

УДК621.791.3

Ю. А. Цумарев, канд. техн. наук, доц., Т. С. Латун, С. С. Павлюк, Е. Ю. Латыпова

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКОВ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ В СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССАХ

Выполняя работы по сварке, пайке и термической резке, приходится сталкиваться с нагревом и охлаждением деталей, что представляет собой процесс конвективного теплообмена, который происходит при использовании потоков жидкости или газа. Для повышения эффективности теплообменного процесса предлагается использование вращательного движения, т. к. закрученные потоки позволяют повысить эффективность конвективного теплообмена без повышения мощности используемого пламени. Закручивание потока увеличивает перепад давления и уменьшает осевые струйного аппарата.

Сварка вместе с родственными технологическими процессами пайки, напыления и кислородной резки является важной составной частью промышленного комплекса Республики Беларусь. В настоящее время она представляет одну из наукоемких составляющих национальной экономики. С ее эффективным использованием во многом связан прогресс не только в машиностроении, но и в таких отраслях техники, как криогеника, энергетика, а также химическая промышленность. В то же время сварка является весьма энергоемким процессом и для нее особенно актуальной является задача энергосбережения.

Из всего многообразия физико-химических процессов, с которыми связано выполнение работ по сварке, пайке и термической резке, наиболее часто приходится сталкиваться с нагревом обрабатываемых деталей, а также с охлаждением элементов используемого оборудования. При этом широко используются потоки жидкостей и газов, нагрев или охлаждение с участием которых представляет собой единый процесс конвективного теплообмена. Интенсивность конвективного теплообмена в значительной степени определяет эффективность соответствующего процесса нагрева или охлаждения, т. е. его энергоемкость, термический КПД, производительность труда, а зачастую и качество продукции. Например, в процессе пайки с использованием газового пламени интенсивность теплопередачи от

раскаленных газов к паяемому изделию определяет не только энергетические затраты, но и быстроту нагрева, что, в свою очередь, отражается на степени окисления нагретых областей и условиях заполнения зазоров припоем. Аналогичным образом при охлаждении электродов для контактной электрической сварки потоком охлаждающей жидкости (воды) интенсивность теплообмена на границе этого потока с охлаждаемой поверхностью определяет температуру в контакте «электрод–деталь» и соответственно срок службы электрода [2].

Как известно [1], интенсивность конвективного теплообмена между поверхностью твердого тела и потоком жидкости или газа определяется величиной безразмерного коэффициента теплоотдачи (критерия Нуссельта). При турбулентном потоке жидкости или газа величина этого критерия определяется по формуле

$$Nu = \alpha l / \lambda = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4}, \quad (1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи; l – характерный размер; λ – коэффициент теплопроводности жидкости или газа; Pr – критерий Прандтля.

$$Re = vl / \mu,$$

где Re – критерий Рейнольдса; v – скорость частиц потока; μ – кинематическая вязкость.

Формула (1) показывает, что от механического состояния используемого потока зависит эффективность нагрева или охлаждения. Из всех параметров, представленных в формуле (1), варьировать для повышения интенсивности конвективного теплообмена с соответствующим увеличением численного значения критерия Нуссельта Nu в условиях сварки можно практически только скоростью движущихся частиц. Однако возможности изменения скорости в известных типах сварочного оборудования ограничены, т. к. это связано с изменением расхода.

Для ускорения теплоотдачи от стенки к ядру потока прежде всего следует рассмотреть процессы, происходящие в пристенном пограничном слое с ламинарным характером движения, т. к. его термическое сопротивление составляет около 70 % от общего теплового сопротивления [1]. На характер этих процессов значительное влияние оказывает шероховатость поверхности, взаимодействующей с потоком. Экспериментально было установлено [3], что при достаточно большой скорости за выступами шероховатостей образуются зоны завихрений. При этом между зонами завихрений и ядром потока происходит интенсивный беспорядочный турбулентный обмен жидкими массами. Поэтому большую эффективность обеспечивает такой способ турбулизации потока, который приводит к появлению отрывных течений, характеризующихся весьма тонким вихревым слоем, прилегающим к стенке канала. Это подтверждают и данные Лауфера [4], который обнаружил наличие интенсивной пульсации вблизи области ламинарного слоя. По нашему мнению, эти данные позволяют предложить для повышения эффективности теплообменного процесса в сварке использование вращательного движения как одной из составляющих абсолютного движения частиц потока. Это предложение основано на двух особенностях вращательного движения:

– даже самое интенсивное вращательное движение не изменяет расхода используемого газа или жидкости;

– распределение скоростей при вращательном движении обеспечивает максимальное их значение как раз в области, прилегающей к стенке трубы.

