

3. Болотов Г. П. Розрахункове визначення температури нагріву деталей при дифузійному зварюванні в тліючому розряді з порожнистим катодом / Г. П. Болотов, М. Г. Болотов // Вісник ЧДТУ. – 2009. – № 40. – С. 23-29.

4. Болотов М. Г. Ефективність нагріву при зварюванні в тліючому розряді з порожнистим катодом / М. Г. Болотов, Т. Р. Ганєєв // Вісник ЧДТУ. – 2012. – № 55. – С. 126-131.

5. Новик Ф. С. Математические методы планирования экспериментов в металловедении / И. С. Новик. – М.: МИСИС, 1972. – 105 с.

6. Растринин Л. А. Статистические методы поиска / Л. А. Растринин. – М.: Наука, 1968.

7. Яноши Л. Теория и практика обработки результатов измерений / Л. Яноши. – М.: Мир, 1968.

8. Айвазян С. А. Статистическое исследование зависимостей / С. А. Айвазян. – М.: Metallurgia, 1966.

УДК 621.791.75

**М.В. Миронова**, канд. техн. наук

ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, Украина

## О ВРАЩЕНИИ КАПЛИ НА ТОРЦЕ ЭЛЕКТРОДА ПРИ ДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ В ПРОДОЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

*Моделированием с использованием зондового метода уточнен механизм и причины, обуславливающие вращение капли электродного металла. Установлено, что скорость вращения капли возрастает при увеличении тока через каплю и индукции продольного магнитного поля.*

**Ключевые слова:** дуговая наплавка, продольное магнитное поле, скорость вращения капли.

*Моделиванням з використанням зондового методу уточнено механізм і причини, що зумовлюють обертання краплі электродного металу. Встановлено, що швидкість обертання краплі зростає при збільшенні струму через краплю і індукції подовжнього магнітного поля.*

**Ключові слова:** дугове наплавлення, подовжнє магнітне поле, швидкість обертання краплі.

*The mechanism and the reasons, determining rotation electrode metal drops, are refined by modeling with using probe method. The increase of drop rotation velocity with increasing current through the drop and induction of longitudinal magnetic field is stated.*

**Key words:** arc surfacing, longitudinal magnetic field, drop rotation velocity.

**Постановка проблемы.** Производительность дуговой наплавки определяется производительностью расплавления электродной проволоки. Для получения этого эффекта перспективным является применение внешних (управляющих) магнитных полей, воздействующих на каплю, дугу и жидкий металл сварочной ванны. Магнитное управление имеет преимущества по сравнению с механическими способами управления, поскольку оно осуществляется без непосредственного контакта управляющих устройств с зоной сварки (наплавки) и его применение не требует существенных изменений стандартного оборудования и техники сварки (наплавки). При воздействии продольного магнитного поля (ПРМП) повышается эффективность процесса дуговой наплавки под флюсом: значительно повышается коэффициент расплавления электродной проволоки ( $\alpha_p$ ), уменьшаются глубина и площадь проплавления металла и доля участия основного металла в наплавленном.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Повышение  $\alpha_p$  проволоки при сварке и наплавке в ПРМП в работах [1] объясняют улучшением условий теплопередачи через каплю за счет уменьшения толщины капли в направлении оси электрода при ее вращении под действием электромагнитных сил от взаимодействия радиальной составляющей плотности тока в капле с осевой составляющей индукции ПРМП. Однако в работе [2] было высказано предположение, подкрепленное детальным изучением строения магнитного поля в зоне капли на торце электрода из ферромагнитного материала, что капля вращается в противоположную сторону, относительно направления вращения, которое капля должна иметь по соображениям, высказанным в работе [1]. Не изве-

стна также скорость вращения металла в капле при воздействии ПРМП. Такие данные позволят уточнить физические процессы, лежащие в основе наблюдаемых явлений, и управлять этими процессами.

**Цель статьи.** Целью работы является экспериментальное определение направления и скорости вращения капли на торце электрода при воздействии постоянного ПРМП для повышения эффективности процесса дуговой наплавки под флюсом.

