

Машинобудування і зварювальне виробництво

Keywords: magnetic blowing, pipes for gas and oil pipelines, one-sided high-speed welding, welded joints toughness, magnetic field induction, electromagnetic force, magnetic pressure

Рецензент: С. С. Самогутин
д-р техн. наук, проф., ПГТУ
Статья поступила 11.11.2019

УДК 621.791.753.042

Щетинина В. И., Элсаед Халед, Коваль А. В.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СВАРОЧНОГО ТОКА

Установлены закономерности, определяющие магнитное поле сварочного тока и воздействие магнитного поля на стабильность процесса, качество и ударную вязкость сварных соединений. Разработана методика исследования магнитного поля сварочного тока, адекватность которой подтверждена в производственных условиях сварки труб для газо- и нефтепроводных магистралей.

Ключевые слова: магнитное поле сварочного тока, методика, стабильность процесса, регулирование и использование магнитного поля сварочного тока, качество и ударная вязкость сварных соединений

Постановка проблемы. Применение односторонней высокоскоростной сварки ограничено снижением стабильности процесса, качества и ударной вязкости сварных соединений. Стабильность процесса определяет формирование сварных швов, качество и ударную вязкость сварных соединений. Поэтому повышение стабильности процесса, качества и ударной вязкости сварных соединений является важной научно-технической проблемой.

Анализ последних исследований и публикаций.

Магнитное поле сварочного тока определяется растеканием тока, которое зависит от точки токоподвода и тепловложения в сварочной ванне. Согласно закону минимума энергии, ток течет по основному металлу и сварочной ванне по пути наименьшего сопротивления. В зависимости от растекания тока создается действующее на дугу и жидкий металл сварочной ванны магнитное поле, которое определяет стабильность процесса, качество и ударную вязкость сварных соединений. Влияние растекания тока на магнитное поле, стабильность процесса и формирование швов исследовано на высоком научном уровне [1 – 7]. Однако механизм воздействия формы изделия на магнитное поле сварочного тока полностью не установлен, так как для проведения исследований необходимо разработать методику, которая позволяет измерить величину и распределение отдельно индукции магнитного поля тока, протекающего по изделию.

Цель статьи – изучение магнитного поля сварочного тока и разработка способов регулирования и использования магнитного поля для повышения стабильности процесса, качества и ударной вязкости сварных соединений.

Изложение основного материала. Магнитное поле сварочного тока создается током, протекающим по электроду, дуге, сварочной ванне и основному металлу. Направление силовых линий магнитного поля тока, протекающего по электроду, дуге и изделию, совпадают, и согласно принципу суперпозиции, индукция является суммой индукций, создаваемых каждым током в отдельности. Магнитное поле тока дуги создает пинч-эффект, давление дуги и направленные вниз электромагнитные силы, действующие на жидкий

Машинобудування і зварювальне виробництво

металл, которые приводят к вытеканию металла из ванны при односторонней сварке и образованию подрезов при высокоскоростной сварке.

Для исследования магнитного поля сварочного тока разработана методика изучения магнитного поля с помощью железного порошка, которая не позволяет определить величину индукции поля.

При сварке от токоподвода большая часть тока протекает позади дуги, и только часть впереди [8–11]. При сварке на токоподвод большая часть тока протекает впереди дуги. В результате изменяется магнитное поле сварочного тока. Распределение тока по пластине при сварке проволочным электродом изучено Ю. И. Райчуком и А. В. Зерновым [9, 10], путем моделирования на электропроводной бумаге с помощью интегратора ЭГДА 19/60. Построение линий тока осуществлялось на модели обратной задачи, путем нахождения эквипотенциалей при подключении электродов в виде металлических шин по линиям граничных токов. Линии тока проводились так, чтобы они начинались и заканчивались на противоположных электродах модели, охватывали возможно большую площадь и были ортогональны в точке пересечения с эквипотенциалами. Однако изучение распределения тока путем моделирования на электропроводной бумаге при сварке с различной скоростью невозможно, так как при этом исключается дуга, которая изменяет тепловложение в сварочную ванну и растекание тока.

Для определения величины магнитного поля сварочного тока в процессе сварки измеряли индукцию в точках, максимально возможного приближения к дуге на расстоянии 0,016 м от основного металла и электрода впереди, сзади и в зоне сплавления. Однако данная методика не позволяет исследовать отдельно магнитное поле дуги и тока, протекающего по изделию, так как при приближении к дуге и металлу ванны зонд, несмотря на кварцевый изолятор, сгорает.

