

УДК 621.791.753.042

Щетинин С. В.¹, Никитенко П. В.², Элсаед Халед³

МАГНИТНОЕ ДУТЬЕ ПРИ ОДНОСТОРОННЕЙ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ СВАРКЕ ТРУБ ДЛЯ ГАЗО- И НЕФТЕПРОВОДНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ

Установлен механизм магнитного дутья при односторонней высокоскоростной сварке труб для газо- и нефтепроводных магистралей вследствие концентрации силовых линий магнитного поля сварочного тока в ферромагнитной трубе. Разработан способ предотвращения магнитного дутья с двухсторонним токоподводом и регулированием магнитного поля сварочного тока, который обеспечивает стабильность процесса, повышение качества и ударной вязкости сварных соединений.

Ключевые слова: магнитное дутье, трубы для газо- и нефтепроводных магистралей, односторонняя высокоскоростная сварка, ударная вязкость, сварные соединения, индукция магнитного поля, электромагнитная сила, магнитное давление.

Постановка проблемы. Применение односторонней высокоскоростной сварки труб для газо- и нефтепроводных магистралей ограничено магнитным дутьем, которое резко снижает стабильность процесса и качество сварных швов. Поэтому предотвращение магнитного дутья, повышение стабильности процесса, качества и ударной вязкости сварных соединений является важной научно-технической проблемой.

Анализ последних исследований и публикаций.

Особенно усиливается магнитное дутье при сварке труб [1–9], вследствие концентрации силовых линий магнитного поля в ферромагнитной трубе, в результате чего нарушается стабильность процесса и формирование швов. Стабильность процесса нарушается в результате отклонения дуги под действием поперечного магнитного поля сварочного тока, протекающего по трубе. Под действием электромагнитной силы дуга отклоняется в сторону поля меньшей напряженности до естественного обрыва так, что дугу невозможно закрыть флюсом. При этом напряжение возрастает, ток падает. Электрод подается, закорачивает на изделие, и вновь возбуждается дуга. При закорачивании на изделие ток возрастает, напряжение уменьшается. Процесс периодически повторяется. В результате изменения режима нарушается формирование швов, которые становятся неравномерными по ширине и глубине проплавления. Усиление магнитного дутья при сварке труб общеизвестно, однако магнитное поле при сварке труб исследовано недостаточно.

Цель статьи – изучение механизма магнитного дутья и разработка способов предотвращения магнитного дутья, повышение стабильности процесса, качества и ударной вязкости сварных соединений.

Изложение основного материала. Магнитное поле тока, протекающего по жидкому металлу и изделию, приводит к отклонению дуги и металла ванны вперед или назад, изменению магнитогидродинамических явлений, формирования швов и магнитному дутью.

¹ д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

² аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

³ аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

Машинобудування і зварювальне виробництво

С целью изучения механизма магнитного дутья и природы образования подрезов целесообразно исследовать отдельно магнитное поле тока, протекающего по изделию.

Для исследования магнитного поля сварочного тока, протекающего по изделию, разработана методика, согласно которой к изделию с моделью сварочной ванны подводятся токоведущие кабели. В зазоре стыка располагается зонд тесламетра. По пластинам и трубе пропускается ток, и производятся измерения индукции магнитного поля на верхней и нижней поверхностях, середине толщины металла и на расстоянии от изделия.

Магнитное поле сварочного тока действует на дугу и жидкий металл сварочной ванны в одинаковом направлении. Ток протекает по дуге и жидкой прослойке, на которой существует активное пятно. Электромагнитная сила, отклоняющая дугу, перемещает жидкую прослойку в том же направлении, действуя на вертикальную составляющую тока в прослойке. Поэтому магнитное поле сварочного тока, протекающего по изделию, определяет положение и давление дуги, магнитогидродинамические явления, формирование сварных швов и ударную вязкость сварных соединений.

