

## ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОГО ПРОЦЕССА ПРИ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКЕ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВАРНЫХ ШВОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ АУСТЕНИТНО-ФЕРРИТНЫМИ СВАРОЧНЫМИ ПРОВОЛОКАМИ

*С.И. Ярославцев, А.О. Худяков*

Приведены результаты влияния импульсно-дугового процесса при механизированной аргонодуговой сварке на микроструктуру и механические свойства металла многопроходных швов, выполненных аустенитно-ферритными сварочными проволоками. Показано, что применение импульсно-дугового процесса способствует существенному измельчению структуры металла шва и в 3–4 раза повышает его ударную вязкость.

*Ключевые слова: постоянный ток, импульсно-дуговая сварка, ударная вязкость, микроструктура, дендритное строение.*

При сварке высокохромистых сталей мартенситного класса применение швов, состав которых аналогичен составу свариваемого металла, без предварительного подогрева и последующей термической обработки приводит к появлению в сварных швах и в зоне термического влияния холодных трещин. Одной из причин их образования является низкая деформационная способность металлов, входящих в состав сварного соединения. С целью исключения таких дорогостоящих технологических операций как предварительный подогрев и термическая обработка в ряде случаев приходится отказываться от получения сварных швов, состав которых подобен составу высокохромистой стали, и применять для сварки присадочный материал, позволяющий получить аустенитную структуру сварных швов, металл которых обладает более высокими характеристиками пластичности. Такая технология позволяет уменьшить опасность появления холодных трещин и способствует повышению работоспособности рассматриваемых сварных соединений. Однако при сварке аустенитными проволоками увеличивается вероятность образования кристаллизационных (горячих) трещин, чему способствует образование крупнозернистой структуры шва и повышенная склонность к ликвации примесей (серы и фосфора) по границам зерен [1]. В многослойных швах при сварке плавлением в каждом последующем слое кристаллизация аустенитных зерен начинается с зерен предыдущего слоя, что приводит к образованию непрерывных протяженных границ кристаллитов от первого слоя к последнему с образованием транскристаллитного строения. Такие непрерывные границы зерен, проходящие через весь шов, являются направлением с особой предрасположенностью к хрупкому разрушению сварных соединений в процессе их эксплуатации. Таким образом, такое строение структуры металла многослойного шва приводит к снижению его механических характеристик [2].

Существует достаточно большое количество разнообразных способов, с помощью которых осуществляется воздействие на процесс образования более предпочтительной (с точки зрения работоспособности сварных соединений) мелкозернистой структуры сварных швов [1–3]. Однако в последние годы значительное распространение получили аппаратные средства, связанные с импульсными алгоритмами функционирования источников сварочного тока [4, 5]. Вместе с тем данных о механизме измельчения структуры металла шва с точки зрения металлографического анализа и количественных сведений об улучшении его механических свойств совершенно недостаточно. Последнее способствует осторожному подходу к назначению технологий с использованием импульсно-дуговых процессов. Например, основываясь на данных об аттестации технологий в Уральском регионе можно отметить, что более 80 % предприятий и организаций (там, где это очевидно) не используют импульсно-дуговые процессы в своей повседневной сварочной практике. Для того чтобы восполнить указанный пробел, в настоящей работе проведен сравнительный анализ структуры и механических свойств металла сварных швов, выполненных аустенитно-ферритными сварочными проволоками при сварке высокохромистой стали 15X13H2 без применения импульсно-дугового процесса и с его применением.

В процессе проведения экспериментов осуществляли сварку патрубков диаметром 114×7 мм из стали 15X13H2. Сварку выполняли механизированным способом в среде инертного газа аргона с применением сварочного источника Selco Genesis 503 GSM на постоянном токе и с импульсами частотой до 300 Гц. В качестве плавящегося электрода использовали сварочную проволоку ОК Autrod 2209 диаметром 1,2 мм, химический состав проволоки приведен в табл. 1. С целью

Таблица 1

Марка проволоки	Химический состав, %										
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Ti	Cu	N
OK Autrod 2209	0,01	1,6	0,47	<0,01	0,02	22,9	9,0	0,01	–	–	0,14

снижения погонной энергии сварные соединения выполняли ниточными швами на малых токах.

