



ОСЬКИН
Игорь Эдуардович
(ГУП МО «Мосгаз»)

OSKIN
Igor Eduardovich
(Moscow region,
Russian Federation,
GUP MO «Mosgaz»)

Пути решения проблем внедрения автоматической орбитальной сварки магистральных трубопроводов по узкому зазору

И.Э. Оськин

Обеспечение качества сварных соединений и высокой производительности применяемых процессов орбитальной сварки магистральных трубопроводов — актуальная задача. Эффективным решением этой задачи является уменьшение объема наплавляемого металла при сварке по узкому зазору. Однако данный метод сварки имеет высокую вероятность возникновения характерных дефектов в виде глубоких подрезов (полостей) и непроваров, а также межслойных несплавлений. Для исключения подобных дефектов необходимо проведение комплексных исследований, основанных на физико-математическом моделировании характерных возмущений процесса сварки, в том числе блуждания дуги в разделке. Для их проведения должен быть разработан виртуальный процесс орбитальной сварки, позволяющий оценить влияние технологических параметров на качество сварных соединений.

Ключевые слова: орбитальная сварка, узкий зазор, компьютерное моделирование, магистральные трубопроводы.

Solutions Implementation Problems of Automatic Orbital Welding of Main Pipelines through a Narrow Gap

I.E. Oskin

Ensuring weld quality and performance of the processes of orbital welding of main pipelines is an urgent problem. An effective solution to this problem is the reduction of weld metal volume during welding through a narrow gap. However, this method has a high probability of characteristic defects occurrence in the form of deep undercuts, lack of penetration and poor fusion. To eliminate these defects it is necessary to conduct the comprehensive studies based on physical modeling of welding characteristic disturbances, including wandering arc cutting. To carry out the studies a virtual orbital welding process for assessing the effects of process parameters on the quality of welded joints should be developed.

Keywords: orbital welding, narrow gap, computer simulation, main pipelines.

Поскольку энергетические ресурсы играют ведущую роль в современной экономике, а спрос на энергию во всем мире постоянно растет, то и в будущем природные углеводороды останутся ос-

новными источниками энергии [1]. В настоящее время наиболее дешевым и высоконадежным транспортом нефти и нефтепродуктов являются магистральные трубопроводы, через которые транспортируется порядка 95% добываемой нефти [2]. В соответствии с Федеральным законом «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.97 г. № 116-ФЗ магистральные трубопроводы относятся к категории опасных производственных объектов, аварии и отказы в работе которых могут принести значительный материальный и экологический ущерб.

Примеры техногенных последствий аварий показаны на рис. 1.

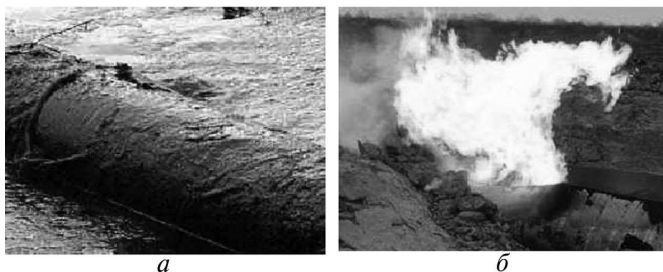


Рис. 1. Техногенные воздействия на техносферу:

a — разлив нефти; *б* — пожар на нефтепроводе

Производительность строительного-монтажных работ на магистральном трубопроводе во многом определяется темпом сварочно-монтажных работ, так как они составляют значительную долю временных затрат как при строительстве, так и при замене изношенных элементов трубопроводных систем. Поэтому обеспечение надежности и безопасности объектов трубопроводного транспорта углеводородного сырья требует разработки новых научных подходов к использованию сварочных технологий при строительстве и эксплуатации магистральных трубопроводов [3]. Потребность в новых подходах обусловлена появлением новых высокопрочных сталей, увеличением рабочих давлений в трубопроводах, значительным увеличением объемов сварочных работ, а также нехваткой высококвалифицированных сварщиков. При этом основным критерием оценки эффективности применения новых подходов являются качество получаемых сварных соединений и производительность используемых процессов сварки.