**Изложение основного материала.** Для определения направления и скорости вращения капли при наплавке с воздействием постоянного ПРМП использовали метод зондов. Зондом, датчиком скоростного напора капли, являлась парамагнитная (немагнитная) проволочка диаметром 1,0 мм (рис. 1). Этот зонд (4) крепили к упругой струне (5) диаметром 0,25 мм, либо 0,4 мм. Струна с натягом крепилась к опорам (6). Силу, действующую на зонд, определяли по закручиванию струны. К струне крепили легкое зеркальце (8). При воздействии напора жидкого металла капли на зонд (4) струна закручивалась и луч, направленный от лазерной указки (7), отражаясь от зеркальца (8), попадал на экран (9). Расстояние между зеркальцем (8) и экраном (9) для усиления чувствительности системы составляло примерно 2,5 м.

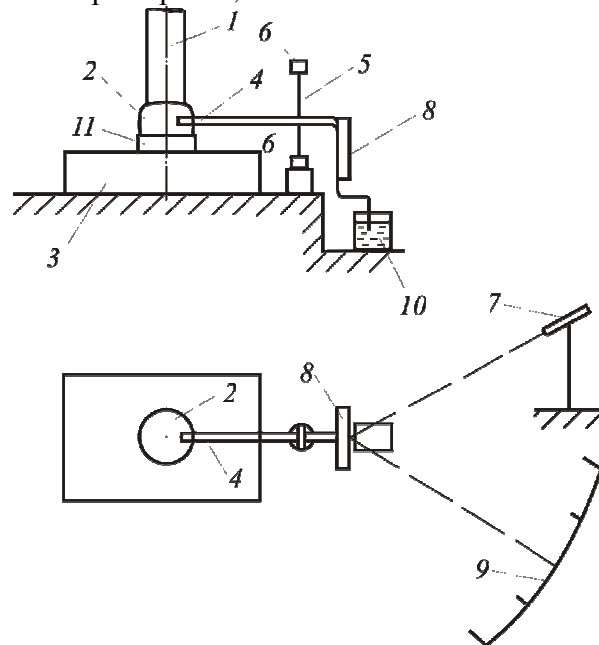


Рис. 1. Схема устройства для измерения скорости вращения капли на торце электрода: 1 – электрод; 2 – капля; 3 – изделие; 4 – зонд; 5 – струна; 6 – опоры; 7 – лазерная указка; 8 – зеркало; 9 – экран; 10 – демпфирующее устройство; 11 – латунный штырь

Тарировку системы (определение соотношения между усилием на зонд и отклонением луча на экране) осуществляли по методике, приведенной в работе [3]. Как при тарировке, так и в дальнейшем при обработке экспериментальных данных использовали известное соотношение:

$$F = C_x \cdot S_3 \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2},$$

где  $F$  – сила, действующая на зонд,  $H$ ;  $S_3$  – площадь лобового сопротивления зонда,  $m^2$ ;  $\rho$  – плотность аргона,  $kg/m^3$ ;  $v$  – скорость потока аргона,  $m/c$ . Коэффициент лобового сопротивления зонда  $C_x$  составлял  $C_x = 1,0$  [4].

Направление скорость вращения капли под действием постоянного ПРМП определяли путем моделирования. Каплю моделировали припоем марки ПОС – 40, имевшем температуру плавления  $220 \text{ }^\circ C$ . Измерения осуществляли на модели по схеме, изображенной

на рисунке 2. К массивной пластине из стали 09Г2С толщиной 20 мм (1) крепили пластину из асбоцемента толщиной 4 мм (2), в которой проходил круглый штырь (3) из латуни диаметром 5 мм. Пруток из припоя (4) диаметром 4 мм укрепляли в мундштуке сварочного автомата АДС-1002 (не показан). К мундштуку автомата крепили соленоид с ферросердечником (6), который генерировал ПРМП. Расстояние от нижнего среза соленоида до пластины (1) составляло  $H = 40$  мм. Поскольку на участке вылета  $H$  пруток припоя – немагнитный материал, то этот пруток помещали в трубку из ферромагнитного материала (5) (рис. 2, а). Такая трубка, как показано в работе [5], создает в зоне модельной капли значительную радиальную компоненту индукции (до 50 % относительно продольной составляющей). Всю конструкцию устанавливали на электропечь (не показано) и осуществляли нагрев до температуры плавления припоя. Каплю «выращивали», подавая вниз пруток (4) до оплавления торца прутика и образования капли (7) высотой 2...2,5 мм. Затем в каплю вставляли зонд (8) из медной (залуженной) проволоки диаметром 0,5 мм на контролируемую глубину (порядка 1,5 мм), после чего включали постоянный ток через систему: пруток (4) – капля (7) – штырь (3), а также постоянный ток в обмотке соленоида для создания ПРМП в зоне капли. Для создания радиальной составляющей тока в жидком металле на торце электрода моделирование проводили по схеме (рис. 2, б). Выращивали каплю, диаметр которой, а также диаметр зоны контакта (3) были больше, чем диаметр электрода. Уровень индукции ПРМП  $B_z$  и  $B_r$  контролировали тесламетром типа ЭМ-435 с датчиком Холла, имевшем измерительную базу 1x1 мм.