Сварку на постоянном токе выполняли на следующих режимах: сила тока – 150 А; напряжение на дуге – 18,5 В, скорость подачи сварочной проволоки – 3,7 м/мин. Сварной шов выполняли за пять проходов. Перенос электродного металла осуществлялся по крупнокапельному механизму с короткими замыканиями дугового промежутка (рис. 1). Сварка сопровождалась большой степенью разбрызгивания электродного металла.

Сварку в импульсном режиме выполняли на следующих режимах: среднее значение величины сварочного тока – 130 А, частота импульса – 90 Гц, напряжение на дуге – 21,7 В; скорость подачи сварочной проволоки – 4,3 м/мин. Сварной шов был выполнен за 4 прохода. Перенос электродного металла осуществлялся по струйному механизму без коротких замыканий (рис. 2), что подтверждалось отсутствием разбрызгивания.

Для качественного сравнения сварных швов, выполненных сваркой на постоянном токе и импульсной дуговой сваркой, были проведены механические испытания на ударный изгиб образцов с V-образным надрезом по центру шва при пониженных температурах. Провели фрактографические исследования поверхностей изломов образцов на ударный изгиб. Проведены металлографические

исследования сварных соединений с помощью оптической микроскопии.

Сварные соединения патрубков разрезали на полосы для изготовления образцов на ударный изгиб. В сварных швах, выполненных на постоянном токе, были выявлены кристаллизационные трещины в корневом валике, а также большое количество межваликовых несплавлений (рис. 3). В сварных швах, выполненных импульсно-дуговой сваркой, кристаллизационных трещин выявлено не было, обнаружено небольшое количество межваликовых несплавлений.

Испытания на ударный изгиб проводили при температурах –40, –60 и –80 °С, определяли величину ударной вязкости металла сварных швов. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Поверхность изломов образцов, сваренных на постоянном токе с короткими замыканиями дугового промежутка, с надрезом по центру шва, неоднородная, блестящая. Также на поверхности изломов наблюдается дендритная структура сварного шва, хорошо различимы невооруженным глазом отдельные сварные валики (рис. 4, а).

При импульсно-дуговой сварке поверхность излома однородная, матовая. На поверхности излома не выявляется дендритное строение сварного шва, границы между отдельными валиками неразличимы (рис. 4, б). Наблюдается утяжка в очаге деформаций, образовались губы среза.



Рис. 1. Перенос капли электродного металла при сварке на постоянном токе с короткими замыканиями дугового промежутка [4]

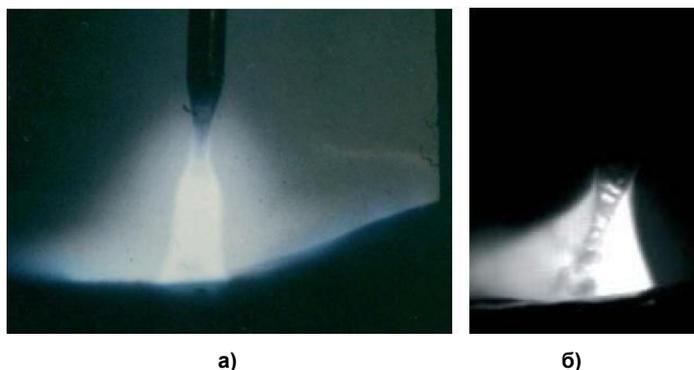


Рис. 2. Импульсная сварочная дуга (Doublepulse): а – форма дуги; б – струйный перенос металла [4]