Согласно закону Био-Савара величина магнитного поля определяется индукцией, которая прямо пропорциональна величине тока I и обратно пропорциональна расстоянию от проводника R [2]:

$$B = \mu \frac{I}{2\pi R}, \text{ Т,} \quad (1)$$

где μ - магнитная проницаемость воздуха, $\mu=4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Эта формула, выведенная для проводника с током круглого сечения, не отражает зависимости индукции от формы проводника.

В результате проведенных исследований установлено, что при протекании тока по пластинам индукция магнитного поля сварочного тока на середине толщины металла равна нулю (рис. 1, а). При приближении к поверхности пластины индукция возрастает и достигает максимального значения на поверхности.

При удалении от поверхности пластины индукция магнитного поля вначале резко уменьшается, а затем изменяется незначительно. В соответствии с направлением силовых линий магнитного поля, при переходе от середины к нижней поверхности пластин направление индукции изменяется на противоположное.

Закономерность распределения индукции в зазоре стыка пластин, по всей вероятности, является результатом равномерного распределения тока по сечению изделия. Согласно принципу суперпозиции магнитное поле, создаваемое несколькими токами, равно сумме полей, создаваемых каждым током в отдельности. Магнитное поле, создаваемое прямолинейным током бесконечной длины, прямо пропорционально величине тока и обратно пропорционально расстоянию от проводника с током.

На середине толщины металла токи, протекающие на верхней и нижней поверхности, создают равные по величине и противоположные по направлению магнитные поля, которые взаимно уничтожаются. Поэтому индукция на середине толщины металла равна нулю.

При приближении к поверхности расстояние от другой поверхности увеличивается, вследствие чего компенсирующее действие токов уменьшается, и величина индукции магнитного поля возрастает. Максимальное значение индукции на поверхности свидетельствует, что максимальные электромагнитные силы межатомного взаимодействия определяют прочность сварного соединения.

