

## Теоретические предпосылки и практическая реализация электроконтактной приварки проволоки с притормаживанием роликового электрода

# 06, июнь 2011

автор: Булычев В. В.

УДК. 621.791.011

Калужский филиале МГТУ им. Н.Э.Баумана

[k4kf@bmstu-kaluga.ru](mailto:k4kf@bmstu-kaluga.ru)

### 1. Актуальность работы.

Процесс электроконтактной приварки (ЭКП) компактных материалов в виде проволоки или металлической ленты является одним из перспективных способов восстановления и упрочнения деталей машин различного назначения. По сравнению с широко применяющимися технологиями восстановления и поверхностного упрочнения деталей машин (дуговая наплавка, напыление, гальваническое осаждение и др.) ЭКП обладает достаточно широкими технологическими возможностями и позволяет осуществлять наращивание слоев металла различного химического состава, толщины и твердости на детали различного диаметра при невысоких материальных затратах. Принципиальная схема процесса ЭКП проволоки пояснена на рис. 1.

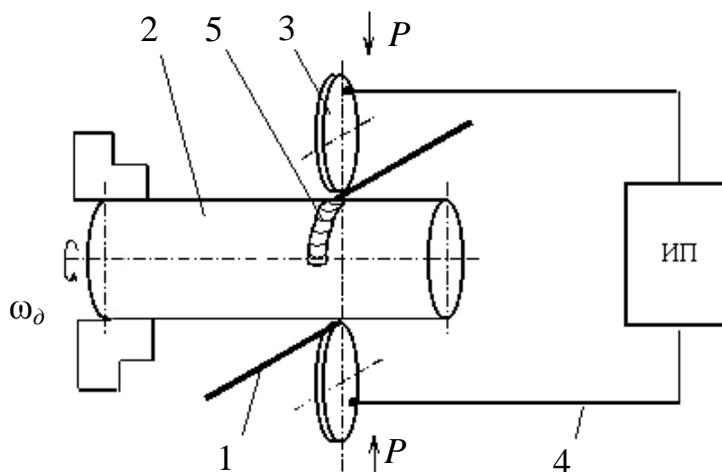


Рис.1. Схема процесса ЭКП проволоки

Присадочные проволоки 1 прижимаются с усилием  $P$  к поверхности детали 2 роликовыми электродами 3, электрически связанными со сварочным источником питания. При пропускании через электроды и деталь импульсов тока силой до 10...16 кА происходит приваривание проволоки к детали, а при вращении детали – формирование валика приваренного металла 5. Формирование сплошного покрытия поверхности детали 2 осуществляется за счет продольной подачи роликовых электродов. В зону приварки для охлаждения детали, электродов, заковки приваренного металла может подаваться охлаждающая жидкость (техническая вода).

Одним из основных, но трудно контролируемым показателем качества восстановленной или упрочненной ЭКП поверхности, является прочность соединения приваренного и основного металлов. Недостаточная прочность соединения приваренного металла может вызвать его отслоение уже в процессе приварки или последующей механической обработки. Гораздо более опасен случай отслоения покрытия в процессе эксплуатации детали. Необходимость обеспечения высокой и стабильной прочности соединения на практике часто приводит к неоправданному завышению мощности и продолжительности импульсов тока приварки. Следствием этого является возникновение локальных очагов плавления привариваемого и основного металлов с сопутствующими дефектами сплошности, увеличение зоны термического влияния. Большинство исследователей, занимающиеся вопросами теории и практики ЭКП, сходятся во мнении, что процесс формирования покрытия и соединения его с основой следует осуществлять без расплавления соединяемых материалов, при этом может быть достигнута высокая прочность соединения, соразмерная с прочностью исходных компактных материалов [1-3].

Таким образом, актуальной практической задачей является повышение прочности соединения проволоки с деталью без увеличения количества вводимой тепловой энергии и, соответственно, минимизацией термического влияния на деталь.

