

About the effect of nickel intermediate layers on the resistance of the connection zone during electrical contact welding

Serov Anton Vacheslavovich

av_serov@vk.com

SPIN-code: 8269-4840

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The influence of the chemical composition of the diffusion zone of a steel-steel joint by electrocontact welding using an intermediate layer of nickel is considered. It is noted that, taking into account the phasing and stage-by-stage states of the electrical resistance of the connection zone by electrocontact welding methods, intermediate layers usually have a positive effect at the first stage of the connection (spot welding), and at the second (seam welding) and the third (electrocontact welding) should have a more negative effect, which, however, does not occur when using nickel intermediate layers., which is probably due to an increase in the electrical resistance of the diffusion layer of the junction zone. The effect of a nickel-based intermediate layer on the resistance of the connection zone during ECW has been predicted.

Keywords: electrical resistance, electric contact welding, joint zone, intermediate layers, coatings, strengthening, restoration

Введение. Электроконтактная приварка является закономерным развитием электроконтактных способов сварки. Автором [1, 2] отмечается, что качественными различиями между электроконтактными способами сварки традиционно являются пространственно-кинематические схемы осуществления процессов, например нахлесточное (перекрестное) соединение при точечной сварке, стыковое при стыковом способе и нахлесточное при взаимном перемещении с заданной скоростью сварки роликовых электродов и заготовок для шовной, а при наличии дополнительной поперечной подачи при электроконтактной приварке. Однако другим качественным отличием является процесс формирования (изменения) электрического сопротивления в процессе соединения.

Зона соединения при электроконтактных способах сварки состоит в самом простом случае из трех зон: переходных сопротивлений электрод-присадочный материал и присадочный материал-основной (деталь), а также сопротивлений материалов между электродами [2]. Рассматриваемые зоны имеют сопротивления соответственно: $R_{эл}$ — электрод-присадочный материал (деталь № 1); $R_{л}$ — присадочный материал (или деталь № 1); $R_{лд}$ — присадочный материал (деталь № 1) — основной (деталь № 2); $R_{лд}$ — основной материал (деталь № 2); $R_{эл}$ — основной материал (деталь № 2) — электрод. При образовании соединения все переходные сопротивления исчезают и общее сопротивление складывается из сопротивления исходных материалов. Однако в ряде случаев при стыковой сварке (КСС), например звеньев цепей и последовательном проставлении точек при точечной (КТС), а также при шовной (КШС), необходимо также учитывать сопротивления шунтирования.

Первый этап — неустановившийся — характеризуется двумя состояниями: до начала протекания импульса тока и после образования сварного соединения. При этом состояние зоны соединения последовательно переходит из первого состояния во второе при образовании каждого следующего соединения, поскольку сопротивлением шунтирования в большинстве случаев можно пренебречь. При втором (переходном) ток будет шунтироваться через предыдущую единичную площадку, сопротивление которой должно стремиться к значению сопротивления первой единичной площадки после ее приварки. После ЭКП второй единичной площадки ее сопротивление будет стремиться к сопротивлению шунта, и оба этих сопротивления будут являться шунтирующими при приварке единичных площадок второго и последующих рядов. Третий этап характерный для ЭКП — это этап с первоначальным сопротивлением зоны соединения равным сопротивлению при параллельном подключении трех шунтирующих точек и зоны контакта, а после завершения процесса соединения — равным сопротивлению шунтирования). При рассмотрении шунтирования тока через три соседние единичные площадки прием сопротивление шунтирования равным $1/3$ от сопротивления шунтирования через одну соседнюю единичную площадку.

При ЭКП для интенсификации процесса применяются промежуточные слои, что дополнительно добавляет два переходных сопротивления (рис. 1),

исчезающих на второй стадии третьего этапа, уменьшающие таким образом сопротивление шунтирования для новой точки, а следовательно КПД процесса приварки, как отмечалось ранее снижается со 100 % (активной нагрузки между электродами) при КСС и КТС до 60 % при КШС и до 30 % при ЭКП с применением промежуточных слоев (без промежуточного слоя из сопротивления зоны соединения исчезает дополнительное переходное). Однако отмечается [3] положительное влияние и, в частности, снижение необходимого сварочного тока при использовании никелевых промежуточных слоев, что возможно только в двух случаях: 1 — снижения необходимой тепловой составляющей энергии для образования межатомных связей никель-сталь относительно сталь-сталь; 2 — не уменьшение, а увеличение (или менее значительное увеличение) сопротивления зоны соединения предыдущей точки по сравнению с расчетными значениями, полученными без учета ликвидации переходных сопротивлений. Первый случай также рассматривается и подтверждается [4] большими степенями пластической деформации — ростом плотности дислокаций и большим вкладом механической составляющей в энергию, затрачиваемую на образование соединения, в частности.