Направление силовых линий магнитного поля тока, протекающего по электроду, дуге и изделию, совпадают, и согласно принципу суперпозиции, индукция является суммой индукций, создаваемых каждым током в отдельности. Магнитное поле тока дуги создает пинч-эффект, давление дуги и направленные вниз электромагнитные силы, действующие на жидкий металл, которые приводят к вытеканию металла из ванны при односторонней сварке и образованию подрезов при высокоскоростной сварке.

Магнитное поле тока, протекающего по жидкому металлу и изделию, приводит к отклонению дуги и металла ванны вперед или назад, изменению магнитогидродинамических явлений в ванне, формированию швов и магнитному дутью. С целью изучения магнитного поля, механизма магнитного дутья и природы образования подрезов целесообразно исследовать отдельно магнитное поле тока дуги и тока, протекающего по изделию.

Для исследования магнитного поля сварочного тока, протекающего по изделию, разработана методика (рис.1), которая заключается в следующем. К изделию с моделью сварочной ванны подводятся токоведущие кабели. В зазоре стыка располагается зонд тесламетра. По пластине и трубе пропускается ток, и производятся измерения индукции магнитного поля тесламетром ЭМ4305. Размеры датчика Холла диаметром $1 \cdot 10^{-3}$ м и зонда $1 \times 5 \times 80 \cdot 10^{-3}$ м позволяют измерить величину и распределение индукции в зазоре стыка. В качестве датчика тесламетра используется ЭДС Холла, погрешность измерения $\pm 2,5$ %. Для защиты зонда от повреждений и уменьшения погрешности измерений зонд изолируется скотчем. Зонд устанавливается таким образом, чтобы силовые линии магнитного поля входили в датчик Холла.

Машинобудування і зварювальне виробництво

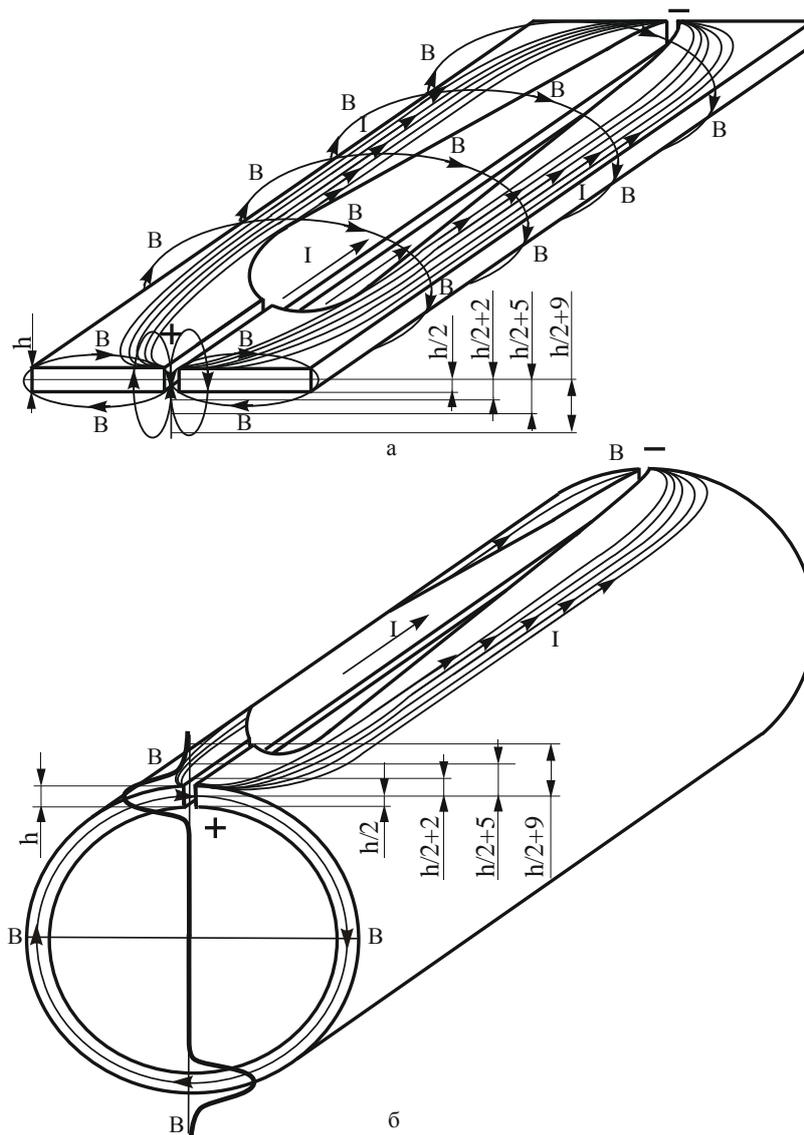


Рисунок 1 – Методика измерения магнитного поля сварочного тока, протекающего по пластинам (а) и трубе (б)

