

УДК 621.791.753.042

Чигарев В.В.¹, Щетинина В.И.², Щетинин С.В.³,
Сагиров Д.А.⁴, Савкова М.А.⁵, Дмитриев Э.А.⁶

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СВАРОЧНОЙ ДУГИ

Установлены закономерности распределения магнитного поля сварочной дуги, определяющего движение жидкого металла в ванне. Разработан способ односторонней высокоскоростной сварки труб для газо- и нефтепроводных магистралей, обеспечивающий повышение ударной вязкости сварных соединений.

Односторонняя высокоскоростная сварка вследствие снижения погонной энергии обеспечивает значительное повышение ударной вязкости сварных соединений. Однако ее применение ограничено нарушением формирования швов в результате протекания жидкого металла и образования подрезов, физическая природа которых полностью не установлена.

Наиболее вероятна электромагнитная природа образования подрезов под действием магнитного поля сварочного контура, которое создается током, протекающим по электроду, дуге и изделию. Направление силовых линий магнитного поля тока, протекающего по электроду, дуге и изделию, совпадают, и согласно принципу суперпозиции индукция является суммой индукций полей токов. Магнитное поле дуги создает пинч-эффект, давление дуги и направленные вниз электромагнитные силы, которые приводят к вытеканию металла из ванны при односторонней сварке и образованию подрезов при высокоскоростной сварке. Магнитное поле тока, текущего по жидкому металлу и изделию, приводит к отклонению дуги и металла, изменению магнитогидродинамических явлений, формирования швов и магнитному дутью.

Магнитное поле проводника с током исследовано в работах [1 – 4]. Магнитное поле сварочного тока наиболее полно исследовано при сварке труб [5 – 7]. С целью изучения механизма движения жидкого металла в ванне и природы образования подрезов необходимо исследовать магнитное поле сварочной дуги, которое не исследовано. Механизм образования подрезов полностью не установлен.

Разработка энергосберегающих процессов односторонней высокоскоростной сварки, повышающих ударную вязкость, является важной научно-технической проблемой.

Задачей данных исследований является изучение магнитного поля электрической дуги и разработка энергосберегающего процесса односторонней высокоскоростной сварки.

Для изучения магнитного поля электрической сварочной дуги разработана методика измерения индукции, которая заключается в следующем. В кратере сварочной ванны устанавливается стальной прут, конец которого выполнен по форме конической дуги, в надежном электрическом контакте с изделием (рис. 1). По пруту диаметром 0,012 м пропускается ток 2100 А, и измеряется индукция магнитного поля тесламетром ЭМ 4305. В качестве источника питания используется сварочный выпрямитель ВМГ 5000.

Разработанная методика позволяет изучить механизм воздействия магнитного поля дуги на процессы в ванне и формирование швов. Магнитная проницаемость жидкого металла, который является немагнитным, близка к магнитной проницаемости воздуха, поэтому по значениям индукции в точках измерения можно определить магнитное поле сварочной дуги в ванне. Адекватность модели реальным условиям подтверждена при измерении индукции

¹ПГТУ, д-р техн. наук, проф.

²ПГТУ, д-р техн. наук, проф.

³ПГТУ, канд. техн. наук

⁴ПГТУ, аспирант

⁵ПГТУ, аспирант

⁶ПГТУ, аспирант

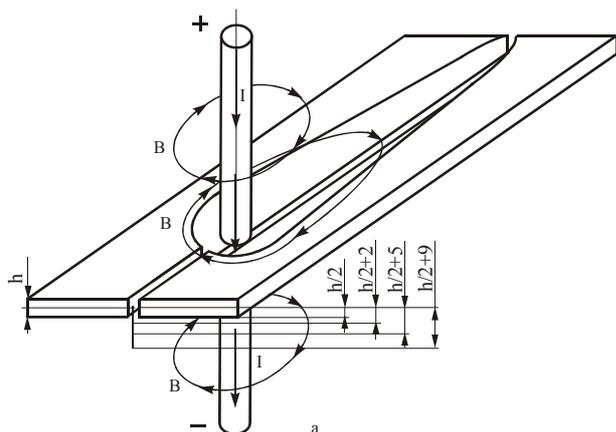


Рис. 1 – Методика измерения магнитного поля сварочной дуги: I – сварочный ток; B – силовые линии магнитного поля