## **2. Теоретические предпосылки повышения прочности соединения металлов при ЭКП за счет проскальзывания привариваемой проволоки**

Опираясь на дислокационную модель образования соединения, и учитывая работы [1-4], можно сделать вывод, что в течение протекания каждого термомеханического цикла приварки решаются следующие основные задачи:

- образование физического контакта по всей площади формируемого соединения за счет смятия микровыступов и удаления поверхностных неметаллических пленок;
- термическая и механическая активация соединяемых поверхностей в процессе нагрева и пластической деформации привариваемого металла и поверхностного слоя детали;
- образование отдельных очагов схватывания вокруг активных центров в виде дислокаций и других дефектов кристаллической решетки;
- слияние очагов схватывания по всей поверхности формируемого соединения, заканчивающееся формированием соединения в виде ориентированной в плоскости контакта межзеренной границы;
- развитие диффузионных процессов, приводящих к образованию в зоне соединения общих зерен, релаксации напряжений и дальнейшему повышению прочностных свойств металлопокрытия.

Таким образом, первым этапом формирования соединения является образование физического контакта между привариваемым и основным металлами за счет смятия микронеровностей.

Деформирование привариваемой проволоки происходит под действием роликового электрода и сопровождается ее растеканием и скольжением по поверхности детали в радиальных и осевом направлениях. Суммарное растекание  $\delta_{\text{пр}}$  проволоки 1 относительно поверхности 2 в произвольной точке  $A$  будет состоять из осевой  $\delta_{\text{ос}}$  и поперечной  $\delta_{\text{п}}$  составляющей (рис.2)

$$\delta_{\text{пр}} = \sqrt{\delta_{\text{ос}}^2 + \delta_{\text{п}}^2}$$

Таким образом, первый этап формирования соединения - смятие микронеровностей, происходит в условиях действия нормальных и сдвиговых напряжений. Полнота протекания этой стадии может быть охарактеризована значением относительной площади контакта

$$\bar{S} = \frac{S_{\text{ф.к.}}}{S_{\text{к}}}$$

где  $S_{\text{ф.к.}}$  - площадь физического контакта;  $S_{\text{к}}$  - контурная площадь контакта.

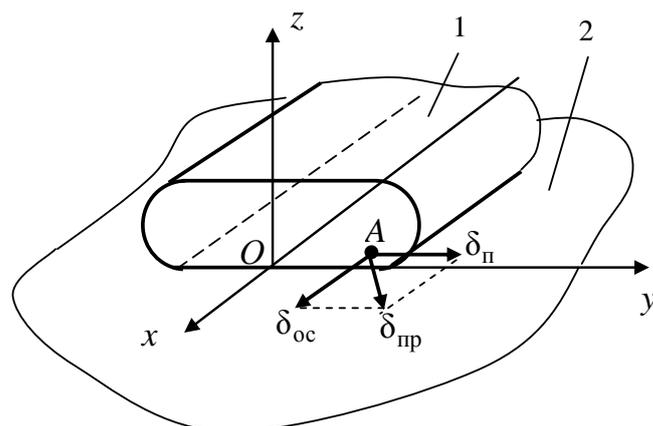


Рис.2. Схема деформирования проволоки при ЭЖП.

В работе [5] получена зависимость, связывающая относительную площадь контакта с температурой и условиями деформирования

$$\bar{S} = \left[ 2 \left( 1 - \frac{T_S}{T_{пл}} \right)^{2/n} \left( \frac{3\sigma_{m,0}m}{P_S} \right)^{1/n} - 1 \right]^{-1} \sqrt{1 + 3f_{mp}^2},$$

где  $T_S$  - температура поверхности;  $T_{пл}$  - температура плавления;  $\sigma_{m,0}$  - предел текучести при  $T = 20^\circ C$ ;  $n, m$  - эмпирические коэффициенты, зависящие от способа предварительной механической обработки поверхности детали [6];  $P_S$  - давление, усредненное по контурной площади контакта;  $f_{mp}$  - коэффициент трения (принимали  $f_{mp} = 0 \dots 0,2$ ).

Расчеты показали, со сплошной физический контакт ( $\bar{S} = 1$ ) между металлами при ЭЖП стальной проволоки обеспечивается при температурах  $1000 \dots 1200^\circ C$ . Проскальзывание проволоки ( $f_{mp} > 0$ ) способствует формированию сплошного физического контакта при меньших температурах нагрева.

