

ЗВАРЮВАЛЬНЕ ВИРОБНИЦТВО

УДК 621.791.753.042

© Щетинин С.В.*

**ОДНОСТОРОННЯЯ ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ СВАРКА ТРУБ
ДЛЯ ГАЗО- И НЕФТЕПРОВОДНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ**

Установлены закономерности влияния формы электрода на магнитное поле сварочного тока и скорости сварки на скорость кристаллизации жидкого металла сварочной ванны. Разработан энергосберегающий процесс односторонней высокоскоростной сварки составным электродом труб для газо- и нефтепроводных магистралей, который обеспечивает повышение качества и ударной вязкости сварных соединений.

Ключевые слова: форма электрода, магнитное поле, скорость кристаллизации, ударная вязкость, односторонняя высокоскоростная сварка труб.

Щетинін С.В. Одностороннє високошвидкісне зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей. Встановлені закономірності впливу форми електроду на магнітне поле зварювального струму і швидкості зварювання на швидкість кристалізації рідкого металу зварювальної ванни. Розроблено енергозберігаючий процес одностороннього високошвидкісного зварювання складовим електродом труб для газо- і нафтопровідних магістралей, який забезпечує підвищення якості та ударної в'язкості зварних з'єднань.

Ключеві слова: форма електроду, магнітне поле, швидкість кристалізації, ударна в'язкість, одностороннє високошвидкісне зварювання труб.

S.V. Shchetinin. The pipes for gas and oil pipelines mains one-sided high-speed welding. Electromagnetic theory of the undercuts formation under the arc magnetic field action according to which as welding speed increases cooling intensifies and arc diameter reduces, induction and magnetic pressure increase, pinch-effect amplifies, has been proved. The arc concentrates, heat input and the pool side edges electrical resistance reduce with the result that current through the side walls and a downward electromagnetic force, under the action of which the liquid metal flows from the pool edges, increase and the undercuts form. In high-speed welding a composite electrode as compared with the wire electrode the heat input into the side edges and their electrical resistance increase; current and induction at the pool side edges and the electromagnetic force decrease that providing the seams qualitative formation and confirming the electromagnetic theory of the undercuts. With welding speed increasing the weld pool molten metal crystallization rate increases in proportion to it, microstructure gets reduced and welding stresses decrease, that providing the welds joints toughness rise. By increasing welding speed due to deflection rearward the arc pressure decreases, the molten metal movement rate into the back part of the pool grows, that resulting in the molten metal hydrodynamic pressure reduction. Due to simultaneous reduction of the arc pressure, of the downward electromagnetic force and of the molten metal hydrodynamic pressure, the crystallization rate increase and the pool molten state time reduction the backing bead formation on the melt backing improves greatly at the high-speed welding. The energy-saving process of one-sided high-speed welding of the pipes for gas and oil pipelines on the melt backing with the use of glass flux by means of a composite electrode, which provides quality and the welded joints toughness increase, has been developed.

* д-р техн. наук, професор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, schetinin.serгей2012@yandex.ua

Keywords: *shape electrode, magnetic field, welding crystallization, welded joints toughness, pipe, one-sided high-speed welding.*

Постановка проблеми. Одностороння высокоскоростна сварка труб для газо- и нефтепроводных магистралей является энергосберегающим процессом, применение которого ограничено нарушением формирования швов вследствие образования подрезов и нарушения формирования обратного валика. Поэтому разработка процесса односторонней высокоскоростной сварки труб для газо- и нефтепроводных магистралей, обеспечивающего повышение качества и ударной вязкости сварных соединений, является важной научно-технической проблемой.

Анализ последних исследований и публикаций. Развитие односторонней электродуговой сварки металлических конструкций является одним из приоритетных направлений XXI века [1-9]. Существенное применение односторонняя сварка находит при производстве труб для газо- и нефтепроводных магистралей, что вызывает необходимость разработки новых процессов. Основной проблемой односторонней высокоскоростной сварки является удержание жидкого металла от вытекания из сварочной ванны [6] и предотвращение образования подрезов. Механизм образования подрезов связывают с тепловыми процессами [10], увеличением скорости охлаждения [11], поверхностным натяжением [12], отклонением дуги назад [13, 14] и нарушением динамического равновесия жидкого металла в ванне вследствие повышения давления сварочной дуги [1, 15]. Однако природа образования подрезов полностью не установлена.