Результирующее движение при сложении поступательного и вращательного будет близким к винтовому, поток окажется закрученным, а траектории движения частиц – криволинейными.

Еще одно преимущество данного предложения состоит в простоте технической его реализации и возможности установки соответствующего устройства не только при изготовлении нового оборудования, но и модернизации находящегося в эксплуатации. Основой устройства, создающего вращательную составляющую движения, является винтовая канавка, расположенная у стенок трубы, ленточный завихритель, тангенциальный ввод потока в круглый канал, а также участок трубы некруглого сечения, закрученной вокруг собственной оси. Все эти разновидности вращателей не загромождают проходных каналов, имеют малую материалоемкость и габариты, а при настройке режима их можно быстро заменить, подбирая деталь с требуемым шагом.

Вопрос о зависимости шага винтовой линии, которая является траекторией движения частиц потока, от диаметра канала подробно рассмотрен нами в [5]. Как было установлено в этой работе, в гладком канале шаг винтовой линии не зависит от его диаметра.

В системах водяного охлаждения электродов для контактной точечной и рельефной сварки нами была предложена конструкция электродного узла, отличительной особенностью которой является установка ленточного завихрителя внутри трубки для подачи воды к рабочему торцу [6]. Ленточный завихритель представляет собой тонкую металлическую полосу, закрученную вокруг собственной оси и имеющую ширину, равную диаметру канала. Его использование заметным образом улучшило ох-

лаждение электрода. Непосредственное измерение показало, что температура нагрева на расстоянии 5 мм от торцевой поверхности электрода после сварки 25 точек уменьшилась со 170 до 140 °С. Соответствующим образом повысилась стойкость электрода и улучшилось качество поверхности сварного соединения за счет уменьшения глубины вмятин.

Наиболее интересным с точки зрения эффективности использования закрученного потока является процесс кислородной резки. В нем образование реза связано с целым рядом процессов физического и химического порядка. Основным здесь является химический процесс горения разрезаемого металла в струе кислорода высокой чистоты. Но для успешной реализации этого процесса необходимо обеспечить нагрев разрезаемого металла до температуры воспламенения и удаление продуктов реакции окисления в виде жидкого шлака из зоны реза. Использование закрученного потока режущего кислорода позволяет повысить эффективность каждого из этих процессов. Рассмотрим более подробно, как влияет вращение на процесс кислородной резки. Он характеризуется значительно меньшими, чем в системе водяного охлаждения величинами радиусов цилиндрической струи ($r = 0,1 \dots 0,25$ см) и большими скоростями, распределение которых при вращательном движении обеспечивает максимальное их значение как раз в области, прилегающей к стенке трубы.

Так, по данным [7] скорость истечения кислорода составляет $v_k = 300$ м/с, а скорость движения шлака $v_{ш} = 70$ м/с. Шаг закрутки при этом примерно равен толщине разрезаемого металла. Тогда для толщины $h = 70$ мм получим величину радиуса кривизны винтовой линии

$$R = \frac{r^2 + \frac{h^2}{4\pi^2}}{r} = 8,3 \text{ см.}$$

При равномерном движении по криволинейной траектории частицы имеют нормальное ускорение, величина которого

определится по общеизвестной формуле

$$a_n = v^2 / R. \quad (2)$$

Модуль нормального ускорения частиц кислорода при их движении по винтовой траектории

$$a_{нк} = v_k^2 / R = 10^6 \text{ м/с}^2. \quad (3)$$

Аналогично определится нормальное ускорение частиц шлака:

$$a_{шу} = v_{ш}^2 / R = 59036 \text{ м/с}^2. \quad (4)$$

Этому ускорению соответствуют силы инерции, которые свидетельствуют о значительном механическом взаимодействии шлака с разрезаемым металлом. Эти силы, распределяясь по поверхности соприкосновения струи с образующимся резом, выдавливают шлак из зоны реза, уменьшают его толщину и способствуют нарушению сплошности. При этом облегчается проникновение кислорода через такую пленку шлака к разрезаемому металлу и процесс горения резко ускоряется.