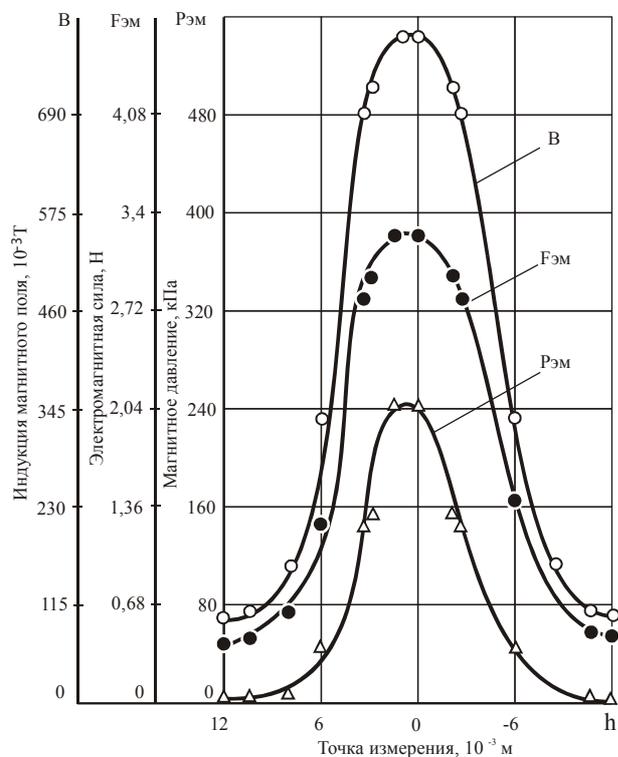


Рис. 2 – Магнитное поле электрической дуги в ванне: величина тока 2100 А, зазор 0,002 м

Магнитное поле сварочной дуги создает в зазоре поле, перпендикулярное оси ванны, которое приводит к вытеканию жидкого металла из ванны при односторонней сварке, и поле, направленное вдоль оси ванны, которое приводит к образованию подрезов.

По длине на оси сварочной ванны распределение индукции магнитного поля электрической дуги, которое приводит к вытеканию жидкого металла при односторонней сварке, изменяется (рис. 3а). Максимальное значение индукции 0,15 Т достигается на передней кромке кратера ванны. При приближении к электроду индукция падает до 0,045 Т, на поверхности электрода возрастает до 0,072 Т. На оси электрода индукция равна нулю и вектор изменяет направление в задней части кратера ванны. На поверхности электрода индукция достигает максимума. При удалении от электрода индукция вначале резко снижается, затем возрастает до $-0,09\text{Т}$ вследствие уменьшения зазора и магнитного сопротивления в нем.

магнитного поля сварочного тока в производственных условиях сварки труб диаметром 0,426 м с толщиной стенки 0,008 м для газо- и нефтепроводных магистралей. Согласно электромагнитной теории подрезы образуются в результате стекания жидкого металла с боковых кромок ванны под действием направленных вниз электромагнитных сил и магнитного давления поля дуги.

Как установлено (рис. 2), при протекании по пруткам тока 2100 А в модели сварочной ванны в соответствии с принципом суперпозиции под действием ферромагнитных пластин индукция на передней кромке кратера в зазоре стыка 0,002 м впереди на расстоянии 0,015 м от оси прутков возросла до 0,78 Т по сравнению с расчетной для воздуха [8, 9]

$$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi r}, \quad \text{Т},$$

$$B = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{2100}{2\pi \cdot 0,015} = 0,028, \quad \text{Т}.$$

Это дополнительно является следствием того, что прутки, по которым протекает ток, располагаются в сварочной ванне. Поэтому силовые линии магнитного поля замыкаются в ферромагнитных пластинах (рис. 1), что приводит к значительному повышению индукции. Это характерно и для сварочной ванны в реальном процессе односторонней высокоскоростной сварки, так как вследствие низкой погонной энергии металл околошовной зоны нагревается только в зоне отпуска на расстоянии $0,75 \cdot 10^{-3}$ м.

Магнитное поле электрической сварочной дуги зависит от зазора в стыке. В сварочной ванне зазор уменьшается от 0,02 м на верхней поверхности до 0,01 м на нижней поверхности. Поэтому индукция магнитного поля минимальна на поверхности и возрастает при приближении к нижней поверхности вследствие уменьшения магнитного сопротивления.