Цель статьи – изучение природы образования подрезов и разработка энергосберегающего процесса односторонней высокоскоростной сварки труб для газо- и нефтепроводных магистралей, обеспечивающего повышение качества и ударной вязкости сварных соединений.

Изложение основного материала. Из анализа теоретических предпосылок следует, что наиболее вероятно электромагнитная природа образования подрезов (рис. 1). Давление дуги значительно влияет на формирование обратного валика при односторонней сварке, особенно на флюсовой подушке. Поэтому перспективным для повышения скорости сварки является регулирование и использование магнитного поля сварочного тока.

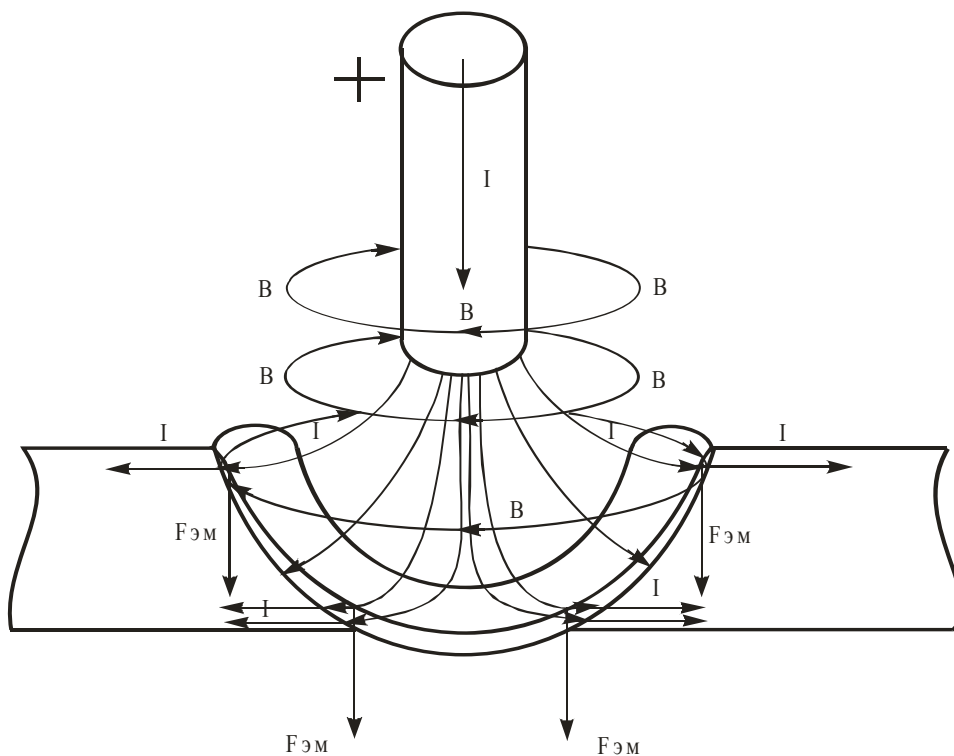


Рис. 1 – Электромагнитная природа образования подрезов под действием магнитного поля дуги, действующего на жидкий металл в области боковых кромок сварочной ванны, где I – ток; $F_{эм}$ – электромагнитная сила; B – силовые линии магнитного поля

Несмотря на большое электрическое сопротивление, сварочный ток протекает по электроду, дуге, активному пятну и жидкому металлу ванны. Магнитное поле действует на жидкий металл, как на проводник с током. Поэтому в области боковых кромок ванны на жидкий металл действует направленная вниз электромагнитная сила поля дуги.

Экспериментально доказана электромагнитная природа образования подрезов под действием магнитного поля дуги (рис. 1), согласно которой при повышении скорости сварки усиливается охлаждение и уменьшается диаметр дуги, повышаются индукция, магнитное давление и усиливается пинч-эффект. Дуга концентрируется, уменьшается тепловложение и электрическое сопротивление боковых кромок ванны. В результате повышается ток через боковые стенки и направленная вниз электромагнитная сила, под действием которой жидкий металл стекает с кромок ванны, что приводит к образованию подрезов.