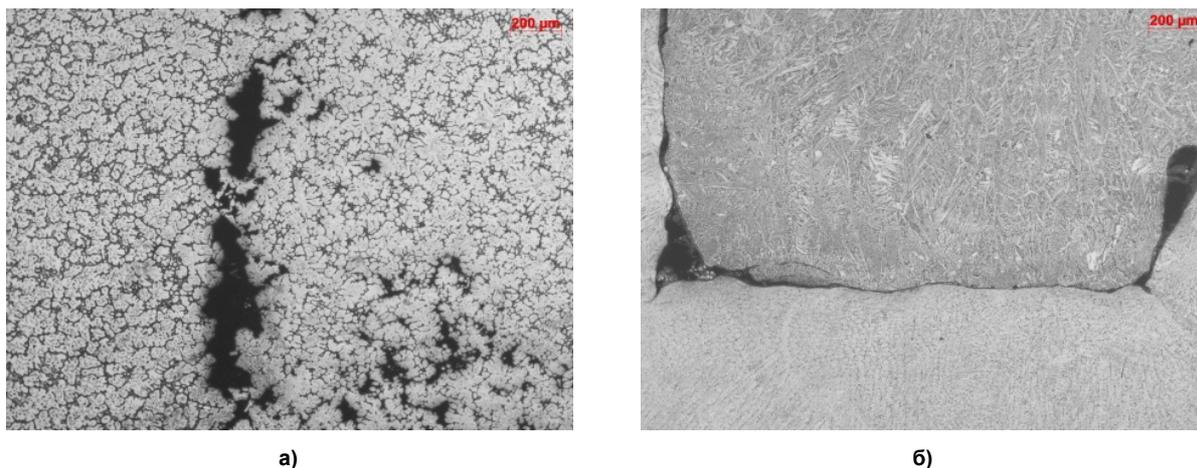


Рис. 3. Дефекты многопроходных сварных швов, выполненных MIG сваркой аустенитными нержавеющими сварочными проволоками: а – кристаллизационная трещина; б – межваликовое несплавление

Таблица 2

Род тока / полярность	Вид надреза	Место нанесения надреза	Температура испытания, °С	Среднее значение ударной вязкости по результатам 3 испытаний, KCV, Дж/см <sup>2</sup>
Постоянный/обратная полярность	V	Центр шва	-40	40
	V	Центр шва	-60	26
	V	Центр шва	-80	15
Импульсный / обратная полярность	V	Центр шва	-40	115
	V	Центр шва	-60	104
	V	Центр шва	-80	70

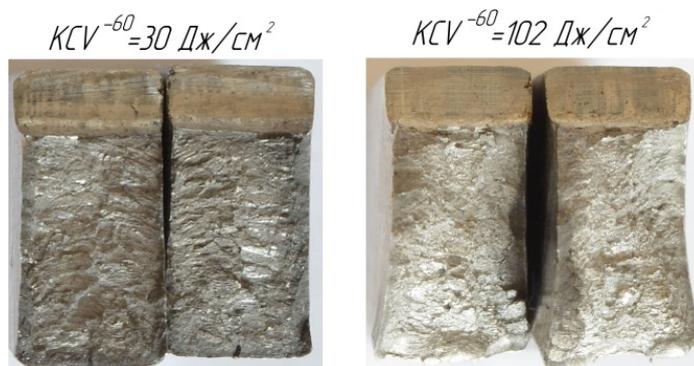


Рис. 4. Поверхности изломов образцов на ударный изгиб с надрезом по центру шва: а – MIG сварка на постоянном токе; б – импульсная MIG сварка

Микрофрактографические исследования образцов на ударный изгиб с надрезом по центру шва, выполненного сваркой на постоянном токе (рис. 5, а) показали, что излом носит смешанный вязко-хрупкий характер разрушения, с преобладанием хрупкой составляющей. В изломе наблюдается большое количество вторичных трещин (рис. 5, б, в), характерных для хрупкого разрушения. Так же наблюдается периодическая смена характера разрушения (рис. 5, г). Полосы вязко-хрупкого разрушения с интеркристаллитным механизмом разрушения (рис. 5, д) сменяются полосами хрупкого разрушения с образованием фасеток скола (рис. 5, е). Протяженные широкие полосы хрупкого разруше-

ния соответствуют транскристаллитному механизму разрушения по телу первичных дендритов.