Машинобудування і зварювальне виробництво

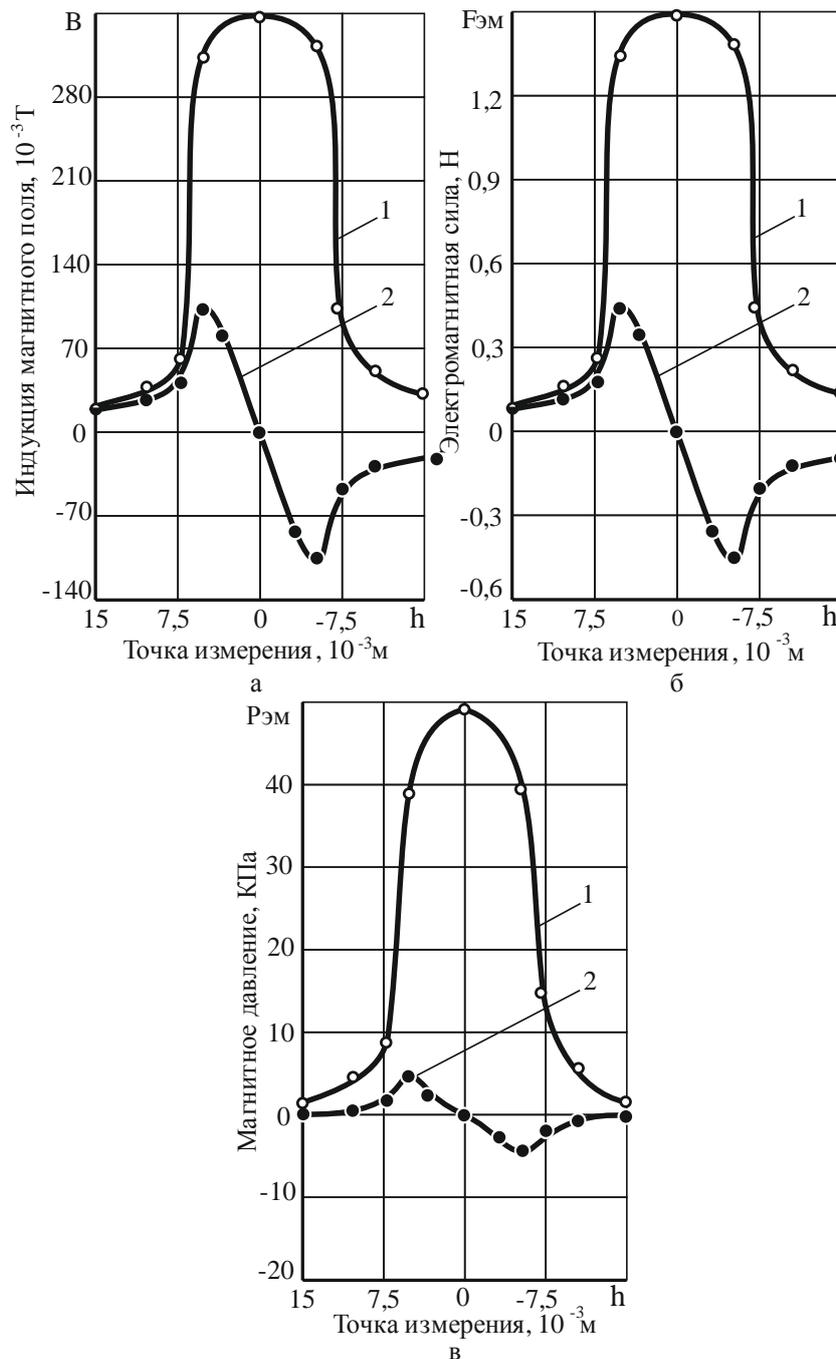


Рисунок 1 – Закономерность воздействия формы изделия на индукцию магнитного поля сварочного тока (а), электромагнитную силу (б) и магнитное давление (в):
 1– труба $(10 \times \varnothing 60 \times 300) \cdot 10^{-3}$ м; 2 – пластины $(10 \times 40 \times 300) \cdot 10^{-3}$ м

Установленная закономерность резкого снижения индукции при удалении от поверхности свидетельствует, что реальное значение индукции на поверхности значительно больше полученных данных. Более низкие значения индукции, полученные при измерении, являются результатом невозможности дальнейшего приближения зонда к поверхности.

Как установлено (рис. 1, а), на распределение и величину индукции магнитного поля в зазоре стыка значительно влияет форма изделия. При протекании тока по трубе резко возрастает максимальное значение индукции с 0,1Т при протекании тока по пластинам до 0,35Т. При этом направление индукции не изменяется, а максимальное значение достигается

Машинобудування і зварювальне виробництво

на середине толщины металла трубы. Изменение характера распределения и величины индукции является результатом того, что силовые линии магнитного поля концентрируются в замкнутом ферромагнитном теле трубы, контур которой совпадает с силовыми линиями магнитного поля. Значение индукции равно нулю в центре трубы и имеет противоположное направление в области нижней стенки.

Расчетно-экспериментальным путем установлено, что при протекании тока по трубе максимальное значение индукции резко возрастает в π раз по сравнению со сваркой пластин:

$$B = \mu\mu_0 \frac{I}{2R}, T. \quad (2)$$

Пропорционально индукции форма изделия влияет на максимальную электромагнитную силу, которая при протекании тока по трубе значительно возрастает с 0,42 Н при протекании тока по пластинам до 1,47 Н (рис. 1б) [2]:

$$F = I[B]l, H, \quad (3)$$

где I – величина тока, А;

B – индукция магнитного поля, Т;

l – длина проводника, м.

В квадратичной зависимости от индукции возрастает магнитное давление, которое при протекании тока по трубе возрастает с 3,98 кПа до 48,8 кПа более чем в 10 раз (рис. 1, в) [3]:

$$P_{ЭМ} = \frac{B^2}{2\mu_0}, Па, \quad (4)$$

Поэтому при сварке труб значительно усиливается магнитное дутье и влияние магнитного поля на формирование швов.