При строительстве магистральных трубопроводов применяют ручную электродугую сварку, контактно-стыковую сварку оплавлением, механизированную (полуавтоматическую) сварку, а также автоматическую орбитальную сварку в защитных газах. Однако стабильно высокое качество сварных соединений, высокую производительность процессов сварки с одновременным уменьшением влияния человеческого фактора, гарантированное получение требуемой формы и необходимых механических свойств сварных соединений пока обеспечивают только технологии и оборудование для различных способов автоматической орбитальной сварки трубопроводов. Следует отметить, что в настоящее время практически все технологические ресурсы дальнейшего повышения производительности автоматической орбитальной сварки на трассе практически исчерпаны. Так, большинство процессов сварки реализуется в газовых смесях [4], для повышения устойчивости опорных пятен дуги используются проволоки малых диаметров [5], осуществляется адаптивное управление каплепереносом электродного металла [6]. Пожалуй, одним из наиболее эффективных из оставшихся ресурсов дальнейшего повышения производительности сварочных работ является уменьшение объемов наплавленного металла путем расширения областей применения сварки по узкому зазору. Очевидное преимущество орбитальной сварки плавящимся электродом по узкому зазору магистральных трубопроводов состоит в значительном уменьшении объема наплавленного металла (рис. 2).

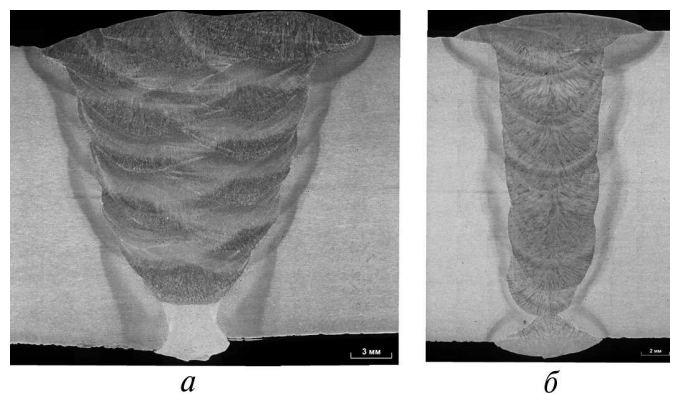


Рис. 2. Объем наплавки в стандартную (*a*) и зауженную (*б*) разделку

Поскольку характер распределения остаточных сварочных напряжений при переходе от стандартных на зауженную разделку кромок практически не изменяется [7], то сварка по узкому зазору трубопроводов должна занять достойное место среди других сварочных технологий. Однако, не смотря на то, что сварка по узкому зазору в зауженную (щелевую) разделку начала применяться в промышленности еще в начале 60-х годов прошлого века [8, 9], она до сих пор имеет крайне ограниченное применение при строительстве магистральных трубопроводов. Связано это, как с проблемами реализации данного способа сварки, так и с высокой вероятностью возникновения характерных дефектов формирования швов в виде глубоких подрезов (полостей) и непроваров в зоне сопряжения металла шва с металлом кромок, а также межслойных несплавлений [10]. Существует и целый ряд других проблем (рис. 3), затрудняющих промышленное применение сварки в зауженные (щелевые) разделки, которые можно классифицировать по влиянию на стабильность параметров дуги, минимизацию дефектов сварных соединений и проблемы практической реализации процессов сварки:

1) трудности, связанные с блужданием дуги в разделке;

2) доступ в зону сварки из-за узости разделки:

- сложность визуального контроля процесса сварщиком, особенно при сварке корневых и первых заполняющих слоев швов толстостенных магистральных трубопроводов;

- обеспечение и поддержание оптимальной величины вылета электрода;

- обеспечение эффективной газовой защиты зоны сварки;

3) проблемы с обеспечением стабильно высокого качества сварных соединений:

- зашлакованность шва при использовании порошковых проволок;

- сложность обеспечения требуемой геометрии швов;

- отсутствие данных о влиянии параметров сборки на качество сварки;

- компенсация уменьшения угла раскрытия кромок из-за деформаций в процессе сварки;