Непосредственное измерение индукции и напряженности магнитного поля в веществе может быть проведено вполне аналогично измерению напряженности и индукции электрического поля. В длинной и узкой цилиндрической полости напряженность магнитного поля будет той же, что и в веществе [2]. Действительно вихри напряженности магнитного поля (макротоки) не появятся, если вырезать полость, а источники появятся лишь там, где поверхность раздела не параллельна напряженности магнитного поля, т.е. на торцах. Если полость длинная и узкая, то поле источников в ее середине, пропорциональное r^2/h^2 , будет стремиться к нулю вместе с отношением r/h . Измерение индукции магнитного поля, напротив, может быть произведено в цилиндрической полости с малой высотой и большим радиусом, образуемая которой по-прежнему параллельна полю. Вектор магнитной индукции не имеет источников, измениться он может только из-за вновь появившихся вихрей, которые действительно появляются на боковой поверхности цилиндра (на основаниях ни B_n , ни B_τ , не терпят скачка). Микроток, текущий по боковой поверхности цилиндра, создает в центре поле, пропорциональное току, т.е. высоте цилиндра h , и обратно

Машинобудування і зварювальне виробництво

пропорциональное радиусу r . Дополнительное поле, искажающее результаты измерения B , пропорционально r/h и стремится к нулю вместе с этой величиной.

Поэтому для уменьшения погрешности измерения индукции магнитного поля сварочного тока производили в пазе $2 \times 15 \cdot 10^{-3}$ м, профрезерованном в одной из пластин, что предотвращает повреждение зонда при измерении поля. Это существенно, так как при пропуске по пластинам тока одинакового направления они притягиваются и могут повредить зонд при измерении индукции поля в зазоре стыка. Для адекватности модели реальным условиям измерения индукции производили при пропуске тока 2100 А, характерного для сварки составным электродом. В качестве источника питания использовали сварочный выпрямитель ВМГ5000.

Измерения производили на установке, выполненной из неферромагнитных материалов, что обеспечивало отсутствие замыкания силовых линий магнитного поля на ферромагнетик и искажения поля. Для увеличения точности измерения зонд тесламетра устанавливали в медную трубку, жестко закрепленную на текстолитовой планке, фиксирующей изделие в процессе измерений индукции магнитного поля. Точность расположения зонда в процессе измерений обеспечивалась с помощью механизма вертикального перемещения со шкалой с ценой делений $1 \cdot 10^{-3}$ м. Шпильки для крепления текстолитовой планки выполнены из бронзы. Установка для измерения индукции обеспечивает удаленность от ферромагнитных масс на расстояние 0,5 м, что исключает их воздействие на магнитное поле в процессе измерения. Однако данная методика позволяет измерить индукцию магнитного поля только тока, протекающего по изделию. Подрезы образуются под действием магнитного поля дуги, которое не изучено.

Направление силовых линий магнитного поля определяется по правилу буравчика с учетом направления тока от плюса к минусу. Для регулирования и использования магнитного поля сварочного тока измерения индукции производятся в зазоре стыка на верхней и нижней поверхностях, середине толщины металла и на расстоянии от изделия.

Таким образом, разработана методика измерения величины и распределения индукции магнитного поля сварочного тока, протекающего по дуге и изделию, в зазоре стыка. Разработанная методика позволяет исследовать влияние формы изделия на величину и распределение индукции магнитного поля сварочного тока в зазоре стыка, определяющего стабильность процесса, магнитное дутье, магнитогидродинамические явления в ванне и формирование швов при сварке.

Магнитная проницаемость жидкого металла, который является немагнитным, близка к магнитной проницаемости воздуха, поэтому по значениям индукции в точках измерения можно определить магнитное поле сварочного тока в ванне. Адекватность модели реальным условиям подтверждена при измерении индукции магнитного поля сварочного тока в производственных условиях сварки труб диаметром 0,426 м с толщиной стенки 0,008 м для газо- и нефтепроводных магистралей.

В процессе сварки труб, зонд тесламетра располагался в зазоре стыка на середине толщины металла, верхней, нижней поверхностях и на расстоянии от поверхности. Для предотвращения повреждения зонда максимальное приближение к быстро движущейся дуге составляло 0,25 м.

Как установлено, при сварке труб в производственных условиях максимальное значение индукции магнитного поля равно значению индукции, полученному при моделировании по разработанной методике. Это подтверждает адекватность модели реальным условиям сварки труб.