После образования физического контакта между поверхностями необходимо обеспечить образование химических связей, то есть схватывание металлов. На этой стадии в качестве оценки прочности получаемого соединения принимают относительную прочность  $\bar{\tau}$  [1-3]

$$\bar{\tau} = \frac{\tau_{св}}{\tau_{осн}},$$

где  $\tau_{св}$  - прочность полученного сварного соединения;  $\tau_{осн}$  - максимально возможная на стадии схватывания прочность сварного соединения, равная прочности межзеренной границы основного металла.

Полагая, что  $\bar{\tau}$  определяется отношением суммарной площади очагов схватывания к общей площади контакта, получили [5,7]

$$\bar{\tau} = \rho_a s, \quad (1)$$

где  $\rho_a$  - плотность активных центров,  $s$  - площадь одного очага схватывания.

В предположении, что очаги схватывания образуются в местах выхода на поверхность металла дислокаций, в работе [7] для расчетной оценки  $s$  получена следующая зависимость

$$s = \pi \left( \frac{a}{2(1-\mu)} \right)^2 \operatorname{tg}^2 \left[ 0,5 \arccos \left( \frac{4\pi^2 k T_{nl} - T - p_S^2 a^3 E^{-1}}{Gb^3} - 1 \right) \right], \quad (2)$$

где  $a$  - межатомное расстояние;  $\mu$  - коэффициент Пуассона;  $k$  - постоянная Больцмана;  $T$  - температура;  $E$  - модуль упругости;  $G$  - модуль сдвига;  $b$  - вектор Бюргера дислокации.

Пренебрегая энергией упругого сжатия поверхностного слоя металла давлением сварки [7], и принимая для железа  $a = 0,28$  нм,  $a = b$ ,  $E = 2,17 \cdot 10^5$  МПа,  $G = 0,89 \cdot 10^5$  МПа, выражение (2) примет вид

$$s \approx 0,126 \operatorname{tg}^2 \left[ 1,157 - 0,5 \arccos 10^{-4} T + 0,83 \right]. \quad (3)$$

Выражения (2) и (3) показывают, что практически единственным способом увеличения  $s$  является повышение температуры нагрева  $T$ . Обеспечение высокой прочности соединения при пониженных температурах возможно за счет повышения плотности активных центров  $\rho_a$ . В работе [5] показано, что, увеличение  $\rho_a$  пропорционально степени пластической деформации соединяемых металлов.

В реальных условиях ЭКП из-за того, что  $f_{mp} > 0$ , скольжение проволоки по подложке сопровождается многократным пластическим деформированием микровыступов и поверхностного слоя проволоки и детали. В связи с этим была выполнена сравнительная энергетическая оценка влияния осадки проволоки и трения скольжения поверхностей на плотность дислокаций.

Удельная работа на единицу площади  $A_p$ , совершаемая при осадке проволоки на величину  $\Delta h$ , составит

$$A_p \approx 0,5 p_S \Delta h \quad (5)$$

Упругой составляющей деформации пренебрежем. Известно, что основная часть работы пластической деформации преобразуется в тепловую энергию, однако некоторая ее доля в размере 2...10 % [6,9], расходуется на структурные изменения, повышая накопленную энергию деформированного металла. Тогда можно записать

$$\Delta E_\partial = k_\partial A_p, \quad (6)$$

где  $\Delta E_\partial$  - энергия деформирования, накапливаемая в поверхностном слое,  $k_\partial$  - коэффициент пропорциональности ( $k_\partial = 0,02 \dots 0,1$ ).

Допустим, что вся накопленная энергия  $\Delta E_\partial$  расходуется на образование  $N_\partial$  дислокаций. Учитывая, что количество дислокаций, приходящееся на единицу площади, является плотностью дислокаций  $\rho$ , запишем

$$\Delta E_\partial = \rho Q_\partial \left( \frac{h}{a} \right), \quad (7)$$

где  $Q_\partial$  - энергия дислокации, приходящаяся на 1 межатомное расстояние;  $a$  - межатомное расстояние;  $h$  - толщина деформированной проволоки.