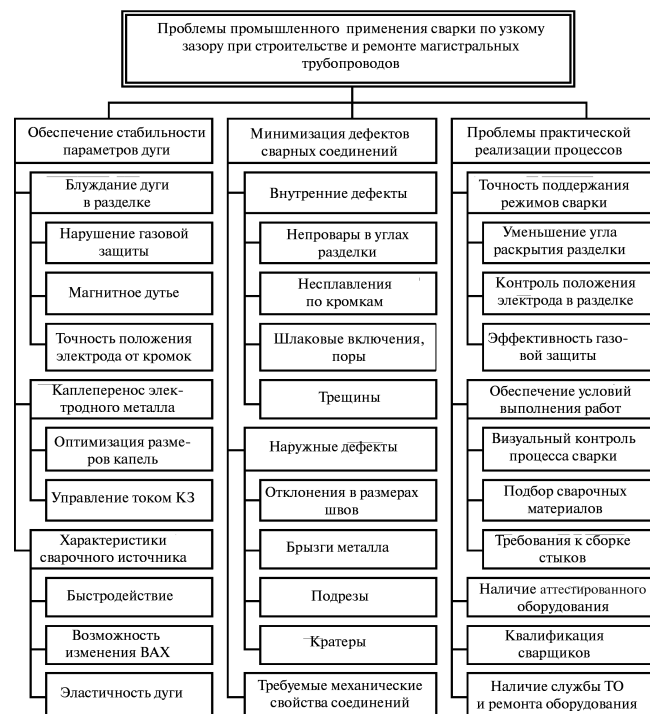


Рис. 3. Проблемы промышленной реализации процессов сварки по узкому зазору при строительстве и ремонте трубопроводов

- необходимость подбора сварочных материалов, обеспечивающих равнопрочность шва и основного металла;

- высокая вероятность образования холодных и горячих трещин, особенно в центральной части шва;

- необходимость проработки вопроса о влиянии технологических параметров сварки на структуру шва и зоны термического влияния (ЗТВ).

Влияние формы шва на образование шлаковых карманов схематично представлено на рис. 4.

Известно [11, 12], что основная причина появления шлаковых включений в шве и проблем качественного формообразования валиков — характерное блуждание дуги в зауженной разделке. При этом основными факторами, определяющими блуждание дуги являются [13, 14]: точность позиционирования электродной проволоки в разделке, интенсивность блуждания активных пятен дуги по поверхности электрода и сварочной ванны, мощность испарения па-

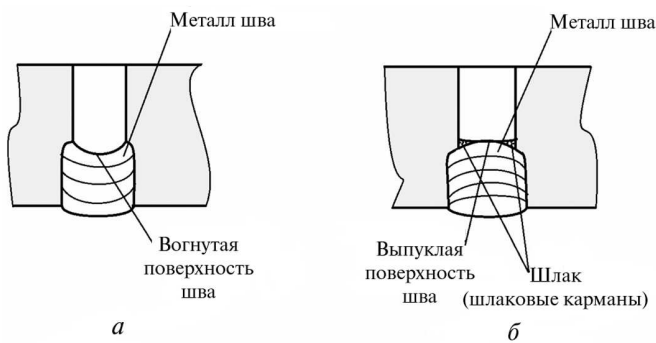


Рис. 4. Расположение шлаковых карманов в сварном шве:

a — вогнутая поверхность шва (шлак на поверхности отсутствует); *б* — выпуклая поверхность шва (по углам шлаковые карманы)

ров металла из активных пятен дуги, мощность и неравномерность восходящих потоков газа, обуславливающих отклонение траектории капли от продольной оси дуги, несоосность обдува столба дуги потоком защитного газа, несимметричность газодинамического воздействия на каплю при удерживании ее на торце электродной проволоки.

Поскольку при сварке по узкому зазору дуга не просто блуждает по донной части разделки, но и периодически переходит на ее боковые поверхности (рис. 5), то именно исключение подобного явления весьма актуально.