Таким же образом криволинейность траекторий частиц кислородной струи увеличивает их механическое взаимодействие с частицами шлака, что способствует более быстрому удалению последних. Благодаря вращению кислородной струи лучше используется весь ее объем, т. к. с разрезаемым металлом поочередно соприкасаются и передняя и задняя части струи. Ускорение двух основных процессов – горения металла и удаления шлака – в итоге дает возможность увеличить скорость образования реза. При экспериментальной проверке основное время резки за счет применения ленточного завихрителя, установленного в мундштуке резака, уменьшилось с 12 до 9 с, т. е. на 25 %.

Изложенные предложения были реализованы в ряде конструкций узлов, используемых в процессах сварки, пайки и кислородной резки [8–12]. В [13], кроме того, предложено использовать схему

закрученного потока для подачи его в инжектор резака. Чтобы оценить эффективность использования закрученного потока в канале инжектора рассмотрим принцип действия этого струйного аппарата.

Инжектор газопламенных горелок – это устройство, которое обеспечивает непрерывное смешивание двух потоков разных давлений (кислорода высокого давления и горючего газа с более низким давлением) и образование однородной горючей смеси. Инжектируемый горючий газ, имеющий давление p_2 , с помощью инжектирующего потока кислорода всасывается в него, а затем сжимается, находясь в составе горючей смеси, до давления p_3 . Всасывание горючего газа происходит за счет расширения инжектирующего потока при прохождении его через узкое сопло от первоначального давления p_1 до величины p_2^1 , что обуславливает тем самым приток горючего газа в камеру смешения. Инжектирующий поток, проходя с большой скоростью через камеру смешения, увлекает за счет поверхностного трения требуемое количество горючего газа и смешивается с ним. При дальнейшем движении смешанного потока через диффузор его скорость падает, а давление соответственно возрастает до величины p_3 . Важнейшей характеристикой инжектора является массовое количество инжектируемого газа, приходящееся на единицу массы инжектирующего газа [14], которая называется коэффициентом инжекции.

Таким образом, движущей силой процесса инжектирования является перепад давления инжектирующего газа $\Delta p = p_1 - p_{21}$. Чтобы определить его, воспользуемся уравнением Бернулли для потока кислорода:

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + g \cdot H = const, \quad (5)$$

где v – скорость потока; H – высота; p – давление; ρ – плотность кислорода.

Результат (5) показывает, что инжек-

торы рассмотренной конструкции не позволяют получать разрежение требуемой величины при малых расходах кислорода, т. к. скорость потока напрямую зависит от его расхода.

Другим недостатком применяемых инжекторов является плохое перемешивание горючего газа с кислородом, например, при использовании в качестве горючего газа метилацетилен-алленовой фракции, которая является дешевым и в то же время достаточно полноценным заменителем ацетилена.

Запишем результат (5) в развернутой форме и определим перепад давления инжектирующего газа:

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + g \cdot H_1 = \frac{v_{21}^2}{2} + \frac{p_{21}}{\rho} + gH_{21}. \quad (6)$$

С учетом того, что $H_1 = H_{21}$, получим:

$$\Delta p = \frac{\rho}{2}(v_{21}^2 - v_1^2), \quad (7)$$

где p_{21} – давление кислорода на выходе из сопла; v_{21} – скорость потока, выходящего из сопла.

В закрученном потоке, выходящем из сопла, скорость v_{21} необходимо определять векторным суммированием осевой и окружной составляющих. Ввиду взаимной перпендикулярности складываемых векторов можно записать:

$$v_{21}^2 = v_{oc}^2 + v_{ок}^2, \quad (8)$$

где v_{oc} – модуль вектора осевой скорости закрученного потока в сопле; $v_{ок}$ – окружная составляющая скорости.

Окружная составляющая скорости зависит от шага закрутки h , увеличиваясь при его уменьшении:

$$v_{ок} = \omega \cdot r_u = \frac{2 \cdot \pi \cdot v_{oc} \cdot r_u}{h} = \frac{2 \cdot \pi \cdot v_{oc} \cdot d_u}{2 \cdot h}, \quad (9)$$

где r_u – радиус сопла; d_u – диаметр сопла, $d_u = 2 \cdot r_u$; ω – угловая скорость

вращения газа в потоке.