Электромагнитная теория образования подрезов под действием магнитного поля дуги подтверждается тем, что склонность к образованию подрезов возрастает при увеличении глубины проплавления и погружении дуги в основной металл. С уменьшением глубины проплавления склонность к образованию подрезов снижается и при сварке тонкого металла подрезы практически не образуются при повышении скорости. Аналогично при высокоскоростной наплавке на низкой погонной энергии с малой глубиной проплавления подрезы не образуются, особенно при смещении с зенита, когда жидкий металл подтекает под дугу и глубина проплавления дополнительно уменьшается.

При односторонней сварке дуга погружается в основной металл, усиливается теплоотвод и охлаждение активных пятен и столба дуги, размеры которых уменьшаются. В результате тепловложение концентрируется и уменьшается количество тепла, выделенное у боковых кромок ванны. Это приводит к изменению электрического сопротивления, растеканию тока в области активного пятна, магнитного поля сварочного тока и нарушению формирования швов при односторонней высокоскоростной сварке.

На основании электромагнитной теории образования подрезов, для улучшения формирования швов при односторонней сварке за счет регулирования магнитного поля, разработан способ односторонней сварки составным электродом, состоящим из проволоки внутри U -образной ленты, прямолинейные участки которой располагаются впереди проволоки по направлению сварки.

Под действием электромагнитной силы при сварке составным электродом дуга движется в продольном и поперечном направлениях, вследствие чего увеличивается время существования дуги в области боковых кромок ванны. В процессе сварки дуга движется в области прямолинейных участков ленты, потом переходит на проволочный электрод и опять на прямолинейные участки ленты. На электроде постоянно горит только одна дуга, которая движется по торцу со скоростью, значительно превосходящей скорость сварки. Согласно принципу местного влияния источников теплоты увеличение области, занятой источником, приводит при сварке составным электродом к увеличению тепловложения в боковые кромки ванны и тепла, распространяющегося впереди дуги на проволочном электроде. В результате движения дуги в продольном и поперечном направлениях улучшаются условия существования активного пятна, возрастает подвижность дуги и ширина зоны, нагретой выше температуры плавления.

При сварке составным электродом вследствие движения дуги в продольном и поперечном направлениях увеличивается площадь, по которой перемещается активное пятно, давление дуги снижается и обеспечивается качественное формирование обратного валика.

Для подтверждения электромагнитной теории образования подрезов разработана новая методика и проведены исследования влияния формы электрода на магнитное поле тока дуги путем измерения индукции поля тесламетром ЭМ4305 у боковых кромок сварочной ванны.

На основании проведенных исследований доказано, что распределение магнитного поля электрической дуги вдоль оси ванны симметрично (рис. 2). На оси дуги индукция равна нулю, при приближении к поверхности дуги возрастает и достигает максимума 0,072 Т на поверхности, затем падает и возрастает на боковой кромке ванны до 0,045 Т. Во второй половине ванны распределение индукции аналогично с противоположным направлением. На поверхности дуги электромагнитная сила 0,3 Н и магнитное давление 2064 Па. Направленные вниз на боковой кромке ванны электромагнитная сила 0,19 Н и магнитное давление 806 Па.

Показано, что эффективно регулировать магнитное поле дуги за счет формы электрода. При протекании тока по составному электроду в кратере магнитное поле, направленное вдоль

оси ванны (рис. 3), симметрично относительно оси, где индукция равна нулю. На внутренней кромке индукция возрастает вследствие концентрации поля в ферромагнетике, затем падает и возрастает при приближении к поверхности дуги, затем снижается на середине прямолинейного участка ленты до нуля, изменяет направление и достигает максимума на поверхности дуги. При удалении от поверхности дуги индукция резко падает, а затем возрастает при приближении к боковым кромкам ванны до 0,036 Т. У второго прямолинейного участка ленты закономерность распределения индукции аналогична с противоположным направлением поля. Соответственно, изменяются действующие на дугу и жидкий металл электромагнитная сила и магнитное давление, равные у боковых кромок 0,15 Н и 516 Па. Расчетно-экспериментальным путем показано, что при сварке составным электродом у боковых кромок ванны снижаются с 0,19 Н до 0,15 Н электромагнитная сила и с 806 Па до 516 Па магнитное давление, что обеспечивает формирование швов без подрезов.