На пространственную устойчивость дуги влияет и полярность тока сварки. Установлено [15], что сварочная дуга наиболее устойчива при сварке на обратной полярности. Поэтому сварка плавящимся электродом на прямой полярности в современной промышленности практически не применяется из-за неудовлетворительных технологических свойств, в частности повышенного блуждания сварочной дуги

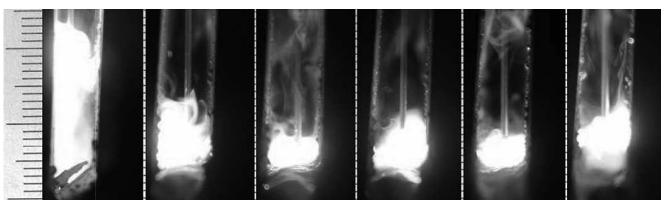


Рис. 5. Характерное блуждание дуги в зауженной разделке. Фотографии сделаны с периодом 0,3 с

[16, 17]. Причиной подобной пространственной неустойчивости дуги является изменение падения напряжения на катоде, вызванного неоднородностью поверхности основного металла [18]. При сварке на больших токах (выше 400 А) дуга более устойчива, однако такие режимы не применяются для сварки в положениях, отличных от нижнего. Поэтому орбитальная сварка плавящимся электродом выполняется на токах обратной полярности, а существующие технологии управления переходом электродного металла в ванну разрабатываются для сварки на обратной полярности [19].

Основные приемы уменьшения блуждания дуги в зауженной разделке представлены на рис. 6.



Рис. 6. Основные приемы снижения блуждания дуги в зауженной разделке

Хаотическое блуждание дуги по высоте разделки кромок можно подавить периодическим изменением энергетических параметров дуги или подбором сварочных материалов [20]. Для уменьшения блуждания дуги предложено использовать сварку с поперечными колебаниями электрода в разделке, при которой дуга периодически переходит от дна на стенки разделки на заданное время [21]. Особенно эффективен данный прием при tandem GMA-сварке, когда одна дуга ориентирована на одну кромку разделки, а вторая на противоположную. Необходимые поперечные колебания могут создаваться различными способами, как с помощью специальных механизмов перемещения горелки поперек разделки, так и периодическим деформированием проволоки или электромагнитным воздействием на дугу.

Однако решение проблемы обеспечения качественного формирования на экспериментальной основе затруднено как проблемами непо-

средственного наблюдения за зоной возникновения подобных дефектов, так и трудоемкостью сопоставления отклонений по макрошлифам и осциллограммам процесса сварки. Поэтому для исследования процессов сварки по узкому зазору целесообразно использовать виртуальные методы, основанные на компьютерном моделировании сварочных процессов. В этой связи для анализа устойчивости дуги необходимо создание модели, обеспечивающей воспроизведение стадий переноса электродного металла от первичного возбуждения дуги до момента достижения установившегося состояния плавления проволоки и переноса металла через дугу промежутком с учетом распределения плотности тока по поверхности ванны и разделки кромок.

Таким образом, первоочередными задачами исследований являются:

- разработка теоретической модели дуговой сварки формирования сварочной ванны и шва в узкой разделке;
- разработка метода и алгоритма численного решения системы уравнений модели;
- компьютерная реализация модели;
- проверка результатов компьютерного моделирования по опытным данным.

Созданная модель процесса позволит методами компьютерного анализа решить все указанные выше технологические проблемы орбитальной сварки трубопроводов по узкому зазору, в том числе:

- анализ методов и приемов автоматической орбитальной сварки, обеспечивающих устойчивость дуги и тем самым стабильно высокое качество формирования сварных соединений;
- разработку технических требований к технологиям и оборудованию для автоматической орбитальной сварки магистральных трубопроводов в зауженные разделки, обеспечивающих воспроизводимость стабильно высокого качества сварных соединений;
- разработку на основании технических требований технологий и оборудования для автоматической орбитальной сварки плавящимся электродом магистральных трубопроводов и внедрение результатов исследований при их строительстве и ремонте.

Несомненно, при реализации такого комплексного подхода проблемы разработки и внедрения высокопроизводительных технологий орбитальной сварки плавящимся электродом по узкому зазору в ближайшее время будут успешно решены, что позволит гарантированно обеспечить стабильно высокое качество сварных соединений при строительстве и ремонте магистральных трубопроводов.

