

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРОВОДНИКА НА ТЕЧЕНИЕ МЕТАЛЛА НА ТОРЦЕ ПРОВОЛОКИ В ДУГОВОМ РАЗРЯДЕ

Рассмотрено влияние собственного магнитного поля токоведущей проволоки-анода и магнитного поля электрической дуги на вязкое течение жидкого металла на торце проволоки. Показано, что при рассматриваемых условиях влияние электромагнитной силы на толщину пленки жидкого металла превосходит действие газодинамической силы трения.

Ключевые слова: газоразрядная плазма, магнитное давление, напряжение трения, градиент скорости, напряженность и индукция магнитного поля.

ВВЕДЕНИЕ

Нанесение плазменных покрытий связано с плавлением и распылением проволоки-анода под действием струи плазмы, вытекающей из сопла плазмотрона. Схема процесса плазменного напыления показана на рис. 1. Струя плазмы аргона нагревается в дуговом разряде горящем между катодом – 1 и проволокой-анодом – 3. Для создания сосредоточенного потока плазмы и работы плазмотрона на пусковом режиме используется промежуточный анод-сопло – 2. При подаче проволоки в струю плазмы в режиме напыления электрическая цепь анода-сопла разрывается и весь ток дуги переключается на проволоку – 3, которая становится анодом.

Существенное влияние на температуру распыляемого металла оказывает толщина жидкой пленки и скорость течения металла на торце проволоки. При наличии градиента температуры в пленке металла, температура ее поверхности связана с толщиной расплава. Уровень температуры поверхности жидкой пленки металла оказывает принципиальное влияние на характер теплообмена электрода с потоком плазмы, поскольку при перегреве поверхности металла возникает струя пара, возрастает реактивное давление плазмы над поверхностью металла и изменяется характер конвективного теплообмена на

торце проволоки. Возникновение струи металлического пара чрезвычайно усложняет расчет теплообмена поверхности металла с потоком плазмы и является нежелательным для процесса напыления, поскольку искажает гидродинамику и стабильность плазменной струи сформированной в канале плазмотрона. Струя металлического пара, истекающая по нормали к поверхности расплава, направлена под углом к струе плазмотрона. При этом происходит рассеяние металлического пара и снижение качества наносимого покрытия. Поэтому задача определения толщины и температуры пленки жидкого металла является достаточно важной для анализа тепловых и газодинамических процессов при нагреве и распылении проволоки в струе плазмы.

Применительно к процессу электродуговой металлизации показано, что наибольшее влияние на скорость течения пленки оказывают газодинамическая и электромагнитная силы, возникающие при повороте токоведущего канала [1, 2]. Однако, применительно к плазменному напылению, влияние электромагнитной силы на течение жидкого металла не рассматривалось. Поэтому направление исследования можно считать актуальным.

Согласно рис. 1, токоведущий канал, образованный проволокой 3 и струей плазмы вытекающей из сопла 2, имеет резкий изгиб в зоне контакта плазмы с проволокой. Напряженность магнитного поля над проволокой оказывается больше, чем с внешней стороны угла токоведущего канала. В связи с этим, электромагнитная сила, которая вызывает пинч-эффект в прямолинейном проводнике с током, окажется неуравновешенной и будет совпадать с направлением течения металла на торце проводника, что приводит к изменению толщины пленки. Поэтому цель работы заключается в исследовании влияния электромагнитной силы на толщину пленки металла на торце проволоки-анода.

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА

При контакте токоведущего канала плазмы с токоведущей проволокой происходит поворот тока на угол

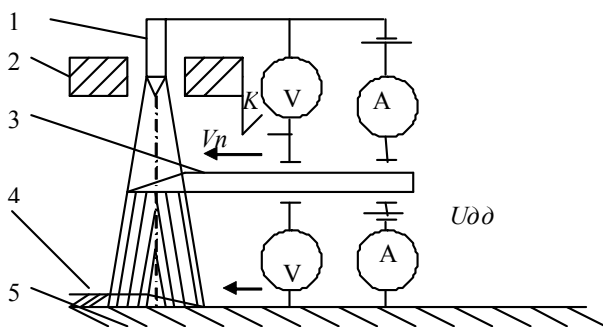


Рис. 1. Схема установки для плазменного напыления

1 – катод; 2 – анод-сопло; 3 – распрыскиваемая проволока – анод; 4 – покрытие; 5 – подложка

90°, вследствие чего в месте поворота происходит концентрация силовых линий магнитного поля тока, рис. 2. Ток $-I$, проходящий по проволоке – 1 через пленку расплавленного металла толщиной δ , переходит в столб газоразрядной плазмы – 2, поворачивая вверх.