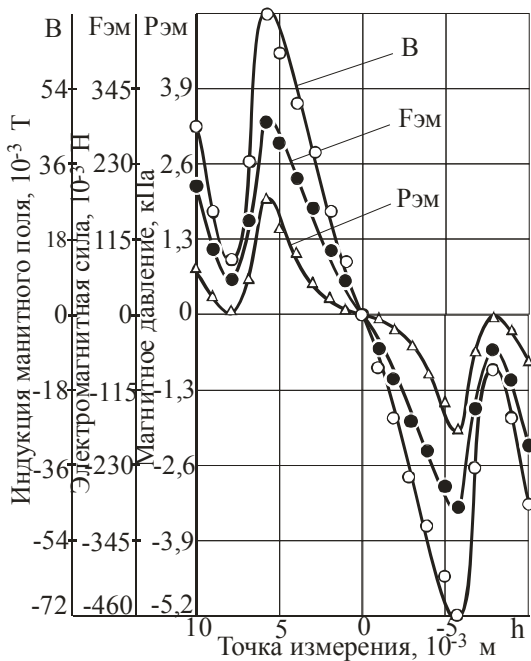


Рис. 2. – Магнитное поле электрической сварочной дуги, направленное вдоль оси ванны: пластины $(8 \times 40 \times 300) \cdot 10^{-3}$ м, величина тока 2100 А, зазор 0,02 м

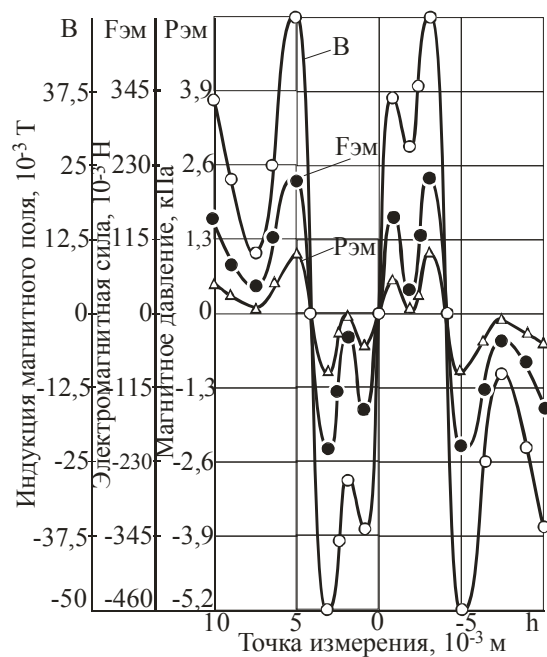


Рис. 3. – Магнитное поле при сварке составным электродом, направленное вдоль оси ванны: проволока диаметром $4 \cdot 10^{-3}$ м, лента $(0,5 \times 45) \cdot 10^{-3}$ м; ток 2100 А; зазор 0,02 м

При односторонней сварке на флюсовой подушке на жидкий металл сварочной ванны действуют направленные вниз давление дуги P_d , давление электродного металла $P_э$, магнитное давление $P_{эм}$, гидродинамическое давление жидкого металла $P_г$, давление флюса $P_ф$ и направленные вверх поверхностное натяжение $P_{пн}$ и давление флюсовой подушки $P_{фп}$ (рис. 4). Для качественного формирования швов при односторонней сварке на флюсовой подушке необходимо обеспечить равновесие сил:

$$P_d + P_э + P_{эм} + P_г + P_ф = P_{пн} + P_{фп} .$$

Представленная физическая модель процесса односторонней высокоскоростной сварки (рис. 4) получена на основании экспериментальных данных оплавления составного электрода при сварке труб для газо- и нефтепроводных магистралей. При односторонней сварке (рис. 4) дуга полностью погружена в ванну и основной металл, расплавление которого обеспечивается за счет движения дуги по электроду и передней части кратера под действием магнитного поля сварочного тока. Сварка короткой дугой обеспечивает стабильность процесса и качественное формирование швов при односторонней высокоскоростной сварке на флюсовой подушке.