Выводы

1. Перспективным путем увеличения производительности при строительстве и ремонте магистральных трубопроводов является внедрение технологий автоматической орбитальной сварки в зауженную разделку.
2. Для решения проблем внедрения зауженных разделок при сварке магистральных трубопроводов необходимо проведение комплекса исследований, направленных на минимизацию блуждания дуги в разделке и оценки влияния технологических параметров на качество формирования швов.
3. Первоочередными задачами исследований являются разработка теоретической модели формирования сварочной ванны и шва в узкой разделке при дуговой сварке, разработка метода и алгоритма численного решения системы уравнений модели с проверкой результатов компьютерного моделирования по опытным данным.

Литература

1. Коржубаев А.Г. Глобальное энергообеспечение: оценки и прогнозы // Нефтегазовая вертикаль. 2006. № 9—10. С. 81—88.
2. Шаммазов А.М., Коршак А.А., Коробков Г.Е., Султанов Н.Ф. Основы трубопроводного транспорта нефти. Уфа: Реактив, 1996. 151 с.
3. Коршак А.А., Коробков Г.Е., Душин В.А., Набиев Р.Р. Обеспечение надежности магистральных трубопроводов. Уфа: УГНТУ, 2004. 170 с.
4. Васильев И.В., Левин И.В., Ефимов А.Н., Уткин В.Н. Анализ областей эффективного применения диоксида углерода и газовых смесей на его основе // Технические газы. 2007. № 4. С. 48—55.
5. Людмирский Ю.Г., Солтовец М.В., Грицына А.Н. Принципы организационно-технологического проектирования роботизированных сварочных комплексов // Вестник ДГТУ. 2007. Т. 7. № 1. С. 47—53.
6. Гецкин О.Б., Гецкин Б.Л., Полосков С.И. Воспроизводимость качества сварных соединений при автоматической орбитальной сварке с управляемым каплепереносом электродного металла // Сварка и Диагностика. 2009. № 2. С. 47—53.

7. Оценка влияния особенностей процесса сварки на сварочные напряжения в неповоротных стыках магистральных трубопроводов / И.Э. Оськин, М.А. Шолохов, А.С. Куркин и др. // Сварка и Диагностика. 2012. № 5. С. 37–41.
8. Meister R.P., Martin D.C. Narrow-gap welding process // British welding journal. 1966. Vol. 13. No. 5. P. 352–357.
9. Ворновицкий И.Н., Конторовский А.З. Газоэлектрическая сварка плавящимся электродом толстолистовой стали в узкую разделку // Сварочное производство. 1967. № 2. С. 45–48.
10. Рахматуллин Т.А., Шолохов М.А., Бужорина Д.С. Проблемы внедрения зауженных разделок при сварке корпусных конструкций специальной техники // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. № 4. С. 64–66.
11. Mita T., Sacabe A., Yokoo T. Quantitative estimates of arc stability for CO₂ gas shielded arc welding // Welding International. 1988. Vol. 2. No. 2. P. 152–159.
12. Simpson S.W. Signature image stability and metal transfer in gas metal arc welding // Science and Technology of Welding & Joining. 2008. Vol. 13. No. 2. P. 176–183.
13. Simpson S.W. Metal transfer instability in gas metal arc welding // Science and Technology of Welding & Joining. 2009. Vol. 14. No. 4. P. 262–273.
14. Kang M.J., Rhee S. Arc stability estimation and fuzzy control for arc stabilisation in short circuit transfer mode of CO₂ arc welding // Science and Technology of Welding & Joining. 2001. Vol. 6. No. 2. P. 94–102.
15. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б.Е. Патона. М.: Машиностроение, 1974. 768 с.
16. Ленивкин В.А., Дюржеров Н.Г., Варуха Е.Н. Повышение устойчивости дуги при сварке плавящимся электродом током прямой полярности в защитных газах // Сварочное производство. 1981. № 12. С. 30–38.
17. Сулов В.Н. О некоторых особенностях сварки в углекислом газе на прямой полярности // Сварочное производство. 1956. № 12. С. 18–21.
18. Степанов А.П., Сотокина Ю.В. Дискретная структура катодного пятна и токопроводящего канала электрической дуги // Вестник науки Сибири. 2012. № 2 (3). С. 128–134.
19. Гецкин О.Б., Вышемирский Е.М., Шипилов А.В., Полосков С.И. Опыт разработки и применения современных отечественных технологий и оборудования для автоматической орбитальной сварки магистральных газопроводов // Сварка и Диагностика. 2010. № 6. С. 51–57.
20. Оськин И.Э., Гончаров Н.Г., Колесников О.И. Требования к сварочным материалам для строительства и ремонта нефтепроводов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2011. № 4. С. 33–35.
21. Тарарычкин И.А. Влияние колебаний электрода в узком зазоре на качество формирования шва при дуговой сварке в защитном газе // Вибрации в технике и технологиях. 2000. № 3(15). С. 44–46.