Из (5-7) после преобразований получим

$$\rho = \frac{p_S k_\partial a \Delta h}{Q_\partial h}.$$

Учитывая, что

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon},$$

где  $\varepsilon$  - осадка проволоки, получили

$$\rho = \frac{p_S k_\delta a}{Q_\delta} \left( \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \right). \quad (8)$$

Удельную работу, совершаемую силой трения на единице площади, опишем зависимостью

$$A_{mp} = 0,5 p_S f_{mp} m, \quad (9)$$

где  $m$  - средняя длина пути трения.

В качестве значения  $m$  при ЭКП приняли величину удлинения привариваемой проволоки за единичный цикл приварки. Примем, что работа трения накапливается в поверхностном слое металла некоторой толщины  $z$ . Упругой составляющей деформации также пренебрегали. Тогда

$$\Delta E_\delta = \rho_{mp} Q_\delta \left( \frac{z}{a} \right), \quad (10)$$

где  $L_{np}$  - длина участка проволоки, привариваемого единичным сварочным циклом;

$\rho_{mp}$  - плотность дислокаций, появление которых вызвано трением.

Приравняв (9) и (10) и учитывая коэффициент пропорциональности  $k_\delta$ , получили

$$\rho_{mp} = \frac{p_S f_{mp} a k_\delta m}{Q_\delta z}. \quad (11)$$

Из выражений (8) и (11) найдем соотношение между  $\rho$  и  $\rho_{mp}$  в виде

$$\frac{\rho_{mp}}{\rho} = \frac{f_{mp} m}{z} \left( \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right).$$

Полагая  $z \approx 0,1$  мм,  $m \approx 1$  мм,  $f_{mp} \approx 0,1$ ,  $\varepsilon \approx 0,5$  получили, что  $\frac{\rho_{mp}}{\rho} \approx 1$ .

Результаты расчетной оценки соотношения плотностей дислокаций свидетельствуют, что осадка проволоки под действием нормальной силы и скольжение привариваемого металла дают одинаковый порядок плотностей дислокаций, и, следовательно, одинаковый порядок плотностей активных центров  $\rho_a$ . Таким образом, интенсификация осевого скольжения привариваемой проволоки должна позволить получать одно и то же прочность соединения при пониженных температурах за счет дополнительного повышения плотности активных центров  $\rho_a$ .

Кроме того, даже если  $\bar{\tau} = 1$  достигается под действием только нормального сварочного давления  $P_S$ , скольжение привариваемого металла можно рассматривать как технологический прием, повышающий стабильность процесса ЭКП за счет поддержания постоянной плотности  $\rho_a$  на поверхностях соединяемых металлов.

### **3. Технологическая реализация процесса ЭКП с управляемой осевой деформацией привариваемой проволоки**

Одной из сил, действующих на проволоку в осевом направлении и вызывающей ее удлинение, является сила трения  $F_{mp}$  между роликовым электродом 1 и проволокой 2 (рис. 4). Именно сила трения  $F_{mp}$  вызывает проворачивание роликового электрода при вращении детали 3, создавая момент

$$M_{\varepsilon} = F_{mp} R_{\varepsilon},$$

где  $R_{\varepsilon}$  - радиус роликового электрода.

Момент  $M_{\varepsilon}$  преодолевает момент  $M_{oc}$  сопротивления вращению роликового электрода, возникающего из-за сил трения между вращающимся электродом и неподвижной осью 4. Прикладывая к роликовому электроду дополнительный момент  $M_{don}$ , можно увеличить момент проворачивания

$$M_3 = M_{oc} + M_{дон},$$

и, тем самым, увеличить силу трения до максимально возможных значений

$$F_{тр} = \frac{M_{oc} + M_{дон}}{R_3}.$$

Увеличение силы трения приводит к увеличению осевой деформации и пути скольжения  $m$  заземленного между роликовым электродом 1 и деталью 3 объема 5 присадочной проволоки 2, нагреваемого импульсом тока приварки.