Для определения напряженности магнитного поля в плоскости течения металла вдоль оси $-X$ используем закон Био-Савара-Лапласа. Ось X расположена вдоль границы зоны плавления металла, ее начало совпадает с центром проводника. Примем, что угол между осью проволоки и осью $-X$ составляет 45° . Определим магнитное поле на поверхности проводника в точках контакта с плазмой, используя принцип суперпозиций при наличии симметрии магнитного поля, создаваемого проводником и плазмой. Для упрощения расчетов принимается, что токи проволоки и разряда сосредоточены на оси проводника и плазменного потока, рис. 3.

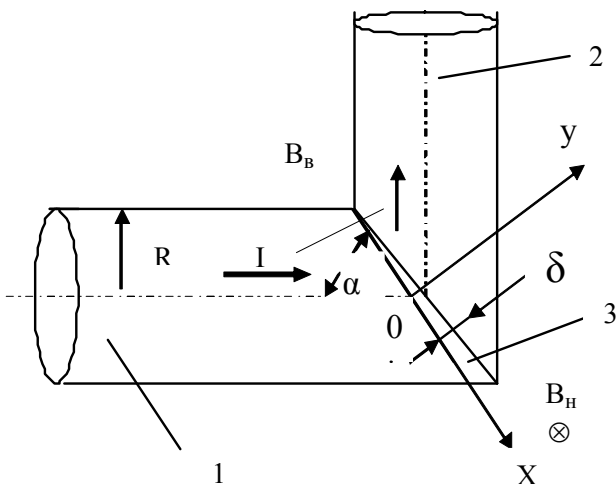


Рис. 2. Схема взаимодействия проволоки-анода – 1 с потоком плазмы – 2 и пленкой расплавленного металла – 3

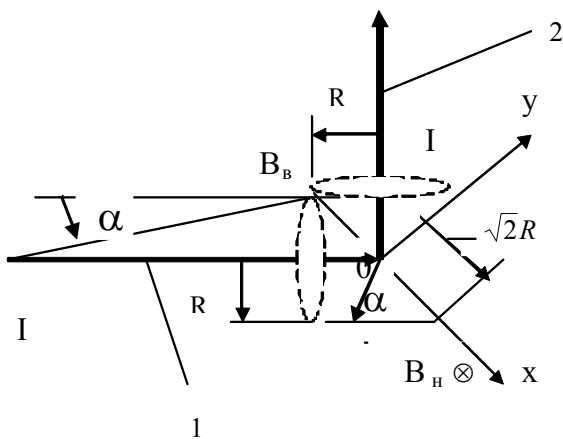


Рис. 3. Схема расчета индукции магнитного поля на расстоянии R от сосредоточенных токов проволоки-анода – 1, и дугового разряда – 2, при повороте токового канала

При этом суммарное магнитное поле будет равно удвоенному магнитному полю проводника. Таким образом, индукция магнитного поля на верхней поверхности проводника определится

$$B_v = 2 \int_0^{3\pi/4} \mu_0 \frac{I \sin \alpha}{4\pi R} d\alpha = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \left(\frac{\sqrt{2}}{2} + 1 \right), \quad (1)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, I – ток дуги, R – радиус проводника, α – угол изменения радиус-вектора проведенного из рассматриваемой точки к оси проводника. Для наиболее удаленных точек проводника – $\alpha = 0$, а для точек лежащих на поверхности расплава – $\alpha = 3\pi/4$. В формуле (1) принимается, что относительная магнитная проницаемость проволоки равна единице, поскольку ее температура выше точки Кюри.

Аналогично определится индукция магнитного поля на нижней поверхности проводника при контакте с поверхностью расплава

$$B_n = -2 \int_0^{\pi/4} \mu_0 \frac{I \sin \alpha}{4\pi R} d\alpha = -\frac{\mu_0 I}{2\pi R} \left(\frac{\sqrt{2}}{2} - 1 \right). \quad (2)$$

В отличие от формулы (1), в (2) угол α , определяющий изменение радиус-вектора проведенного из рассматриваемой точки к оси проводника, изменяется в пределах от 0 до $\pi/4$ а не до $3\pi/4$, что и является причиной превышения индукции магнитного поля на верхней поверхности проводника.

Поскольку толщина пленки металла по предварительным оценкам достаточно мала и изменяется в пределах (0,05–0,15) мм [1–3], то при расчете течения металла на торце электрода можно использовать приближение вязкого течения, при котором инерционные члены уравнения движения не учитываются. При этом, уравнение магнитной гидродинамики имеет вид [4]

$$\frac{dp}{dx} + jB = -\frac{\partial \tau}{\partial y}, \quad (3)$$

где p – статическое давление, x и y – продольная и поперечная координаты, j – плотность тока, τ – напряжение вязкого трения.