Повышение скорости сварки обеспечивает увеличение скорости кристаллизации жидкого металла ванны $V_{кр} = V_{св} \cdot \cos \alpha$ (рис. 5), улучшение формирования обратного валика при одно-

сторонней высокоскоростной сварке на флюсовой подушке, измельчение микроструктуры и повышение ударной вязкости сварных соединений. С повышением скорости сварки возрастает скорость движения жидкого металла в сварочной ванне и снижается гидродинамическое давление жидкого металла, что предотвращает вытекание жидкого металла ванны и улучшает формирование обратного валика. Одновременно при повышении скорости сварки уменьшается время пребывания ванны в жидком состоянии $\tau = \frac{G_B}{\rho V_{CB} F}$ и улучшается формирование швов.

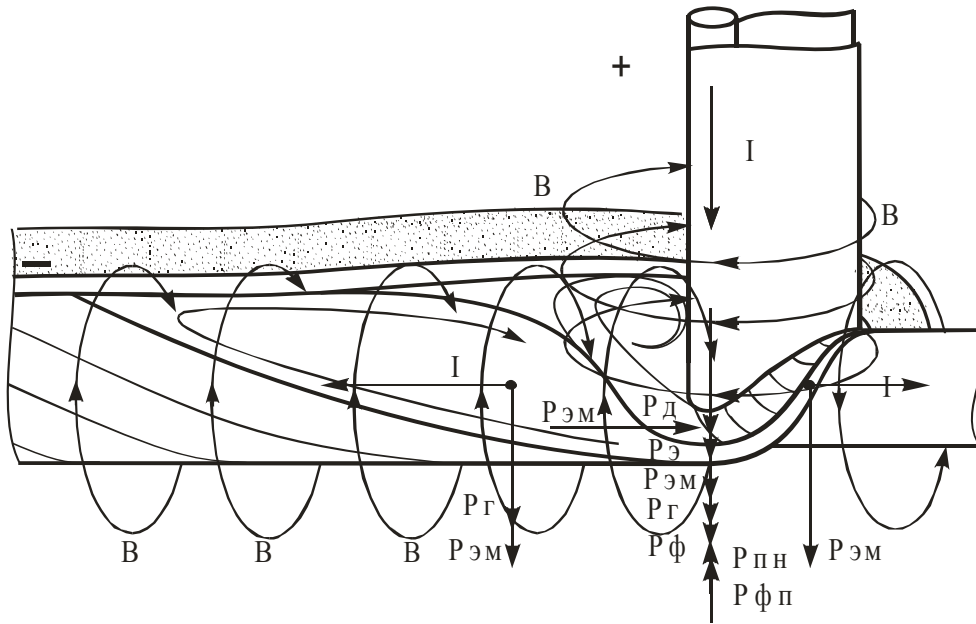


Рис. 4 – Физическая модель односторонней высокоскоростной сварки составным электродом под флюсом на флюсовой подушке

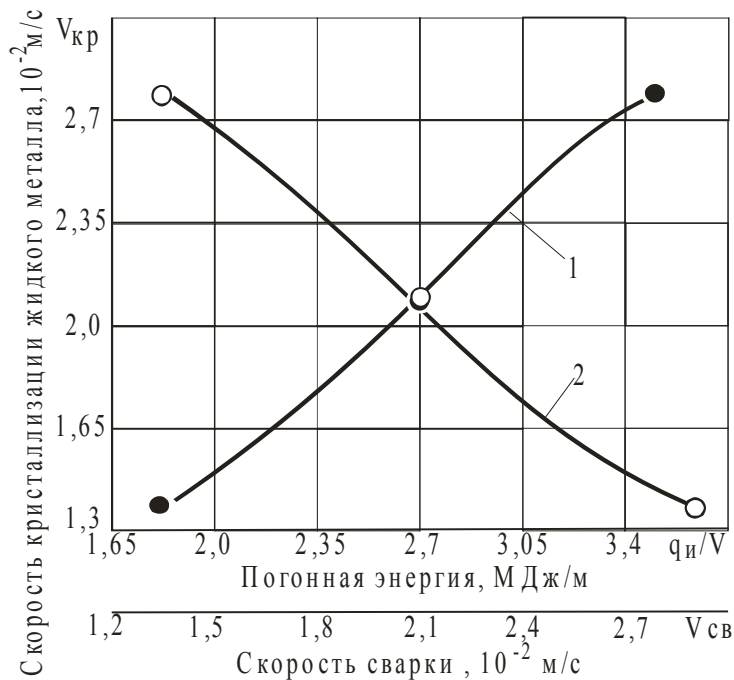


Рис. 5 – Зависимость скорости кристаллизации жидкого металла сварочной ванны от скорости сварки (1) и погонной энергии (2) при односторонней высокоскоростной сварке на флюсовой подушке