Reference

1. Korzhubaev A.G. Global'noe energoobespechenie: otsenki i prognozy [Global energy supply: estimates and projections]. *Neftegazovaya vertikal'* [Oil and Gas Vertical]. 2006, no. 9–10, pp. 81–88.
2. Shammazov A.M., Korshak A.A., Korobkov G.E., Sultanov N.F. *Osnovy truboprovodnogo transporta nefiti* [Fundamentals of Oil Pipeline]. Ufa, Reaktiv publ., 1996. 151 p.
3. Korshak A.A., Korobkov G.E., Dushin V.A., Nabiev R.R. *Obespechenie nadezhnosti magistral'nykh truboprovodov* [Ensuring the reliability of pipelines]. Ufa, UGNTU publ., 2004. 170 p.
4. Vasil'ev I.V., Levin I.V., Efimov A.N., Utkin V.N. Analiz oblastei effektivnogo primeneniia dioksida ugleroda i gazovykh smesei na ego osnove [Analysis of areas of effective use of carbon

dioxide and mixtures based on it]. *Tekhnicheskie gazy* [Technical Gases]. 2007, no. 4, pp. 48–55.

5. Liudmirskii Iu.G., Soltovets M.V., Gritsyna A.N. Printsipy organizatsionno-tekhnologicheskogo proektirovaniia robotizirovannykh svarochnykh kompleksov [Principles of Organizational and Technological Designing of the Robotized Welding Complexes]. *Vestnik Donskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta* [Vestnik of Don State Technical University]. 2007, vol. 7, no. 1, pp. 47–53.

6. Getskin O.B., Getskin B.L., Poloskov S.I. Vosproizvodimost' kachestva svarynykh soedinenii pri avtomaticheskoi orbital'noi svarke s upravliaemym kapleperenosom elektrodnoho metalla [Repeatability of welding joints quality during automatic orbital welding with controlled drop transfer of the electrode metal]. *Svarka i Diagnostika* [Welding and Diagnostics]. 2009, no. 2, pp. 47–53.

7. Os'kin I.E., Sholokhov M.A., Kurkin A.S., Ponomareva M.N., Poloskov S.I. Otsenka vliianiia osobennostei protsessa svarki na svarochnye napriazheniia v nepovorotnykh stykakh magistral'nykh truboprovodov [Influence Estimation of Welding Characteristics on Welding Voltages in Fixed Joints of Pipelines]. *Svarka i Diagnostika* [Welding and Diagnostics]. 2012, no. 5, pp. 37–41.

8. Meister R.P., Martin D.C. Narrow-gap welding process. *British welding journal*. 1966, vol. 13, no. 5, pp. 352–357.

9. Vornovitskii I.N., Kontorovskii A.Z. Gazoelektricheskaiia svarka plaviashchimsia elektrodom tolstolistovoi stali v uzkuuiu razdelku [Arcogen consumable electrode plate steel in narrow]. *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding Production]. 1967, no. 2, pp. 45–48.

10. Rakhmatullin T.A., Sholokhov M.A., Buzorina D.S. Problemy vnedreniia zauzhennykh razdelok pri svarke korpusnykh konstruksii spetsial'noi tekhniki [Problems of narrow gaps welding of special engineering constructions]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building]. 2012, no. 4, pp. 64–66.