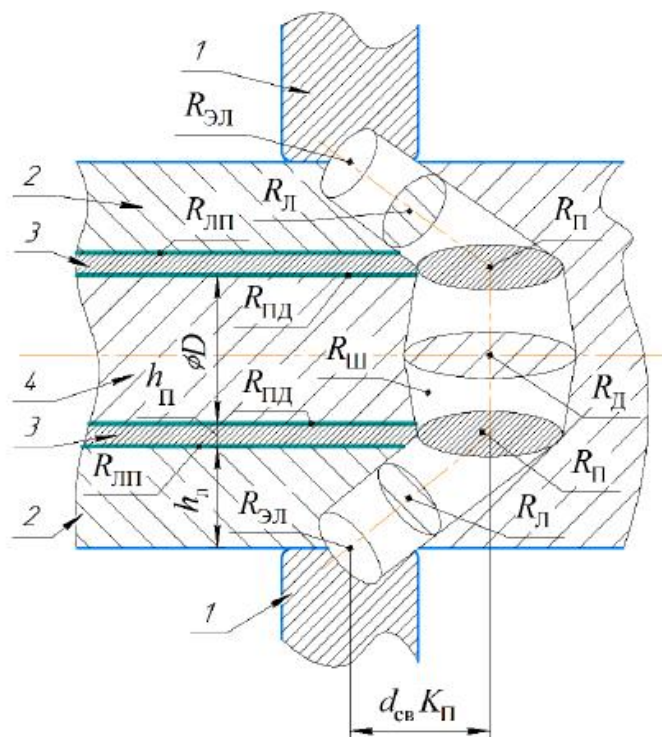


Рис. 1. Схема формирования электрического сопротивления зоны контакта:

1 — электроды; 2 — присадочный материал; 3 — промежуточный слой; 4 — деталь; $R_{эл}$ — переходное сопротивление электрод-присадочный материал; $R_л$ — сопротивление присадочного материала; $R_{лп}$ — переходное сопротивление присадочный материал — промежуточный слой; $R_п$ — сопротивление промежуточного слоя; $R_{пд}$ — переходное сопротивление присадочный материал — деталь; $R_ш$ — сопротивление детали; $h_л$ и $h_п$ — толщины присадочного и промежуточного материалов

Второй случай не рассматриваемый обычно ранее — это повышение электросопротивления зоны соединения, которая объясняется диффузией никеля промежуточного слоя в стальную основу детали и покрытия. Однако

в промышленности сплавы системы железо–никель как раз часто применяются в качестве резистивных из-за высокого сопротивления особенно характерного для сплавов с содержанием никеля около 34 %, в 8 раз большего для железа и до 13 раз для чистого никеля. Таким образом, появляется несколько задач: определить факт взаимной диффузии и образования диффузионной зоны железо–никель; определить ее протяженность и среднее эффективное электрическое сопротивление; оценить влияние на ток шунтирования.

Материалы и методы. Приварка осуществлялась на установке для электроконтактной приварки «011-1-10» «Ремдеталь». Тарирование величины сварочного тока с помощью измерителя сварочного тока ИСТ-02, производства ЗАО «КБ АСТ» (г. Псков). Длительность сварочного импульса и паузы регулировали при помощи регулятора РВИ-501. Основным металлом образцов являлась сталь 45. Присадочный материал — ленту из стали марки 50ХФА толщиной 0,5 мм. Промежуточные слои: Стемет 1301 (Ni — основа; 7 % Cr; 4,6 % Si ; 3,1 % В; 3,0 % Fe) и слой, полученный напылением порошка марки N3–00–02 (никель, корунд) производств Димет непосредственно на присадочный материал. Для определения химического состава зоны соединения: сканирующий микроскоп JSM-6610LV и волно-дисперсионный спектрометр INCA Wave 500.