Для интегрирования уравнения (3) зададим граничные условия для координат x и y , учитывая, что начало координат расположено на плоскости расплава в центре проводника, рис. 2. При изменении координаты $-x$ задаются пределы изменения давления плазмы и индукции магнитного поля

$$\begin{aligned} x = -R\sqrt{2} : P = P_0, \quad B = B_v, \\ x = R\sqrt{2} : P = P_0, \quad B = B_n. \end{aligned} \quad (4)$$

Для координаты y задаются пределы изменения напряжения трения по высоте пленки металла

$$\begin{aligned} y=0: \quad \tau &= \tau_w, \\ y=\delta: \quad \tau &= \tau_\delta, \end{aligned} \quad (5)$$

где P_0 – атмосферное давление, δ – толщина пленки металла, τ_w – напряжение вязкого трения на границе с твердой поверхностью металла, τ_δ – напряжение вязкого трения на границе с поверхностью плазмы.

При интегрировании уравнения (3) учитывается, что плотность тока в проводнике постоянна, а распределение магнитного поля по радиусу проводника – линейное. Интегрирование по координате x обращает в нуль первый член уравнения, поскольку разность статических давлений плазмы на границах интегрирования, в соответствии с (4), отсутствует. При постоянной по длине пленки разности напряжений трения интегрирование (3) дает

$$\tau_w - \tau_\delta = \frac{j(B_B + B_H)\delta}{2}. \quad (6)$$

Подставляя в (6) выражение для плотности тока $j = I / \pi R^2$ и индукции магнитного поля на границах расплава, которые даются формулами (1) и (2), получаем выражение для разности напряжения трения в металле на границах пленки

$$\tau_w - \tau_\delta = \frac{\mu_0 I^2 \delta}{2\pi^2 R^3}. \quad (7)$$

Полученная формула показывает, что напряжение трения при течении жидкого металла формируется совместным действием электромагнитной и газодинамической сил.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проанализируем влияние электромагнитной силы на толщину пленки жидкого металла. При расположении проволоки на границе струи плазмы, скоростью обтекания поверхности металла можно пренебречь, считая, что напряжение трения от газодинамической силы на поверхности пленки равно нулю, а напряжение трения в пленке металла определяется только электромагнитной силой. Для определения напряжения трения на поверхности металла следует найти градиент скорости течения жидкого металла. Для этого используем уравнение неразрывности струи в виде равенства секундного объемного расхода при подаче проволоки и расхода жидкого металла в пленке

$$V = \frac{4 \cdot V_{II} R}{\delta}, \quad (8)$$

где V_{II} – скорость подачи проволоки. В формуле (8) учтено, что скорость течения на поверхности металла в

2 раза больше средней скорости. Учитывая, что напряжение трения определяется градиентом скорости течения и динамической вязкостью металла,

$$\tau = -\eta \frac{V}{\delta}, \quad (9)$$

из (7)–(9) определяем формулу для толщины пленки металла при стекании с торца проволоки

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{8\pi^2 R^4 \eta V_{II}}{\mu_0 I^2}}, \quad (10)$$

где η – динамическая вязкость жидкого металла. Расчет показывает, что для стальной проволоки, при экспериментальных значениях: $R = 0,6 \cdot 10^{-3}$ м, $V_{II} = 0,13$ м/с, $I = 170$ А, табличных величинах: $\eta = 5,5 \cdot 10^{-3}$ Па с, [5], $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, толщина пленки металла при стекании с проволоки составит $0,6 \cdot 10^{-4}$ м, что меньше толщины пленки металла полученной при близких условиях в работе [3] под воздействием только газодинамической силы. Толщина пленки полученная в [3] составляла $0,1 \dots 0,15 \cdot 10^{-3}$ м, в зависимости от параметров режима. Следовательно, электромагнитное воздействие на течение пленки металла является более существенным, чем газодинамическое. Для определения совместного влияния газодинамической и электромагнитной сил на толщину пленки жидкого металла определим напряжение трения созданное газодинамической силой по формуле (9) подставив $\delta = 10^{-4}$ м. Расчетом получено $\tau_\delta = 1,7 \cdot 10^{-2}$ Па. Подставив эту величину в (7), учитывая (8), и (9) находим, что толщина пленки металла составит $0,53 \cdot 10^{-4}$ м. Таким образом, влияние электромагнитной силы на толщину пленки жидкого металла при рассматриваемых условиях оказывается более существенным, чем действие газодинамической силы трения потока плазмы.

ВЫВОДЫ

1. Полученные формулы для определения напряжения трения и толщины пленки при течении расплавленного металла под воздействием электромагнитной силы возникающей при повороте токового канала позволяют определить толщину пленки жидкого металла на поверхности проволоки – анода.