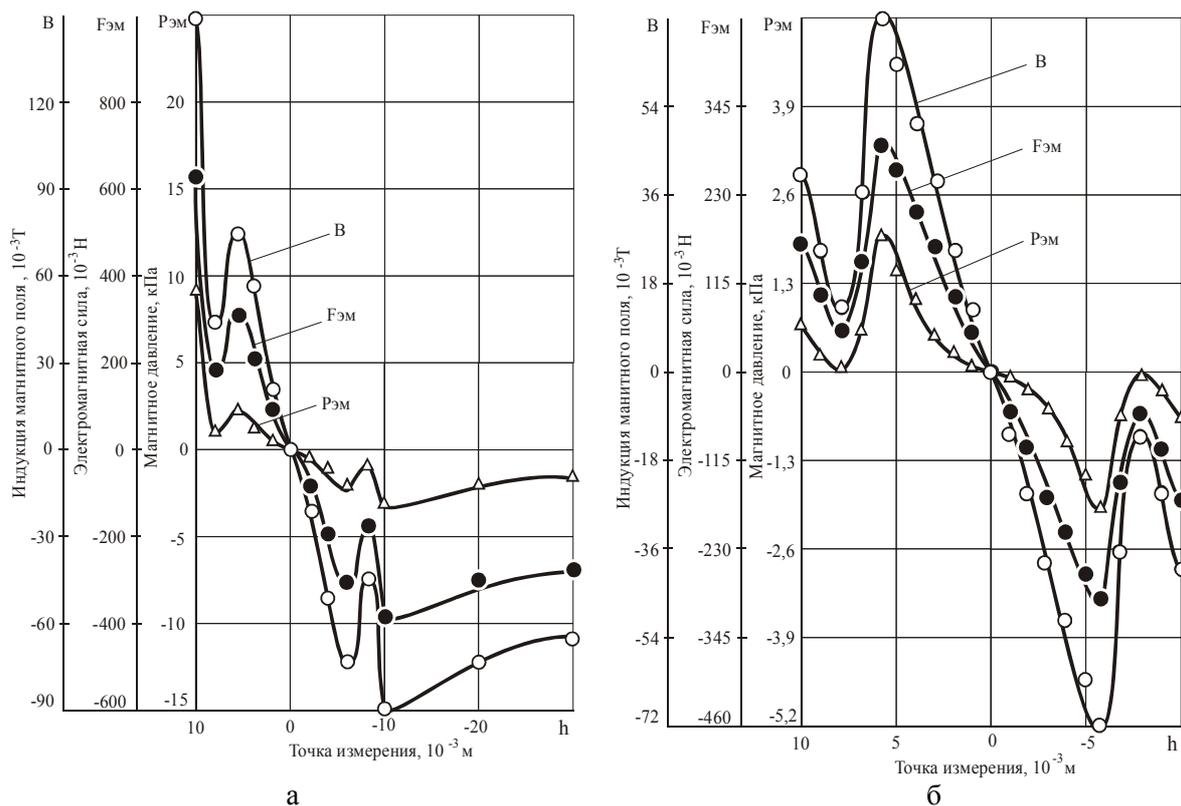


Рис. 3 – Магнитное поле электрической сварочной дуги, направленное перпендикулярно (а) и вдоль (б) оси ванны: пластины $(8 \times 40 \times 300) \cdot 10^{-3}$ м; величина тока 2100 А; зазор 0,02 м

При дальнейшем удалении от электрода индукция уменьшается согласно закону Био-Савара. Электромагнитная сила $F = IBL$ [9, 10] на передней кромке равна 0,63 Н. При приближении к дуге падает до 0,189 Н, на поверхности возрастает до 0,315 Н. При удалении от дуги электромагнитная сила вначале резко снижается, затем возрастает до 0,378 Н. В квадратичной зависимости от индукции $P = \frac{B^2}{2\mu}$ [11] изменяется магнитное давление от

8,957 кПа на передней кромке кратера до 0,806 кПа и 2,064 кПа на поверхности дуги. При удалении от дуги магнитное давление вначале снижается, а затем возрастает до 3,225 кПа.

Распределение индукции магнитного поля электрической дуги, направленного вдоль оси ванны симметрично относительно оси (рис. 3б). На боковой кромке сварочной ванны индукция 0,04 Т. При приближении к дуге индукция вначале падает до 0,013 Т, затем возрастает до 0,072 Т на поверхности дуги. В дуге индукция уменьшается и становится равной нулю на оси. Затем направление изменяется, и распределение индукции становится аналогичным. Направленная вниз на боковой кромке ванны электромагнитная сила 0,168 Н затем снижается до 0,055 Н и возрастает на поверхности дуги до 0,3 Н. Магнитное давление на боковой кромке ванны 0,637 кПа, затем снижается до 0,067 кПа и возрастает на поверхности дуги до 2,064 кПа. Направленные вниз на поверхности боковых кромок ванны электромагнитная сила 0,168 Н и магнитное давление 0,637 кПа приводят к стеканию жидкого металла с боковых кромок и образованию подрезов. Это усиливается градиентом давлений у боковых кромок ванны в результате снижения магнитного давления перед дугой, движения жидкого металла от большего давления к меньшему в направлении оси ванны и подтверждает электромагнитную теорию образования подрезов.