Установленные составляющие магнитного поля сварочного тока и разработанная методика измерения индукции магнитного поля могут быть использованы при разработке

Машинобудування і зварювальне виробництво

процесса односторонней высокоскоростной сварки труб для газо- и нефтепроводных магистралей и котлов железнодорожных цистерн.

Дальнейшие исследования в данном направлении являются перспективными, так как позволят разработать новые процессы односторонней высокоскоростной сварки с использованием магнитного поля сварочного тока, обеспечивающие повышение стабильности, качества и ударной вязкости сварных соединений.

ВЫВОДЫ

1. Магнитное поле сварочного тока создается током дуги и током, протекающим по жидкому и основному металлу. Магнитное поле дуги создает пинч-эффект и сжатие под действием собственного магнитного поля, что концентрирует энергию и повышает эффективность расплавления электрода, основного металла и процесса сварки, обеспечивает снижение тепловложения и повышение ударной вязкости сварных соединений.

2. Магнитное поле тока, протекающего по жидкому и основному металлу, приводит к магнитному дутью, которое является результатом отклонения дуги согласно закону минимума энергии в сторону меньшего магнитного поля, нарушению стабильности процесса, снижению качества и ударной вязкости сварных соединений.

3. Для регулирования и использования магнитного поля сварочного тока разработана методика измерения магнитного поля в зазоре стыка на верхней, нижней поверхности и в середине толщины металла при протекании тока по пластинам и трубе, адекватность которой подтверждена в производственных условиях сварки труб для газо- и нефтепроводных магистралей.

4. Разработанная методика исследований обеспечивает измерение величины и распределение магнитного поля сварочного тока в зазоре стыка пластин и трубе, что предотвращает образование подрезов и магнитное дутье при односторонней высокоскоростной сварке, повышает стабильность процесса, качество и ударную вязкость сварных соединений.

Список использованных источников:

1. Уайт, Р. М. Квантовая теория магнетизма / Р. М. Уайт. – М. : Мир, 1972. – 306 с.
2. Зильберман, Г. Е. Электричество и магнетизм / Г. Е. Зильберман. – М. : Наука, 1970. – 383 с.
3. Абрамович, Г. Н. Прикладная газовая динамика / Г. Н. Абрамович. – М. : Наука, 1969. – 824 с.
4. Сварка с электромагнитным перемешиванием / В. П. Черныш, В. Д. Кузнецов, А. Н. Брискман, Г. М. Шеленков. – К. : Техника, 1983. – 127 с.
5. Рижов, Р. М. Магнітне керування якістю зварних з'єднань / Р. М. Рижов, В. Д. Кузнецов. – К. : Екотехнологія, 2010. – 288 с.
6. Гаген, Ю. Г. Сварка магнитоуправляемой дугой / Ю. Г. Гаген, В. Д. Таран. – М.: Машиностроение, 1970. – 157 с.
7. Мандельберг, С. Л. Влияние расположения токоподвода на формирование швов при односторонней сварке / С. Л. Мандельберг, В. Е. Лопата, Б. Г. Сидоренко // Автоматическая сварка. – 1976. – № 8. – С. 11–15.
8. Березовский, Б. М. Растекание тока в пластине при дуговой сварке / Б. М. Березовский // Судостроит. пром-сть: Сер. Сварка. – 1986. – Вып. 1. – С. 32–39.

Машинобудування і зварювальне виробництво

9. *Зернов, А. В.* Моделирование распределения тока на электропроводной бумаге при дуговой сварке / *А. В. Зернов, В. С. Кубрин, И. Р. Пацкевич* // Сварочное производство. – 1980. – № 12. – С. 35–36.

10. *Райчук, Ю. И.* Распределение тока по пластине при дуговой сварке / *Ю. И. Райчук* // Автоматическая сварка. – 1967. – № 4. – С. 19–22.

11. *Березовский, Б. М.* Математические модели дуговой сварки. Т. 3. Давление дуги, дефекты сварных швов, перенос электродного металла / *Б. М. Березовский*. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003. – 485 с.

Щетиніна В. І., Елсаєд Халед, Коваль О. В.