В результате микрофрактографических исследований образцов на ударный изгиб с надрезом по центру шва, выполненного импульсно-дуговой сваркой (рис. 6, а), выявлено три области, отличающихся характером разрушения. По середине излома, где скорость деформации достигает критических значений, наблюдается смешанный вязко-хрупкий характер излома (рис. 6, б). Не наблюдается каких-либо закономерностей образования поверхностей вязкого и хрупкого разрушений. Присутствие вязкого и хрупкого характеров разрушений наблюдается в равных долях. Ближе к краю

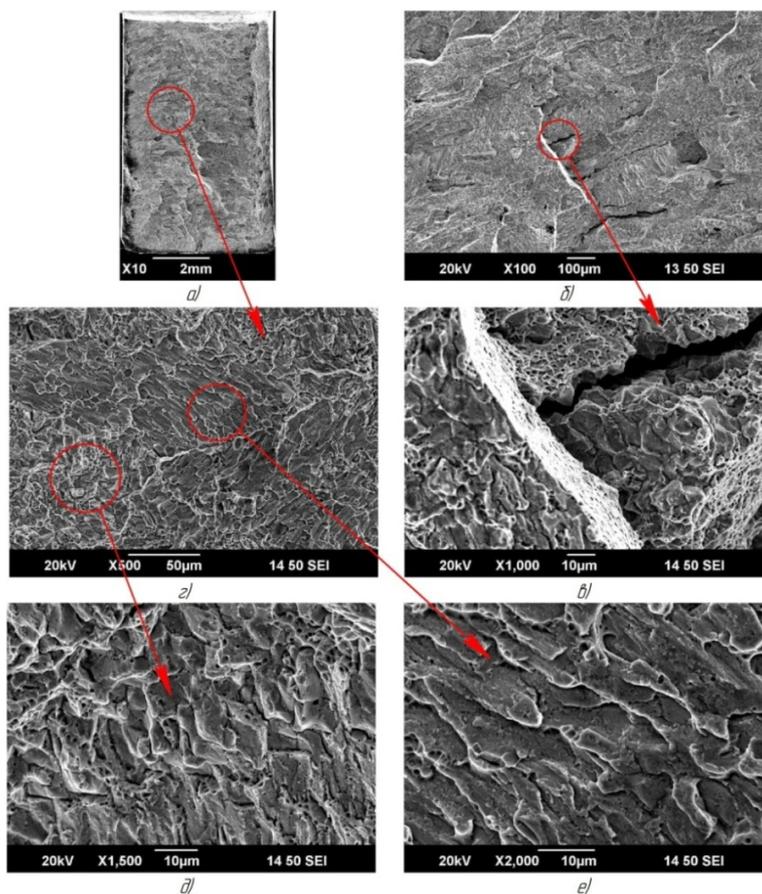


Рис. 5. Фрактографические исследования поверхности излома образца на ударный изгиб сварного соединения, выполненного сваркой на постоянном токе: а – общий вид; б – вторичная трещина; г – область с чередованием полос вязко-хрупкого и хрупкого разрушения; д – полоса вязко-хрупкого разрушения; е – полоса хрупкого разрушения