На основании анализа установленных закономерностей разработана электромагнитная теория образования подрезов, согласно которой при повышении скорости сварки усиливается охлаждение активных пятен, концентрируется и уменьшается тепловложение в боковые кромки ванны, электрическое сопротивление которых уменьшается. В результате возрастает величина тока, протекающего через боковые кромки, индукция магнитного поля и направленное вниз

магнитное давление, под действием которого жидкий металл стекает с кромок ванны, что приводит к образованию подрезов.

На основании электромагнитной теории образования подрезов разработан способ односторонней высокоскоростной сварки, при котором за счет движения дуги в области боковых кромок ванны увеличивается тепловложение и электрическое сопротивление в области боковых кромок ванны, уменьшается индукция и в квадратичной зависимости направленное вниз магнитное давление. Это обеспечивает качественное формирование швов без подрезов, увеличение скорости сварки, снижение погонной энергии, измельчение микроструктуры и повышение ударной вязкости сварных соединений в 3 – 3,5 раза.

Установленные закономерности распределения индукции магнитного поля сварочной дуги целесообразно использовать для разработки новых способов односторонней высокоскоростной сварки.

Дальнейшие исследования в данном направлении являются перспективными, так как позволяют разработать новые способы односторонней высокоскоростной сварки труб для газо- и нефтепроводных магистралей.

Выводы

1. Установлена закономерность распределения магнитного поля сварочной дуги, создающего в зазоре поле, перпендикулярное оси ванны, которое приводит к вытеканию жидкого металла из ванны при односторонней сварке, и поле, направленное вдоль оси ванны, которое приводит к образованию подрезов.
2. Установлено распределение магнитного поля сварочной дуги по ширине и длине сварочной ванны. Подрезы образуются под действием магнитного поля дуги, направленного вдоль оси сварочной ванны, которое приводит к возникновению направленных вниз электромагнитных сил и магнитного давления, стеканию жидкого металла с кромок ванны, и движению металла к оси ванны вследствие градиента магнитного давления в области боковых кромок ванны. Подтверждена электромагнитная теория образования подрезов.
3. Разработанный способ односторонней высокоскоростной сварки составным электродом обеспечивает движение дуги в области боковых кромок ванны, уменьшение магнитного давления на жидкий металл ванны, формирование швов без подрезов, снижение погонной энергии, измельчение микроструктуры и повышение ударной вязкости сварных соединений в 3 – 3,5 раза.

Перечень ссылок

1. Уайт Р.М. Квантовая теория магнетизма / Р.М. Уайт. – М.: Мир, 1972. – 306 с.
2. Маттис Д. Теория магнетизма / Д. Маттис. – М.: Мир, 1967. – 400 с.
3. Гильберт В. О магните, магнитных полях и о большом магните – Земле / В. Гильберт. – М.: Изд-во АН СССР, 1956. – 375 с.
4. Максвелл Дж. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля / Дж. Максвелл. – М.: Изд-во АН СССР, 1954. – 238 с.
5. Патон Б.Е. Сварка под флюсом при изготовлении труб большого диаметра / Б.Е. Патон, С.Л. Мандельберг // Автоматическая сварка. – 1968. – № 3. – С. 41 – 46.
6. Патон Б.Е. Магнитогидродинамические явления при электрической сварке и их использование / Б.Е. Патон, В.К. Лебедев // Новые проблемы сварочной техники. Киев, 1964. – 78 с.
7. Лебедев В.К. Магнитогидродинамические явления при дуговой сварке // Техническая электромагнитная гидродинамика / В.К. Лебедев. – М.: Металлургия, 1965. – С. 32 – 38.
8. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле / Л.А. Бессонов. – М.: Гардарики, 2001. – 316 с.
9. Зильберман Г.Е. Электричество и магнетизм / Г.Е. Зильберман. – М.: Наука, 1970. – 384 с.
10. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга / Г.И. Лесков. – М.: Машиностроение, 1970. – 335 с.
11. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович. – М.: Физматгиз, 1960. – 715 с.

Рецензент: А.Д. Размышляев
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 17.03.2009