2. Показано, что при рассматриваемых условиях влияние электромагнитной силы на толщину пленки жидкого металла превосходит действие газодинамической силы трения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коробов Ю. С. Оценка сил, действующих на распыляемый материал при электрометаллизации /

- Ю. С. Коробов // Автоматическая сварка. – 2004. – № 7. – С. 23–27.
2. Коробов Ю. С. Кинетика взаимодействия напыляемого металла с кислородом при электродуговой металллизации / Ю. С. Коробов, В. Н. Бороненков // Сварочное производство. – 2003. – № 7. – С. 30–36.
 3. Харламов М. Ю. Формирование пленки жидкого металла на торце проволоки-анода при плазменно-дуговым напылении / [Харламов М. Ю., Кривцун И. В., Коржик В. Н., Петров С. В.] // Автоматическая сварка. – 2011. – № 12. – С. 3–8.
 4. Вулис Л. А. Теория и расчет магнитогазодинамических течений / Л. А. Вулис, А. Л. Генкин, Б. А. Фоменко. – М. : Атомиздат, 1971. – 383 с.
 5. Курдюмов А. В. Литейное производство цветных и редких металлов / А. В. Курдюмов, М. В. Пикунов, В. М. Чурсин. – М. : Metallurgia, 1982. – 352 с.

Стаття надійшла до редакції 23.01.2014.
Після доробки 20.02.2014.

Єршов А. В.¹, Зеленина О. А.²

¹Д-р техн. наук, професор, Запорізький національний технічний університет, Україна

²Запорізький національний технічний університет, Україна

ВПЛИВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ПРОВІДНИКА НА ТЕЧІЮ МЕТАЛЛА НА ТОРЦІ ДРОТУ У ДУГОВОМУ РОЗРЯДІ

Розглянуто вплив власного магнітного поля струмоведучого дроту-анода і магнітного поля електричної дуги на в'язку течію рідкого металу на торці дроту. Показано, що при розглянутих умовах вплив електромагнітної сили на товщину плівки рідкого металу перевищує дію газодинамічної сили тертя.

Ключові слова: газорозрядна плазма, магнітне тиск, напруга тертя, градієнт швидкості, напруженість і індукція магнітного поля.

Yershov A. V.¹, Zelenina O. A.²

¹Ph.D., professor, Zaporizhzhya National Technical University, Ukraine

²Zaporizhzhya National Technical University, Ukraine

INFLUENCE OF THE MAGNETIC FIELD OF THE CONDUCTOR ON THE METAL CURRENT AT THE WIRE END FACE IN THE ARC DISCHARGE

The influence of the intrinsic magnetic field of current-carrying wire, the anode and the magnetic field of an electric arc to the viscous flow of the liquid metal at the end of the wire was considered. It is shown that when the direction of the current at the end of the wire-anode changes the asymmetry of magnetic field distribution arises, that leads to an acceleration of the liquid metal flow. By using the equations of magneto-hydrodynamics the additional stress caused by viscous friction of unbalanced electromagnetic forces was found. It is shown that the shear stress in the flow of molten metal was formed under the joint action of the electromagnetic and gas dynamic forces. It was determined that the film thickness in the flow of molten metal only under the influence of the electromagnetic force is lower than the influence of the gas dynamic forces. The conclusion shows that under the above conditions, the influence of the electromagnetic forces on the film thickness of the liquid metal is significantly superior to gas-dynamic friction.

Keywords: discharge plasma, magnetic pressure, shear stress, velocity gradient, tension and the magnetic field.

REFERENCES

1. Korobov Ju. S. Ocenka sil, dejstvujushhij na raspyljaemyj material pri jelektrometallizacii, *Avtomaticheskaja svarka*, 2004, No. 7, pp. 23–27.
2. Korobov Ju. S., Boronenkov V. N. Kinetika vzaimodejstvija napyljaemogo metalla s kislorodom pri jelektrodugovoj metallizacii, *Svarochnoe proizvodstvo*, 2003, No. 7, pp. 30–36.
3. Harlamov M. Ju. Krivcun I. V., Korzhik V. N., Petrov S. V. Formirovanie plenki zhidkogo metalla na torce provoloki-anoда pri plazmenno-dugovom napylenii, *Avtomaticheskaja svarka*, 2011, No. 12, pp. 3–8.
4. Vulis L. A. Genkin A. L., Fomenko B. A. Teorija i raschet magnitogazodinamicheskij techenij. Moscow, Atomizdat, 1971, 383 p.
5. Kurdjumov A. V., Pikunov M. V., Chursin V. M. Litejnoe proizvodstvo cvetnyh i redkih metallov. Moscow, Metallurgija, 1982, 352 p.