В паузах между импульсами тока приварки проволока 2 находится в холодном состоянии и пластически не деформируется.

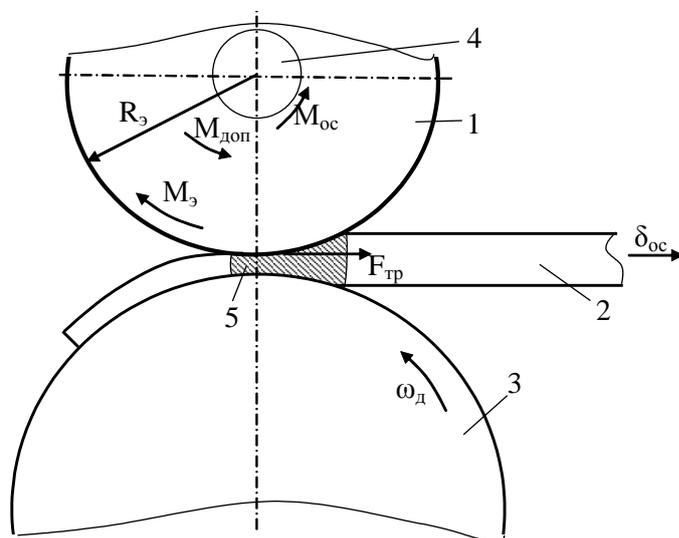
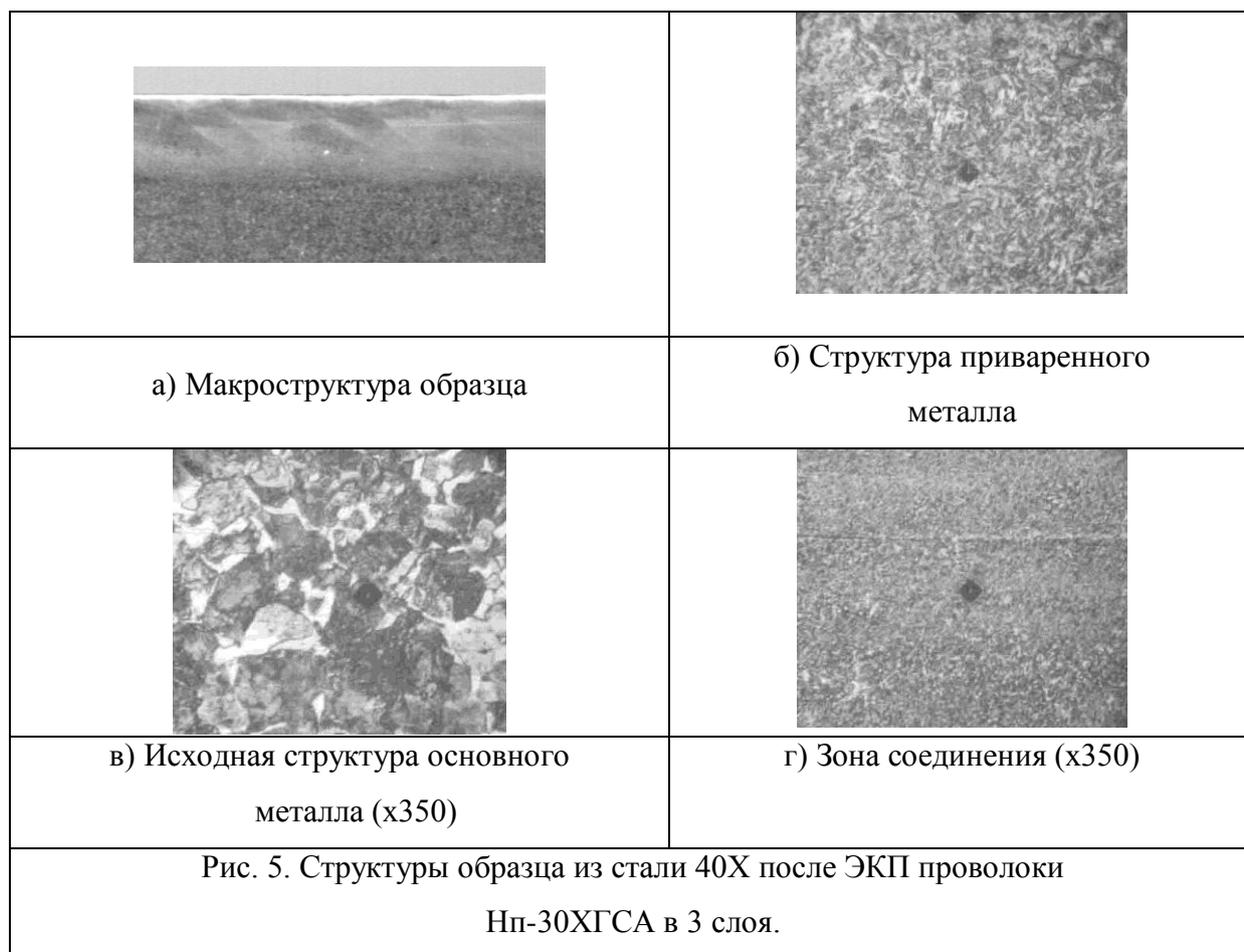