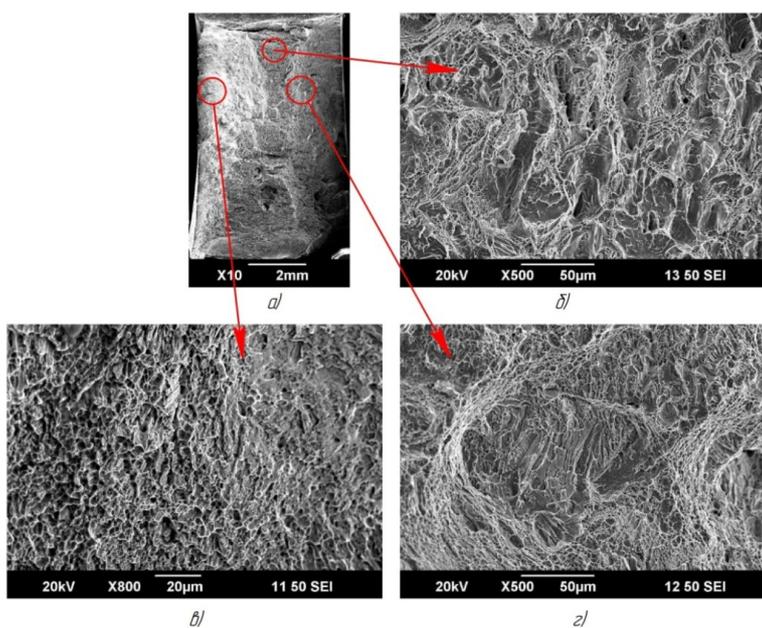


Рис. 6. Фрактографические исследования поверхности излома образца на ударный изгиб сварного соединения, выполненного импульсной MIG сваркой: а – общий вид; б – область вязко-хрупкого разрушения; в – область абсолютно вязкого разрушения; г – область вязкого разрушения с небольшими участками хрупкого разрушения

образца в изломе наблюдается только вязкий характер излома с образованием микроямок (рис. 6, в). Двигаясь от центра к краям образца, доля хрупкого характера разрушения значительно снижается (рис. 6, г), в изломе преобладает вязкий ямочный характер разрушения с небольшими участками хрупкого разрушения с образованием фасеток склола.

Исследования микроструктуры образцов сварных соединений проводили методом оптической микроскопии при помощи оптического микроскопа Axiovert 40 MAT. Для выявления макро- и микроструктуры образцы подвергали травлению в 10 %-ном водном растворе щавелевой кислоты, структуру сварного шва выявляли электролитическим способом.

В ходе проведенных исследований было выявлено, что наплавленному металлу, выполненному сваркой на постоянном токе с короткими замыканиями дугового промежутка аустенитными проволоками, свойственна ячеисто-дендритная форма кристаллизации, что приводит к образованию крупных столбчатых кристаллов (рис. 7, а). При наложении последующих валиков, новые столбчатые кристаллы продолжают кристаллы от предыдущего валика (см. рис. 7, а), происходит образование крупнозернистой дендритной структуры в металле шва (транскристаллитное строение). Ме-

талл шва с такой макроструктурой обладает низкими механическими свойствами. Металлу сварного шва, выполненного импульсно-дуговой сваркой, также свойственна ячеисто-дендритная структура (рис. 7, б), но при наложении последующих валиков происходит разбиение структуры на границе сплавления валиков, нарушается образование транскристаллитного строения литого металла шва.

Полученные результаты можно объяснить следующим. При импульсно-дуговой сварке плавящимся электродом на основной сварочный ток периодически накладываются импульсы тока с частотой в несколько десятков герц. В результате электродинамическая сила становится преобладающей, что вызывает отделение капли. Периодические импульсы сварочного тока, превышающие в 3–4 раза обычную величину постоянного тока, увеличивают преимущественно глубину проплавления металла, а также скорость плавления электрода и переноса его массы мелкими каплями. Это способствует выполнению сварки с высокой скоростью, и, следовательно, высокой скорости кристаллизации, получению глубокой, но короткой ванны, что обеспечивает наиболее благоприятную объемную схему кристаллизации [5].