При сварке прямошовных труб от токоподвода электромагнитная сила отклоняет дугу вперед так, что периодически длина ее увеличивается до естественного обрыва и вновь возбуждается при закорачивании электрода на изделие. При этом режим становится нестабильным, формирование швов нарушается. При сварке на токоподвод дуга отклоняется назад, погружается в основной металл и стабилизируется, но шов формируется с подрезами.

Для предотвращения магнитного дутья разработан способ односторонней высокоскоростной сварки труб, при котором осуществляют двухсторонний токоподвод в начале и конце трубы с регулированием величины тока, протекающего впереди и сзади дуги, и магнитного поля сварочного тока.

Установленные закономерности влияния формы изделия на магнитное поле сварочного тока и разработанный способ предотвращения магнитного дутья с двухсторонним токоподводом могут быть использованы при односторонней высокоскоростной сварке труб для газо- и нефтепроводных магистралей.

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

ВЫВОДЫ

1. Установлен механизм магнитного дутья при односторонней высокоскоростной сварке труб для газо- и нефтепроводных магистралей вследствие концентрации силовых

Машинобудування і зварювальне виробництво

линий магнитного поля в обладающей большой магнитной проницаемостью ферромагнитной трубе, увеличения индукции магнитного поля, электромагнитной силы и магнитного давления, действующих на дугу и жидкий металл сварочной ванны.

2. При сварке пластин индукция магнитного поля сварочного тока на середине толщины металла равна нулю, при приближении к поверхности возрастает, достигает максимального значения на поверхности и резко падает при удалении от поверхности. При переходе от одной к другой поверхности направление вектора индукции изменяется на противоположное в соответствии с направлением силовых линий магнитного поля.

3. При сварке труб вследствие концентрации силовых линий магнитного поля в ферромагнитной трубе индукция резко возрастает, максимальное значение достигается на середине толщины металла, направление вектора индукции не изменяется. Пропорционально индукции возрастает действующая на дугу и жидкий металл сварочной ванны электромагнитная сила и в квадратичной зависимости магнитное давление, что приводит к магнитному дутью.

4. Разработан способ предотвращения магнитного дутья при односторонней высокоскоростной сварке труб для газо- и нефтепроводных магистралей с двухсторонним токоподводом в начале и конце трубы и регулированием тока, протекающего впереди и сзади дуги, который обеспечивает предотвращение магнитного дутья, стабильность процесса, повышение качества и ударной вязкости 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. – 824с.
4. Корольков, П. М. Природа возникновения и методы устранения магнитного дутья при сварке / П. М. Корольков // Сварочное производство. – 1998. – № 5. – С. 6–8.
5. Blakeley, P. J. Magnetic arc blowcanses, effects and cures / P. J. Blakeley // Metal Construction. – 1988. – N 2, vol. 20. – P. 10–13.
6. Norman, E.W.D. Magnetic arc blow. Pt. 1. The origin of magnetic fields / E.W.D. Norman // Metal Construction. – 1984. – N 7, vol. 16. – P. 441–445.
7. Blakeley P.J., Sanderson A. The origin and effects of magnetic fields in electron beam welding / E.W.D. Norman //Welding Journal. – 1984. – N 1.– P. 42–49.
8. Norman, E.W.D. Magnetic arc blow. Pt. 2. Effects and solutions / E.W.D. Norman // Metal Construction. – 1984. – N 8, vol. 16. – P. 496–500.
9. 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.