Результаты. Результаты рентгеноспектрального анализа химического состава зоны соединения при приварке стальной ленты марки 50ХФА на основы из стали 45 через промежуточные слои Стемет 1301А (аморфная лента) и полученный холодным газодинамическим напылением порошка Ni3–00–02 производства Димет представлены на рис. 2.

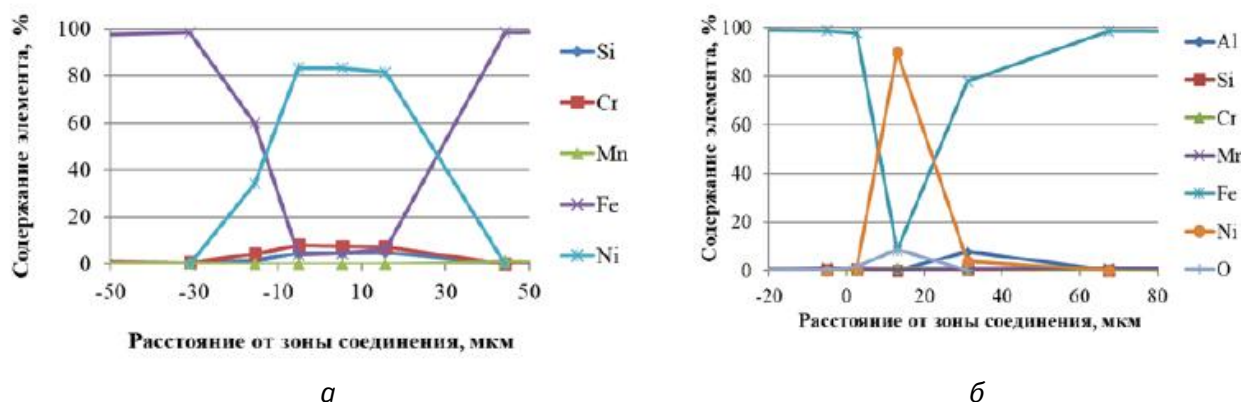


Рис. 2. Рентгеноструктурный анализ зоны соединения при использовании промежуточных слоев:
а — Стемет 1301; б — Димет N3–00–02

Диффузионная зона составляет от 20 до 80 мкм. Для дальнейших расчетов примем эту величину равно 50 мкм, что соответствует первоначальной толщине Стемет 1101. Следовательно, на этой протяженности химический состав изменяется от состава стали до химического состава промежуточного слоя. Кроме того, в исследованиях имеется точка измерений, где химический состав сплава содержит 34,2 % никеля, что соответствует максимуму элек-

тросопротивления в системе железо–никель — 0,83 мкОмм, что в более чем в 7 раз больше стали и в 9,5 раз чистого никеля. Проведя интегрирование методом трапеций графика удельного электрического сопротивления железо–никелевых сплавов [5], было получено среднее по химическому составу удельное электрическое сопротивление — 0,288 мкОмм. Расчетную силу сварочного тока для оценки тепловой мощности, выделяемой в зоне соединения определим по выражению [2]:

$$I_{\text{СВ}} = \frac{\sqrt{2} U_{\text{С}} [1 + \cos(\alpha - \varphi)]}{\pi w_1 (2R_{\text{ЭЛ}} + \frac{R_{\text{ЗС}} R_{\text{Ш}}}{R_{\text{ЗС}} + R_{\text{Ш}}} + R_{\text{М}})},$$