МАГНІТНЕ ПОЛЕ ЗВАРЮВАЛЬНОГО СТРУМУ

Застосування одностороннього високошвидкісного зварювання обмежено зниженням стабільності процесу, якості і ударної в'язкості зварних з'єднань. Стабільність процесу визначає формування зварних швів, якість і ударну в'язкість зварних з'єднань. Тому підвищення стабільності процесу, якості і ударної в'язкості зварних з'єднань є важливою науково-технічною проблемою. Магнітне поле зварювального струму створюється струмом дуги і струмом, що протікає по рідкому і основному металу. Магнітне поле дуги створює пінч-ефект і стиснення під дією власного магнітного поля, що концентрує енергію і підвищує ефективність розплавлення електрода, основного металу і процесу зварювання, забезпечує зниження тепловкладення і підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань. Магнітне поле струму, що протікає по рідкому і основному металу, приводить до магнітного дуття, яке є результатом відхилення дуги згідно закону мінімуму енергії в сторону меншого магнітного поля, порушення стабільності процесу, зниження якості і ударної в'язкості зварних з'єднань. Для регулювання і використання магнітного поля зварювального струму розроблено методика вимірювання магнітного поля в зазорі стику на верхній, нижній поверхні і в середині товщини металу при протіканні струму по пластинах і трубі, адекватність якої підтверджено в виробничих умовах зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей. Розроблена методика досліджень забезпечує вимір величини і розподіл магнітного поля зварювального струму в зазорі стику пластин і трубі, що запобігає утворенню підрізів і магнітного дуття при односторонньому високошвидкісному зварюванні, підвищує стабільність процесу, якість і ударну в'язкість зварних з'єднань.

Ключові слова: *Магнітне поле зварювального струму, методика, стабільність процесу, регулювання і використання магнітного поля зварювального струму, якість і ударна в'язкість зварних з'єднань*

Shchetinina V. I., Elsaed Khaled, Koval A. V.

THE WELDING CURRENT MAGNETIC FIELD

The use of one-sided high-speed welding is limited by a decrease in process stability, quality and welded joints toughness. The process stability determines the welds formation, the quality and welded joints toughness. Therefore, increasing process stability, quality and welded joints toughness is an important scientific and technical problem. The welding current magnetic field is created by the arc current and the current flowing through the liquid and base metal. The arc magnetic field creates a pinch-effect and compression under the action of its own magnetic field, which concentrates energy and increases the electrode, the base metal melting and the welding process efficiency, reduces heat input and increases the welded joints toughness. The magnetic field

of the current flowing through the liquid and base metal leads to magnetic blowing, which is the result of arc deflection according to the minimum energy law towards a lower magnetic field, process stability violation, lower quality and welded joints toughness. To regulate and use the welding current magnetic field, a method has been developed for measuring the magnetic field in the joint gap on the upper, lower surface and in the metal thickness middle when current flows through the plates and pipe, the adequacy of which is confirmed in the production conditions of pipe welding for gas and oil pipelines. The developed research technique provides of the welding current magnitude and magnetic field distribution the measurement in the junction gap of the plates and the pipe, which prevents the formation of undercuts and magnetic blowing during one-sided high-speed welding, increases the process stability, the quality and welded joints toughness.

Keywords: *welding current magnetic field, method, process stability, regulation and use welding current magnetic field, quality and welded joints toughness.*

Рецензент: С. С. Самогугин
д-р техн. наук, проф., ПГТУ
Статья поступила 11.11.2019

УДК 621.923

© Полянский В. И.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ОПЕРАЦИИ ЗУБОШЛИФОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО КРИТЕРИЯ

Аналитически определены условия осуществления высокопроизводительной операции зубошлифования по методу профильного копирования с учетом ограничения по температуре резания. Теоретически обоснованы основные направления снижения температуры резания при шлифовании, состоящие главным образом в применении высокопористого профильного абразивного круга с двухсторонним коническим профилем и с углом при вершине, обладающего высокой режущей способностью в условиях высокопроизводительного глубинного шлифования и позволяющего в 2 и более раза увеличить условный радиус конусной части круга, что приводит к дополнительному повышению качества и производительности обработки. Показана необходимость обеспечения равномерного распределения снимаемого припуска для исключения температурных дефектов на обрабатываемых поверхностях. Доказано соответствие теоретически и экспериментально установленных параметров режима зубошлифования по методу профильного копирования (скорости детали и глубины шлифования), исходя из условия обеспечения заданной температуры резания. Разработаны практические рекомендации по дальнейшему совершенствованию операций зубошлифования.

Ключевые слова: *операция зубошлифования, метод профильного копирования, температура резания, высокопористый профильный абразивный круг, качество и производительность обработки, температурные дефекты.*

Постановка проблемы. Изготовление зубчатых колес является наиболее сложным и широко применяемым технологическим процессом в машиностроении. В особенности это относится к операциям зубошлифования, предназначенным для повышения качества и точности обработки упрочненных поверхностных слоев зубчатых колес после их термической обработки. Шлифование в этих условиях сопровождается образованием прижогов, микротрещин и других температурных дефектов на обрабатываемых поверхностях вследствие повышенной тепловой напряженности процесса резания, что