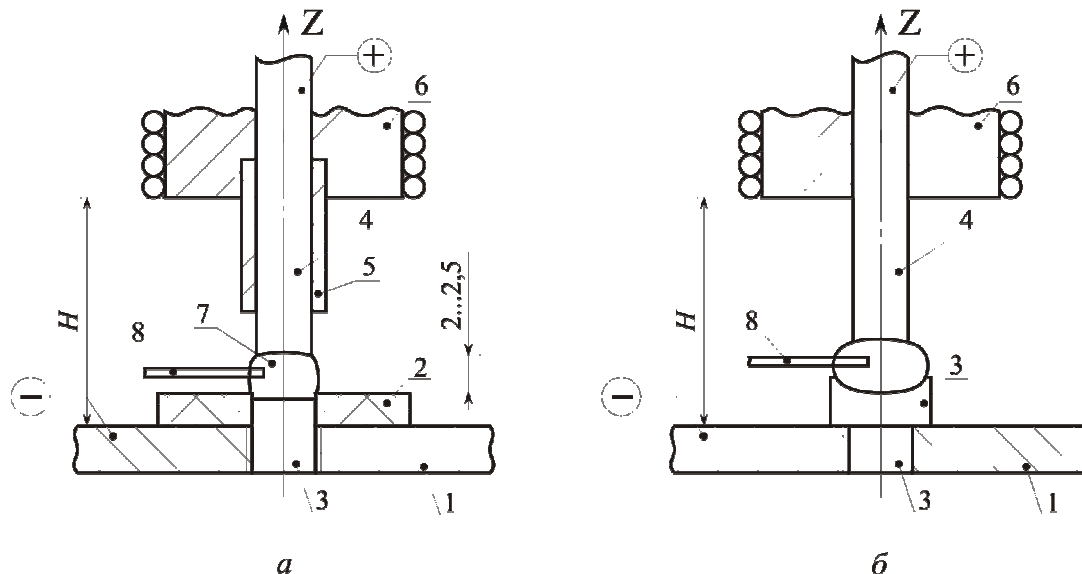


Рис. 2. Схемы для измерений скорости вращения модельной капли: 1 – изделия – пластина; 2 – асбоцемент; 3 – штырь (латунь); 4 – пруток припоя; 5 – трубка; 6 – соленоид; 7 – капля; 8 – зонд

Установлено, если электрод изготовлен из ферромагнитного материала (в модели – пруток припоя с ферромагнитной трубкой), то направление вращения капли соответствует данным работы [3], т. е. капля вращается под действием силы, образованной взаимодействием радиальной компоненты индукции  $B_r$  с осевой компонентой плотности тока в капле  $j_z$ . Капля (немагнитная) на торце электрода из ферромагнитного материала вращается в ту же сторону, что и сварочная дуга. Капля вращается в этом направлении, если ее размер в осевом направлении меньше, чем диаметр электрода. При увеличении индукции  $B_z$  ПРМП и не изменяющемся токе через каплю скорость вращения металла в ней возрастает (рис. 3, а). При увеличении тока через каплю, но неизменной величине индукции  $B_z$ , скорость вращения металла также возрастает (рис. 3, б). Это должно привести к разрушению капли под действием ее вращения и уменьшению толщины про-

слойки жидкого металла на торце электрода, измельчению капли при дуговой наплавке в ПРМП и увеличение коэффициента расплавления проволоки  $\alpha_p$  при использовании электродов из ферромагнитных материалов.