Подставив результат (9) в выражение (8), получим:

$$\begin{aligned} v_{2l}^2 &= v_{oc}^2 + \left(\frac{\pi \cdot v_{oc} \cdot d_u}{h} \right)^2 = \\ &= v_{oc}^2 \cdot \left(1 + \frac{\pi^2 \cdot d_u^2}{h^2} \right). \end{aligned} \quad (10)$$

Подставив найденные значения в (7), определим искомый перепад давления:

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} \left(v_{oc}^2 + v_{oc}^2 \frac{\pi^2 d_u^2}{h^2} - v_l^2 \right). \quad (11)$$

Результат (11) можно переписать в несколько ином виде:

$$\begin{aligned} \Delta p &= \frac{\rho}{2} (v_{oc}^2 - v_l^2) + \frac{\rho}{2} v_{oc}^2 \frac{\pi^2 d_u^2}{h^2} = \\ &= \Delta p_{oc} + \frac{\pi^2 \rho}{2} \frac{d_u^2}{h^2} v_{oc}^2. \end{aligned} \quad (12)$$

где Δp_{oc} – перепад давления при осевом вводе потока кислорода в инжектор (при использовании незакрученного потока).

Из результата (12) следует, что закрученный поток обеспечивает увеличение перепада давления инжектирующего газа на величину, прямо пропорциональную квадрату отношения диаметра сопла к шагу закрутки.

В рабочем сопле инжектора происходит расширение потока кислорода от давления p_1 до давления p_2 в приемной камере. В газоструйных аппаратах с большой степенью расширения, к которым относятся и инжекторы, рабочее сопло должно иметь расширяющийся участок [14]. В противном случае в выходном сечении сопла установится критическое давление, и дальнейшее расширение газа будет происходить за соплом с большими потерями. При этом продольное сечение струи будет сужающимся, а смешивание кислорода и горючего газа замедлится.

Закрученный поток ведет себя по-иному. Для визуального оценивания по-

ведения закрученного потока использовалось специальное устройство [15], принцип действия которого основан на окрашивании газового потока. Такая визуальная оценка, проведенная после окрашивания газовой струи частицами хлорида аммония, показала, что в закрученном потоке расширение внешних границ струи происходит гораздо быстрее и даже при цилиндрической форме сопла оно начинается сразу за его срезом. В результате этого использование газопламенных горелок с закрученным потоком горючей смеси, вытекающей из мундштука, способствует изменению формы всех характерных зон пламени. Более широкими оказываются и ядро, и восстановительная зона, и факел пламени. Поэтому такое пламя дает менее концентрированный нагрев, который хорошо подходит для процессов пайки, закалки, кислородной резки, а также для всех видов подогрева, выполняемого в качестве меры против сварочных деформаций и образования закалочных структур.

Исходя из вышеизложенного, рассмотрим схему свободной струи и поля скоростей для нескольких ее сечений.

В выходном сечении рабочего сопла обычная струя имеет равномерное поле скоростей. При дальнейшем течении кислородного потока через пространство, заполненное горючим газом, в результате турбулентного перемешивания сред струя увлекает частицы горючего газа из этого пространства. Так образуется турбулентный пограничный слой, толщина которого растет в направлении течения.

С внешней стороны пограничный слой соприкасается со средой, скорость которой равна нулю. С внутренней стороны пограничный слой переходит в ядро постоянных скоростей, равных скорости истечения потока из сопла. По мере удаления от сопла сечение ядра постоянной скорости уменьшается и на некотором расстоянии от сопла это ядро полностью исчезает. Сечение струи, в

котором отсутствуют ядра постоянной скорости, называют переходным [14]. Переходное сечение делит струю на два участка – начальный и переходной. На основном участке расширение внешних границ струи сопровождается падением скорости на ее оси.

Вращение струи существенным образом меняет картину. Повышается эффективность теплообменного процесса, т. к. вращательное движение является одной из составляющих движения частиц потока. Одновременно изменяется исходное распределение абсолютных скоростей. Максимальными оказываются скорости частиц, расположенных у стенок сопла, а минимальными – в центре струи. Поэтому турбулентное перемешивание кислорода с горючим газом происходит гораздо интенсивнее, а толщина турбулентного пограничного слоя растет быстрее. Кроме того, из-за центробежных сил расширение внешних границ струи происходит с большей скоростью. Совокупность этих факторов приводит к тому, что внутренняя граница турбулентного пограничного слоя быстро достигает оси струи, а переходное сечение смещается к срезу сопла. Таким образом, при использовании закрученной струи уменьшаются осевые размеры инжектора, а однородность горючей смеси повышается. Последнее нашло свое подтверждение при экспериментальной проверке, т. к. использование закрученного потока в канале инжектора повысило стабильность горения смеси на основе метилацетиленалленовой фракции.