11. Mita T., Sacabe A., Yokoo T. Quantitative estimates of arc stability for CO₂ gas shielded arc welding. *Welding International*. 1988, vol. 2, no. 2, pp. 152–159.

12. Simpson S.W. Signature image stability and metal transfer in gas metal arc welding. *Science and Technology of Welding & Joining*. 2008, vol. 13, no. 2, pp. 176–183.

13. Simpson S.W. Metal transfer instability in gas metal arc welding. *Science and Technology of Welding & Joining*. 2009, vol. 14, no. 4, pp. 262–273.

14. Kang M.J., Rhee S. Arc stability estimation and fuzzy control for arc stabilisation in short circuit transfer mode of CO₂ arc welding. *Science and Technology of Welding & Joining*. 2001, vol. 6, no. 2, pp. 94–102.

15. *Tekhnologiia elektricheskoi svarki metallov i splavov plavleniem* [Technology of electric welding of metals and alloys by melting]. Ed. Paton B.E. Moscow, Mashinostroenie publ., 1974. 768 p.

16. Lenivkin V.A., Diurjerov N.G., Varukha E.N. Povyshenie ustoichivosti dugi pri svarke plaviashchimsia elektrodom tokom priamoj poliarnosti v zashchitnykh gazakh [Enhancing the stability of the arc welding consumable electrode polarity direct current in the protective gas]. *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding Production]. 1981, no. 12, pp. 30–38.

17. Suslov V.N. O nekotorykh osobennostiakh svarki v uglekisлом gaze na priamoj poliarnosti [Some features of welding in carbon dioxide in the normal polarity]. *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding Production]. 1956, no. 12, pp. 18–21.

18. Stepanov A.P., Sotokina Iu.V. Diskretnaia struktura kатодного пятна i tokoprovodiashchego kanala elektricheskoi dugi [Discrete Structure of the Cathode Spot and the

Current-Carrying Channel of the Electric Arc]. *Vestnik nauki Sibiri* [Siberian Journal of Science]. 2012, no. 2 (3), pp. 128–134.

19. Getskin O.B., Vyshemirskii E.M., Shipilov A.V., Poloskov S.I. Opyt razrabotki i primeneniia sovremennykh otechestvennykh tekhnologii i oborudovaniia dlia avtomaticheskoi orbital'noi svar-ki magistral'nykh gazoprovodov [Experience of development and application of modern domestic technologies and equipment for orbital welding of gas lines]. *Svarka i Diagnostika* [Welding and Diagnostics]. 2010, no. 6, pp. 51–57.

20. Os'kin I.E., Goncharov N.G., Kolesnikov O.I. Trebovaniia k svarochnym materialam dlia stroitel'stva i remonta nefteprovodov [Requirements for Welding Materials Used for

Building and Repair of Pipelines]. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefii i nefteproduktov* [Oil&Oil Products Pipeline Transportation: Science & Technologies]. 2011, no. 4, pp. 33–35.

21. Tararychkin I.A. Vliianie kolebanii elektroda v uzkom zazore na kachestvo formirovaniia shva pri dugovoi svarke v zashchitnom gaze [The impact of fluctuations of the electrode in a narrow gap on the quality of weld formation in arc welding in inert gas] *Vibratsii v tekhnike i tekhnologiiakh* [Vibration in Engineering and Technologies]. 2000, no. 3(15), pp. 44–46.

Статья поступила в редакцию 21.03.2013

Информация об авторе

ОСЬКИН Игорь Эдуардович (Московская область) — главный сварщик ГУП МО «Мосгаз» (143026, Московская область, Российская Федерация, р.п. Новоивановское, ул. Калинина д. 1, e-mail: oskin64@mail.ru).

Information about the author

OSKIN Igor Eduardovich (Moscow region) — Chief Welder. GUP MO «Mosgaz» (Kalinina str., 1, Novoivanovskoe, 143026, Moscow region, Russian Federation, e-mail: oskin64@mail.ru).