Увеличение скорости кристаллизации жидкого металла сварочной ванны обеспечивает измельчение микроструктуры и повышение ударной вязкости сварных соединений.

Сварка составным электродом вследствие увеличения его ширины производится на низком напряжении. При этом дуга становится жесткой, усиливается саморегулирование и обеспечивается автоматическое регулирование дуги, вследствие чего формирование обратного валика становится равномерным по высоте.

Более значительно улучшается формирование обратного валика при односторонней высокоскоростной сварке, так как при повышении скорости сварки вследствие отклонения назад давление дуги уменьшается, скорость движения жидкого металла в хвостовую часть ванны возрастает, что приводит к уменьшению гидродинамического давления жидкого металла. Вследствие перегрева жидкого металла ванны уменьшается величина тока, протекающего по металлу, и индукция магнитного поля сзади дуги. В результате уменьшаются направленные вниз электромагнитные силы, под действием которых жидкий металл вытекает из ванны. Вследствие одновременного уменьшения давления дуги, направленных вниз электромагнитных сил и гидродинамического давления жидкого металла, увеличения скорости кристаллизации и уменьшения времени пребывания ванны в жидком состоянии при высокоскоростной сварке значительно улучшается формирование обратного валика на флюсовой подушке.

Газопроводные и нефтепроводные трубы являются ответственными конструкциями, к которым предъявляются повышенные требования.

Применение составного электрода при односторонней высокоскоростной сварке труб позволяет повысить скорость с 0,015 м/с до 0,021 м/с в 1,5 раза по сравнению с двухдуговым процессом. В качестве источника питания используется выпрямитель ВМГ-5000.

Односторонняя сварка труб составным электродом осуществляется на низком напряжении, что обусловлено значительным колебанием зазора в стыке 0–0,004 м, усиленным теплоотводом и отклонением дуги пропорционально длине столба. Низкое напряжение обеспечивает увеличение плотности тока, усиление саморегулирования дуги, повышение стабильности процесса, равномерное формирование обратного валика и получение плотных, без пор швов. Это очень существенно, так как с увеличением скорости сварки вследствие повышения скорости кристаллизации склонность к порообразованию возрастает, особенно при сварке кипящей стали с низким содержанием кремния и марганца. Для предотвращения порообразования в составном электроде используется сварочная проволока Св08Г2С.

Снижение давления дуги и регулирование магнитного поля при сварке составным электродом обеспечивает качественное формирование швов при односторонней сварке на флюсовой подушке с флюсом АН-348АМ или ОСЦ-45М, который улучшает формирование шва.

Формирование обратного валика при односторонней сварке составным электродом на флюсовой подушке значительно лучше, чем на флюсомедной подкладке. В результате низкого давления дуги, уменьшения направленных вниз электромагнитных сил и гидродинамического давления протечи жидкого металла полностью исключены.

Замена двухдуговой сварки на медной подкладке на одностороннюю сварку составным электродом на флюсовой подушке вследствие уменьшения магнитного поля и давления дуги обеспечивает качественное формирование шва, снижение энергоемкости и материалоемкости.

Разработанный способ и установленные закономерности влияния формы электрода на магнитное поле сварочного тока и формирование швов могут быть использованы при односторонней высокоскоростной сварке котлов железнодорожных цистерн.

Дальнейшие исследования в данном направлении являются перспективными, так как позволяют разработать новые процессы односторонней высокоскоростной сварки, обеспечивающие повышение качества и ударной вязкости сварных соединений, снижение энергоемкости и материалоемкости процесса.