Выводы

1. Закрученные потоки позволяют повысить эффективность конвективного теплообмена и ускорить нагрев обрабатываемого изделия без повышения мощности используемого пламени.

2. Закручивание потока кислорода, направляемого в инжектор, позволяет увеличить перепад давления, уменьшить

осевые струйного аппарата и улучшить качество горючей смеси.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Воронин, Г. И.** Эффективные теплообменники / Г. И. Воронин, Е. В. Дубровский. – М. : Машиностроение, 1973. – 96 с.
2. **Глебов, Л. В.** Расчет оптимального расхода воды для охлаждения электродов машин контактной точечной сварки / Л. В. Глебов // Автоматическая сварка. – 1986. – № 7. – С. 55–58.
3. **Фридман, Б. А.** О балансе энергии при отрывном турбулентном течении / Б. А. Фридман // Изв. АН СССР. ОТН. – 1959. – № 8. – С. 16–19.
4. **Laufer, I.** The structure of turbulence in fully developed pipe flow / I. Laufer // NASA TN. – 1953. – № 2954.
5. Повышение эффективности работы сварочного оборудования закручиванием используемых в нем потоков жидкости или газа / Ю. А. Цумарев [и др.] // Сварочные технологии и оборудование. – 2004.
6. **Пат. 6509 (С1) ВУ, МПК⁷ В 23 К 11/10.** Электрод для контактной точечной сварки / В. П. Березиенко, Е. Ю. Латыпова, Ю. А. Цумарев ; заявл. 28.04.2000, опубл. 30.09.04.
7. **Пат. 744 (U) ВУ, МПК⁷ В 23 К 7/00.** Резак для кислородной резки / Ю. А. Цумарев, С. В. Павлюк, Е. Ю. Латыпова ; заявл. 15.05.02, опубл. 30.12.02.
8. **Пат. 1280 (U) ВУ, МПК⁷ В 23 К 5/00, 7/00.** Газовая горелка для сварки и пайки / Е. Ю. Латыпова [и др.] ; заявл. 9.04.03, опубл. 30.03.04.
9. **Пат. 1056 (U) ВУ, МПК⁷ В 23 К 7/00.** Устройство для термической резки / С. С. Павлюк [и др.] ; заявл. 22.01.03, опубл. 30.12.03.
10. **Пат. 1057 (U) ВУ, МПК⁷ В 23 К 7/00.** Кислородное копье / С. С. Павлюк, Е. Ю. Латыпова, Ю. А. Цумарев ; заявл. 22.01.03, опубл. 30.12.03.
11. **Пат. 1059 (U) ВУ, МПК⁷ В 23 К 7/00.** Газопламенная горелка / Ю. А. Цумарев [и др.] ; заявл. 22.01.03, опубл. 30.12.03.
12. **Пат. 5366 (С1) ВУ, МПК⁷ F 23 D 14/42, В 23 К 7/02.** Резак для кислородной резки металлов / В. П. Березиенко [и др.] ; заявл. 7.12.99, опубл. 30.09.03.
13. **Соколов, Е. Я.** Струйные аппараты / Е. Я. Соколов, Н. М. Зингер. – М. : Энергия, 1970. – 288 с.
14. **Пат. № 1527 (U), ВУ, МПК⁷ В 23 К 9/00.** Устройство для окрашивания газового потока / Ю. А. Цумарев [и др.] ; заявители и патентообладатели авторы. ; заявл. 02.02.04 ; опубл. 30.09.04.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 27.03.2008

**Yu. A. Tsumarev, T. S. Latun,
S. S. Pavluk, E.Y. Latypova**
**Efficiency of using of torsion flows
of liquids and gases in welding processes**

Doing work in welding, soldering and thermal cutting, one has to face with part heating and cooling which is the process of convection heat transfer caused by the flow of a liquid or a gas. For increasing the efficiency of the heat transfer process it is offered to use rotary motion, for torsion flows allow to raise the efficiency of the convection heat transfer without increasing of the powers of the used flame. Rotation flows increase the swing of the pressure and reduce the axles of the jet device.