где $U_{\text{С}}$ — напряжение сети переменного тока на первичной обмотке трансформатора, В; w_1 — число витков первичной обмотки; $R_{\text{М}}$ — активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора и шин, Ом; $R_{\text{ЗС}}$ — электрического сопротивления зоны соединения, Ом; $R_{\text{Ш}}$ — сопротивление шунтирования через предыдущие сварочные точки, Ом; $R_{\text{ЭЛ}}$ — переходное сопротивление между электродами и присадочным материалом, Ом; α и φ углы включения тиристора и сдвига фаз в цепи. Сопротивление шунтирования $R_{\text{Ш}}$ [2]:

$$R_{\text{Ш}} = 4 \frac{k_{\text{р}} A_{\text{Г}}}{\pi d_{\text{Т}} h_{\text{Л}}} \rho_{\text{Л}} \sqrt{(k_{\text{П}} d_{\text{Т}})^2 + h_{\text{Л}}^2} + 4 \frac{k_{\text{р}} A_{\text{Г}}}{\pi d_{\text{Т}}^2} \rho_{\text{П}} h_{\text{П}} + 4 \frac{k_{\text{р}} A_{\text{Г}}}{\pi d_{\text{Т}}^2} \rho_{\text{Д}} D + \\ + 4 \frac{k_{\text{р}} A_{\text{Г}}}{\pi d_{\text{Т}}^2} \rho_{\text{П}} h_{\text{П}} + 4 \frac{k_{\text{р}} A_{\text{Г}}}{\pi d_{\text{Т}} h_{\text{Л}}} \rho_{\text{Л}} \sqrt{(k_{\text{П}} d_{\text{Т}})^2 + h_{\text{Л}}^2},$$

где $\rho_{\text{Л}}$ и $\rho_{\text{П}}$ — удельные электрические сопротивления присадочного и промежуточного материалов, Ом·м; $h_{\text{Л}}$ и $h_{\text{П}}$ — толщина присадочного и промежуточного материалов, м; $d_{\text{Т}}$ — диаметр сварочной точки, м; $A_{\text{Г}}$ — коэффициент А.С. Гельмана $A_{\text{Г}}$ принимают равным $\sim 0,8$; $\rho_{\text{Д}}$ — удельное электрическое сопротивление материала деталей, Ом·м; $k_{\text{р}}$ — коэффициент, учитывающий неравномерность нагрева деталей (для сталей принимают равным $\sim 0,85$), $k_{\text{П}}$ — коэффициент перекрытия между сварочными площадками. Сопротивление зоны сварки $R_{\text{ЗС}}$ [2]:

$$R_{\text{ЗС}} = 4k_{\text{р}} A_{\text{ГЛ}} \rho_{\text{Л}} \frac{h_{\text{Л}}}{\pi d_{\text{Т}}^2} + \frac{K_{\text{ЛП}}}{P^m} + 4k_{\text{р}} A_{\text{ГП}} \rho_{\text{П}} \frac{h_{\text{П}}}{\pi d_{\text{Т}}^2} + \frac{K_{\text{ПД}}}{P^m} + \\ + 4A_{\text{ГД}} k_{\text{р}} \rho_{\text{Д}} \frac{D}{\pi d_{\text{Т}}^2} + \frac{K_{\text{ПД}}}{P^m} + 4k_{\text{р}} A_{\text{ГП}} \rho_{\text{П}} \frac{h_{\text{П}}}{\pi d_{\text{Т}}^2} + \frac{K_{\text{ЛП}}}{P^m} + 4k_{\text{р}} A_{\text{ГЛ}} \rho_{\text{Л}} \frac{h_{\text{Л}}}{\pi d_{\text{Т}}^2},$$

где $K_{\text{ЛП}}$, $K_{\text{ПД}}$ — коэффициенты, зависящие от материалов контактов, Ом·Н; m — показатель степени, зависящий от характера контактирования; P — сила сжатия, Н.

Расчеты тепловой мощности участвующего в формировании электросопротивления при ЭКП стальной ленты толщиной 0,5 мм марки 50ХФА на вал из стали марки 45 без и с применением никелевого промежуточного слоя с учетом и без учета формирования сопротивления диффузионной зоны для

вторичного напряжения цепи 2 В и различных усилий сжатия электродов представлены на рис. 3.

Обсуждение полученных результатов. Расчеты показали, что применение никелевого промежуточного слоя при усилии сжатия 1500 Н уменьшает эффективность расходования тепловой энергии, но увеличивает относительно применения промежуточных слоев, не повышающих электросопротивление в сплаве с железом значительно.