Выводы

1. На основании проведенных экспериментов доказана электромагнитная природа образования подрезов под действием магнитного поля дуги, согласно которой при повышении скорости сварки усиливается охлаждение и уменьшается диаметр дуги, повышается индукция, магнитное давление и усиливается пинч-эффект. Дуга концентрируется, уменьшается теплоложение и электрическое сопротивление боковых кромок ванны. В результате повышается ток

через боковые стенки и направленная вниз электромагнитная сила, под действием которой жидкий металл стекает с кромок ванны, и образуются подрезы.

2. Расчетно-экспериментальным путем установлено, что при высокоскоростной сварке составным электродом по сравнению с проволочным увеличивается тепловложение в боковые кромки и их электрическое сопротивление, снижается ток, индукция у боковых кромок ванны и электромагнитная сила, что обеспечивает качественное формирование швов и подтверждает электромагнитную природу образования подрезов.

3. На основании установленных закономерностей регулирования формирования швов за счет формы электрода разработан процесс односторонней высокоскоростной сварки составным электродом, при котором регулируется магнитное поле сварочного тока и обеспечивается качественное формирование швов на флюсовой подушке. Разработанный процесс обеспечивает замену двухсторонней сварки на одностороннюю, повышение качества и ударной вязкости сварных соединений.

Список использованных источников:

1. Патон Б.Е. Некоторые особенности формирования швов при сварке с повышенной скоростью / Б.Е. Патон, С.Л. Мандельберг, В.Г. Сидоренко // Автоматическая сварка. – 1971. – № 8. – С. 1-6.
2. Фуджита Ю. Технология сварки в современной промышленности Японии / Ю. Фуджита, Ю. Наканиси, Н. Юриока // Автоматическая сварка. – 2008. – № 11. – С. 48-54.
3. Тераи К. Современное состояние односторонней автоматической сварки / К. Тераи, М. Арикава. – Л. : Судостроение, 1974. – 135 с.
4. Бернадский В.Н. Япония определяет приоритеты в сварке на XXI век / В.Н. Бернадский // Автоматическая сварка. – 2002. – № 3. – С. 46.
5. Веселков В.Д. Односторонняя сварка стыковых соединений стальных корпусных конструкций / В.Д. Веселков. – Л. : Судостроение, 1984. – 198 с.
6. Акулов А.И. Удержание жидкого металла сварочной ванны поперечным магнитным полем / А.И. Акулов, А.М. Рыбачук // Сварочное производство. – 1972. – № 2. – С. 3-4.
7. Сварка с электромагнитным перемешиванием / В.П. Черныш, В.Д. Кузнецов, А.Н. Брисман, Г.М. Шеленков. – К. : Техника, 1983. – 127 с.
8. Рижов Р.М. Магнітне керування якістю зварних з'єднань / Р.М. Рижов, В.Д. Кузнецов. – К. : Екотехнологія, 2010. – 288 с.
9. Черныш В.П. Зависимость параметров управляющего магнитного воздействия от энергосложения встык при дуговой сварке / В.П. Черныш, Р.Н. Рыжов // Автоматическая сварка. – 1998. – № 5. – С. 49-51.
10. Рыкалин Н.Н. Расчет тепловых процессов при сварке / Н.Н. Рыкалин. – М. : Машгиз, 1951. – 296 с.
11. Wealleans J.W. Undercutting and weld bead turbulence in TIG-welding / J.W. Wealleans, P. Adams // Welding and metal Fabrication. – 1969. – June. – P. 225-257.
12. Ishizaki K. The theory of surface tension in arc welding. The penetrating action of the arc / K. Ishizaki., Y. Kalibe // Esetsugakkaysi. J. Japan Weld Soc. – 1966. – V. 35, № 2. – P. 89-98.
13. Ковалев И.М. Некоторые особенности формирования сварных швов при сварке электродом с неплавящимся катодом / И.М. Ковалев // Сварочное производство. – 1972. – № 10. – С. 3-5.
14. Мандельберг С.Л. Влияние скорости сварки на положение столба дуги / С.Л. Мандельберг, Б.Г. Сидоренко, В.Е. Лопата // Автоматическая сварка. – 1975. – № 6. – С. 41-44.
15. Мандельберг С.Л. Выбор режимов дуговой сварки, обеспечивающих получение стыковых швов без подрезов / С.Л. Мандельберг, Б.Г. Сидоренко, О.Г. Касаткин // Автоматическая сварка. – 1984. – № 12. – С. 57-60.