Рис.4. Схема действия моментов на роликовый электрод:

Для экспериментального исследования процесса ЭКП с притормаживанием роликового электрода был применен роликовый узел с регулируемым усилием затяжки роликового электрода, вращающегося на неподвижной оси. Момент проворачивания роликового электрода контролировали динамометрическим ключом. Проволоку Нп-30ХГСА диаметром 1,6 мм приваривали к детали диаметром 40 мм, изготовленной из стали 40Х [8]. Эксперименты показали линейные зависимости между моментом проворачивания роликового электрода, осевой деформацией проволоки и прочностью ее приварки при неизменных остальных параметрах режима ЭКП.

Процесс ЭКП с притормаживанием проволоки был опробован при ЭКП многослойных покрытий. Сложность обеспечения высокой прочности приварки

связана со значительной волнистостью и окисленностью поверхности предыдущего слоя. Именно в этом случае интенсификация процесса скольжения привариваемой проволоки представляется особенно актуальной. Металлографические исследования покрытия, полученного с притормаживанием роликового электрода и состоящего из трех слоев приваренной проволоки, не выявили границ раздела между приваренным и основным металлами, а также между слоями приваренного металла (рис. 5).



Экспериментально установлено, что для предотвращения образования трещин и обрыва проволоки необходимо, чтобы осевая деформация проволоки не превышала 0,65...0,70.

#### **Выводы:**

1. Проскальзывание привариваемой проволоки по поверхности детали облегчает формирование физического контакта между ними, способствует повышению прочности их соединения за счет многократного пластического деформирования микровыступов и, вызванного этим, увеличения плотности активных центров.

2. Разработанный процесс ЭКП с притормаживанием роликового электрода целесообразно применять, в частности, при формировании многослойных покрытий с целью повышения качества межслойных соединений.

### Литература

1. Каракозов Э.С. Соединение металлов в твердой фазе. М.: Металлургия, 1976. 264 с.
2. Клименко Ю.В. Электроконтактная наплавка. М.: Металлургия, 1978. 128 с.
3. Каракозов Э.С., Латыпов Р.А., Молчанов Б.А. Состояние и перспективы восстановления деталей электроконтактной приваркой материалов. М.: Информагротех, 1991. 85 с.
4. Красулин Ю.Л., Назаров Г.В. Микросварка давлением. М.: Металлургия, 1976. 160 с.
5. Булычев В.В., Латыпов Р.А. Особенности пластической деформации при получении покрытий электроконтактной приваркой // Международный научный журнал. 2010. №5. С.78 – 85.
6. Кочергин К.А. Контактная сварка. Л.: Машиностроение, 1987. 240 с.
7. Булычев В.В., Латыпов Р.А. К вопросу о формировании соединения при электроконтактной приварке // Международный технико-экономический журнал. 2010. №5. С.59-65.
8. Булычев В.В., Зезюля В.В. Электроконтактная наварка проволокой с торможением роликового электрода // Сварочное производство. 2009. №-11. С.8-12.