Щетинін С. В., Никитенко П. В., Елсаєд Халед

МАГНІТНЕ ДУТТЯ ПРИ ОДНОСТОРОННЬОМУ ВИСОКОШВИДКІСНОМУ ЗВАРЮВАННІ ТРУБ ДЛЯ ГАЗО- І НАФТОПРОВІДНИХ МАГІСТРАЛЕЙ

Застосування одностороннього високошвидкісного зварювання труб для газо- і нафтопроводних магистралей обмежена магнітним дуттям, яке різко знижує стабільність процесу і якість зварних швів. Тому запобігання магнітного дутья, підвищення

Машинобудування і зварювальне виробництво

стабільності процесу, якості і ударної в'язкості зварних з'єднань є важливою науково-технічною проблемою. Встановлено механізм магнітного дуття при односторонньому високошвидкісному зварюванні труб для газо- і нафтопровідних магістралей внаслідок концентрації силових ліній магнітного поля в ферромагнітній трубі, збільшення індукції магнітного поля, електромагнітної сили і магнітного тиску, що діють на дугу і рідкий метал зварювальної ванни. При зварюванні пластин індукція магнітного поля зварювального струму на середині товщини металу дорівнює нулю, при наближенні до поверхні зростає, досягає максимального значення на поверхні і різко падає при видаленні від поверхні. При переході від однієї до іншої поверхні напрямком вектора індукції змінюється на протилежне відповідно до напрямку силових ліній магнітного поля. При зварюванні труб внаслідок концентрації силових ліній магнітного поля в ферромагнітній трубі індукція різко зростає, максимальне значення досягається на середині товщини металу, напрямком вектора індукції не змінюється. Пропорційно індукції зростає діюча на дугу і рідкий метал зварювальної ванни електромагнітна сила і в квадратичній залежності магнітний тиск, що призводить до магнітного дуття. Розроблено спосіб запобігання магнітного дуття при односторонньому високошвидкісному зварюванні труб для газо- і нафтопровідних магістралей з двостороннім струмопідведенням на початку і кінці труби з регулюванням струму, що протікає попереду і ззаду дуги, який забезпечує запобігання магнітного дуття, стабільність процесу, підвищення якості і ударної в'язкості зварних з'єднань.

Ключові слова: магнітне дуття, труби для газо- та нафтопровідних магістралей, одностороннє високошвидкісне зварювання, ударна в'язкість зварних з'єднань, індукція магнітного поля, електромагнітна сила, магнітний тиск

S. V. Shchetinin, Nikitenko P. V., Elsaed Khaled

MAGNETIC BLOWING AT ONE-SIDED HIGH-SPEED WELDING OF PIPES FOR GAS AND OIL PIPELINES

The use of one-sided high-speed pipe welding for gas and oil pipelines is limited by magnetic blowing, which sharply reduces the process stability and the welds quality. Therefore, preventing magnetic blowing, increasing process stability, quality and welded joints toughness is an important scientific and technical problem. The magnetic blowing mechanism at one-sided high-speed welding of pipes for gas and oil pipelines due to the magnetic field lines concentration in a ferromagnetic pipe, an increase in the magnetic field induction, electromagnetic force and magnetic pressure acting on the arc and the weld pool molten metal is established. When welding plates, the induction of the welding current magnetic field in the metal thickness middle is zero, when approaching the surface, it increases, reaches its maximum value on the surface and drops sharply with distance from the surface. When moving from one surface to another, the vector direction induction changes to the opposite in accordance with the magnetic field force lines direction. When welding pipes due to the magnetic field force lines concentration in a ferromagnetic pipe, the induction increases sharply, the maximum value is reached in the metal thickness middle, the induction vector direction does not change. In proportion to the induction, the electromagnetic force acting on the arc and the weld pool molten metal, increases and, in the quadratic dependence, the magnetic pressure, which leads to magnetic blowing. A method has been developed to prevent magnetic blowing during one-sided high-speed welding of pipes for gas and oil pipelines with two-sided current supply at the beginning and end the pipe with the current flowing in front and behind the arc regulation, which prevents magnetic blowing, process stability, improving the quality and welded joints toughness.

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. Самогугин
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