Главным преимуществом импульсно-дуговой сварки является кардинальное изменение усло-

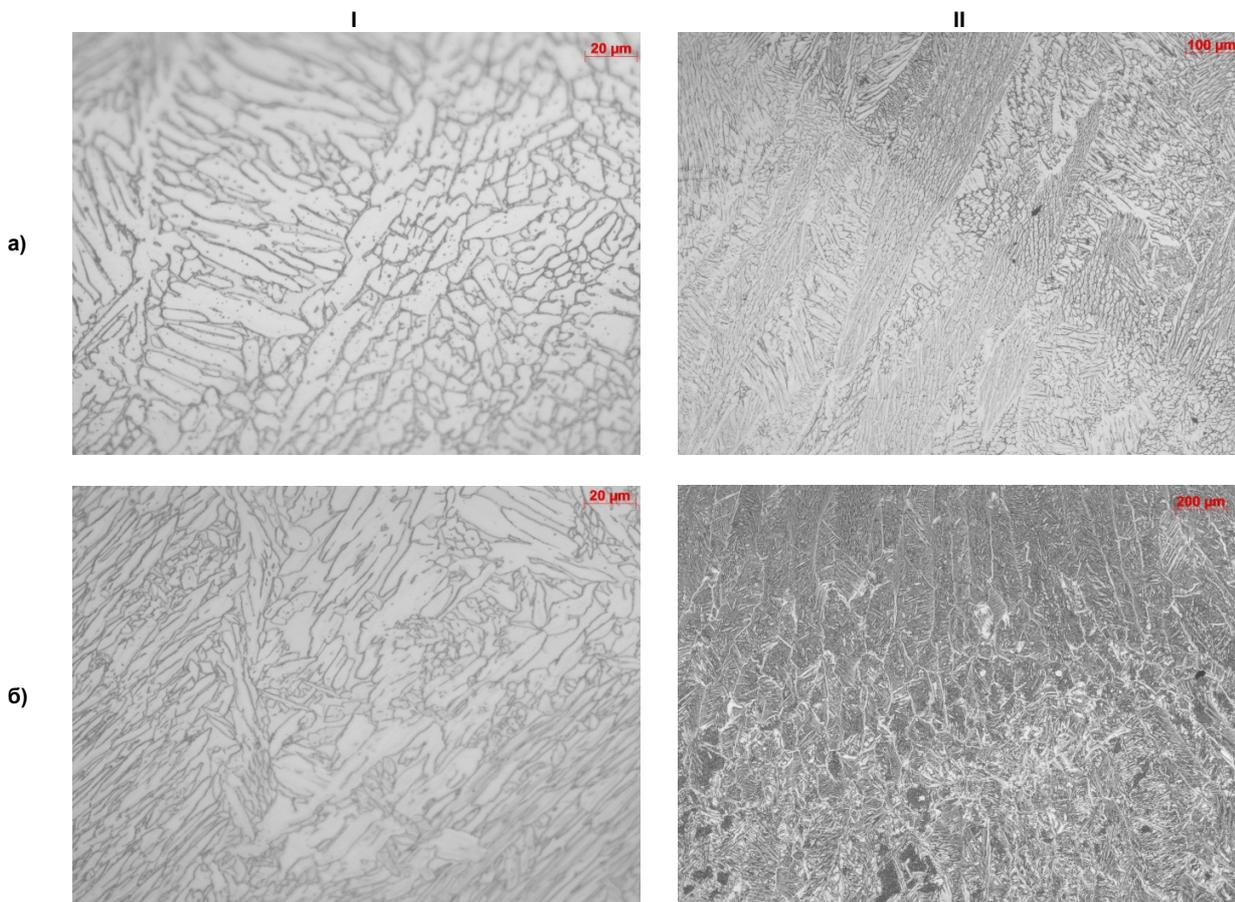


Рис. 7. Влияние импульсной сварки на структуру металла шва (I) и линии сплавления валиков (II): а – MIG сварка на постоянном токе; б – импульсная MIG сварка

вий кристаллизации. Изменяется форма сварочной ванны, увеличивается термическое переохлаждение, что способствует ускорению роста кристаллитов и их измельчению. Импульсы тока большой плотности способствуют дезориентации роста кристаллов аустенита, и как следствие, нарушению транскристаллитного строения металла шва. При этом практически подавляется межкристаллитная дендритная ликвация, что способствует увеличению степени легирования твердого раствора металла шва и улучшению его механических свойств.