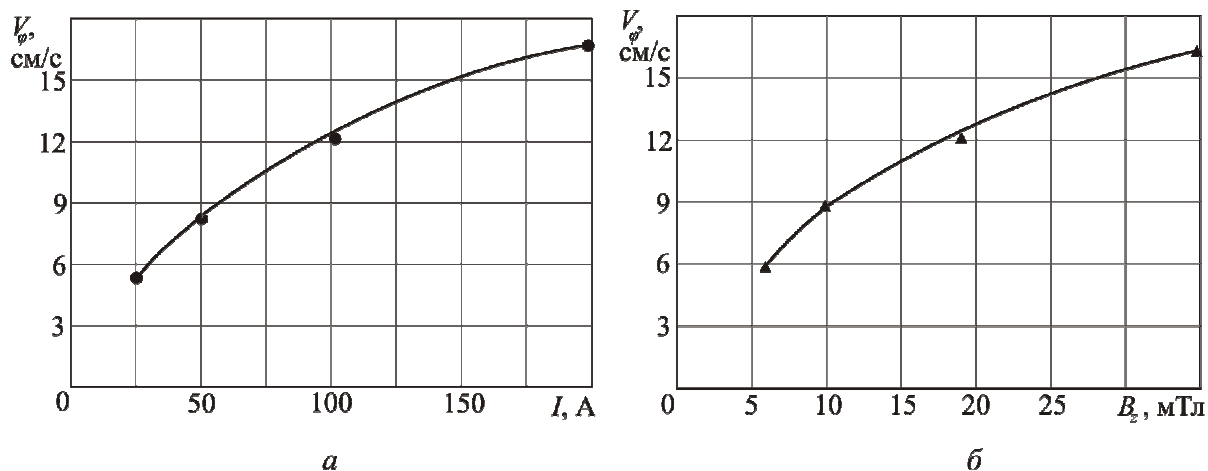


Рис. 3. Зависимость скорости вращения металла капли от тока (а) и индукции постоянного ПРМП (б):  
 $a - B_z = 18$  мТл;  $b - I_{св} = 100$  А

Моделированием, выполненным на прутке припоя без трубки из ферромагнитного материала, установлено, что если площадь токопровода к нижней части капли больше, чем сечение немагнитного электрода (рис. 2, б), то капля вращается в другую сторону. Это вращение капли обусловлено взаимодействием радиальной составляющей плотности тока в капле с осевой составляющей индукции  $B_z$  ПРМП, как это и предполагали в работе [1]. Однако такой механизм влияния ПРМП на вращение капли не может быть реализован, поскольку при этом на торце электрода образуются весьма мелкие капли, и реализуется механизм, указанный в работе [2], и подтвержденный в данной работе.

**Выводы.** Предложенный метод физического моделирования, основанный на измерении гидродинамического напора жидкости на вводимый в каплю зонд позволяет определить направление и скорость ее вращения при наплавке в ПРМП.

Установлено, что вращение капли при дуговой наплавке с воздействием постоянного ПРМП обусловлено электромагнитной силой от взаимодействия осевой составляющей тока в капле с радиальной составляющей индукции ПРМП на торце ферромагнитного электрода. Скорость вращения капли возрастает при увеличении тока через каплю и индукции ПРМП.

#### Список использованных источников

1. Болдырев А. М. Особенности плавления электродного металла при сварке во внешнем магнитном поле / А. М. Болдырев, В. А. Биржев, А. В. Черных // Сварочное производство. – 1991. – № 5. – С. 28-30.
2. Размышляев А. Д. Влияние продольного магнитного поля на производительность расплавления проволоки при электродуговой наплавке под флюсом / А. Д. Размышляев, А. А. Дели, М. В. Миронова // Автоматическая сварка. – 2007. – № 6. – С. 31-35.
3. Ленивкин В. А. Определение скоростного напора плазмы сварочной дуги / В. А. Ленивкин, П. И. Петров, Н. Г. Дюргеров // Сварочное производство. – 1984. – № 7. – С. 3-4.
4. Рабинович Е. З. Гидравлика / Е. З. Рабинович. – М.: Физматгиз, 1961. – 330 с.
5. Гвоздецкий В. С. Исследование вращающейся в магнитном поле сварочной дуги постоянного тока (плоская и конусная дуга) / В. С. Гвоздецкий, В. С. Мечев // Автоматическая сварка. – 1963. – № 12. – С. 1-6.