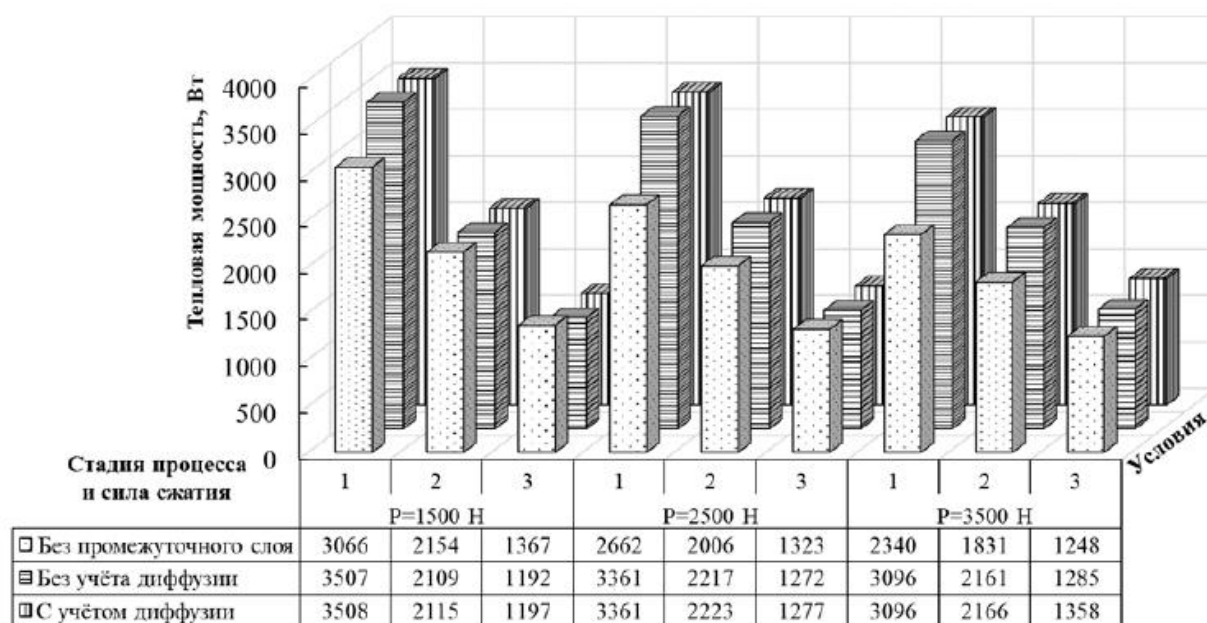


Рис. 3. Расчет теплоты, участвующей в процессе образования соединения при ЭКП

Закключение. Применение промежуточных слоев при электроконтактных способах сварки сталей снижает количество теплоты выделяемой в зоне соединения, однако при применении никелевых промежуточных слоев это влияние уменьшается из-за образования диффузионной зоны с повышенным сопротивлением, кроме того их применение дает положительное влияние при увеличении усилия сжатия электродов на 2 и 3 этапах формирования сопротивления зоны соединения. Кроме того, перспективным в таком контексте может быть применение промежуточных слоев из хрома, циркония, титана и в меньшей степени кобальта при соединении сталей, магния при соединении меди и ее сплавов.

Список источников

- [1] Гаскаров И.Р., Фархшатов М.Н., Латыпов Р.А., Наталенко В.С. *Электроконтактная приварка композиционных покрытий на цилиндрические детали*. Курск, Университетская книга, 2024, 173 с.
- [2] 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. *Электрометаллургия*, 2024, № 5, с. 19–30.

- [3] Burak P.I., Serov A.V., Latypov R.A. Optimization of the process of electric resistance welding of metallic strips through an amorphous solder. *Welding International*, 2012, vol. 26, no. 10, pp. 814–818. <https://doi.org/10.1080/09507116.2011.653168>
- [4] Латыпов Р.А., Булычев В.В., Бурак П.И., Агеев Е.В. *Электроконтактная приварка. Теория и практика*. Курск, Университетская книга, 2016, 371 с.
- [5] Ho C.Y., Ackerman M.W., Wu K.Y., Havill T.N., Bogaard R.H., Matula R.A., Oh S.G., James H.M. Electrical Resistivity of Ten Selected Binary Alloy Systems. *Journal of physical and chemical reference data*, 1983, vol. 12, no. 2, pp. 183–322.