Bibliography:

1. Paton B.E. Weld formation some features at the high-speed welding / B.E. Paton, S.L. Mandelberh, V.G. Sidorenko // Automatic welding. – 1971. – № 8. – P. 1-6. (Rus.)
2. Fudjita Y. Welding technology in Modern Japan industry / Y. Fudjita, Y. Nakanysy, N. Yuryoka // Automatic welding. – 2008. – № 11. – P. 48-54. (Rus.)
3. Terai K. The one-sided automatic welding modern state / K. Terai, M. Arykava. – L. : Sudostroe-

- nie, 1974. – 135 p. (Rus.)
4. Bernadskyy V.N. Japan defines priorities in welding on the XXI Century / V.N. Bernadskyy // Automatic welding. – 2002. – № 3. – P. 46. (Rus.)
 5. Veselcov V.D. One-sided welding of the steel building construction butting joints / V.D. Veselcov. – L. : Sudostroenie, 1984. – 198 p. (Rus.)
 6. Akulov A.I. Welding pool molten metal transverse magnetic field / A.I. Akulov, A.M. Rybachuk // Welding production. – 1972. – № 2. – P. 3-4. (Rus.)
 7. The welding with electromagnetic mix / V.P. Chernysh, V.D. Kuznetsov, A.N. Bryskman, H.M. Shelonkov. – K. : Tekhnika, 1983. – 127 p. (Rus.)
 8. Ryzhov R.N. The magnetic control welded joints quality / R.N. Ryzhov, V.D. Kuznetsov. – K. : Ekotekhnolohiya, 2010. – 288 p. (Ukr.)
 9. Chernysh V.P. Dependence parameters controlling magnetic impact from energy input butt at the acr welding / V.P. Chernysh, R.N. Ryzhov // Automatic welding. – 1998. – № 5. – P. 49-51. (Rus.)
 10. Rykalin N.N. Calculation of thermal processes at the welding / N.N. Rykalin. – M. : Mashgiz, 1951. – 296 p. (Rus.)
 11. Wealleans J.W. Undercutting and weld bead turbulence in TIG-welding / J.W. Wealleans, P. Adams // Welding and metal Fabrication. – 1969. – June. – P. 225-257.
 12. Ishizaki K. The theory of surface tension in arc welding. The penetrating action of the arc / K. Ishizaki., Y. Kalibe // Esetsugakkaysi. J. Japan Weld Soc. – 1966. – V. 35, № 2. – P. 89-98.
 13. Kovalev I.M. Some features of the welds formation at welding electrode with nonconsumable cathode / I.M. Kovalev // Welding production. – 1972. – № 10. – C. 3-5. (Rus.)
 14. Mandelberh S.L. Effect welding speed the arc pole position / S.L. Mandelberh, B.G. Sidorenko, V.E. Spade // Automatic welding. – 1975. – № 6. – P. 41-44. (Rus.)
 15. Mandelberh S.L. Welding regimes choice, which provides getting butting welds without undercuts / S.L. Mandelberh, B.H. Sydorenko, O.H. Kasatkin // Automatic welding. – 1984. – № 12. – P. 57-60. (Rus.)

Рецензент: С.С. Самогугин
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 15.04.2016

УДК 621.771.01

© Бережная Е.В.¹, Чепель Ю.А.², Грибкова С.Н.³

ТЕРМОНАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОГО СЛОЯ ПРИ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ НАПЛАВКЕ

Разработана математическая модель термонапряженного состояния износо-стойкого слоя при электроконтактной наплавке, построенная на основе метода полей линий скольжения, учитывающая двухмерный характер пластического формоизменения в сечениях термодформационного очага и позволяющая спрогнозировать физико-механические свойства и характер формирования наплавляемого слоя. Изучено распределение температур в наплавляемом слое в термодформационном очаге, что позволяет определять изменения механических свойств материала.

Ключевые слова: наплавка, восстановление поверхности, проволока, термонапряженное состояние, нагрев.

¹ канд. техн. наук, докторант, НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев, elena_kassova@mail.ru

² ст. преп., Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск, chepel@gmail.com

³ канд. техн. наук, доцент, Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск, sv_nik_gr@mail.ru