При импульсной MIG сварке происходит управляемый перенос металла с частотой переноса, равной (или кратной) частоте импульсов, в то время, как среднее значение тока может быть небольшим и значительно меньшим критического (рис. 8).

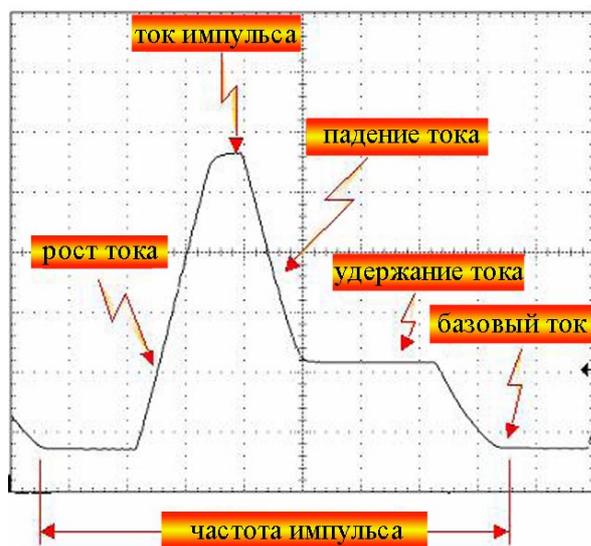


Рис. 8. Форма импульса тока при импульсно-дуговой сварке

Перенос металла в сварочную ванну осуществляется по струйному механизму без коротких замыканий дугового промежутка, не происходит разбрызгивания электродного металла. Расплавленный металл ложится в сварочную ванну отдельными небольшими чешуйками. Швы получаются с плавными очертаниями и мелкой чешуйчатостью, соответствующей выбранному режиму пульсации дуги. За счет подачи дополнительного импульса тока высокой частоты на сварочную дугу происходит разрушение окисной пленки на поверхности металла. Что способствует более качественному сплавлению электродного металла с основным металлом и металлом предыдущих валиков.

**Ярославцев Сергей Иванович**, канд. техн. наук, доцент кафедры оборудования и технологии сварочного производства, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); element-54@mail.ru.

**Худяков Артем Олегович**, аспирант кафедры оборудования и технологии сварочного производства, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); temkaho@gmail.com.

## Выводы

1. Высокочастотные импульсы тока большой плотности изменяют схему кристаллизации наплавленного металла, с одновременным измельчением кристаллитов аустенита. При сварке аустенитно-ферритных многопроходных швов применение импульсно-дугового процесса способствует предотвращению образования их транскристаллитного строения, что повышает ударную вязкость сварных швов в 3–4 раза по сравнению с сварными швами, выполненными механизированной аргонодуговой сваркой на постоянном токе. Таким образом, сварные соединения, выполненные с применением импульсно-дугового процесса, обладают повышенной работоспособностью.

2. Подача импульсов высокой частоты при сварке деталей из высокохромистой стали 15X13N2 аустенитно-ферритными сварочными проволоками способствует разрушению окисных пленок на поверхности кромок данных деталей и, таким образом, снижается вероятность образования дефектов сварного шва типа «несплавление».

3. Применение импульсно-дугового процесса при механизированной аргонодуговой сварке плавящимся электродом обеспечивает управляемый струйный перенос электродного металла на низких значениях средней величины сварочного тока. При данных значениях струйный перенос при сварке только на постоянном токе вообще невозможен. При этом сварку можно выполнять в любом пространственном положении, расплавленный металл ложится мелкими чешуйками, обеспечивая наложение швов с плавным формированием.

## Литература

1. Лифшиц, Л.С. *Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений* / Л.С. Лифшиц, А.Н. Хакимов. – 2-е изд., перераб и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 336с.
2. *Сварка в машиностроении: справ.: в 4 т. / под ред. А.И. Акулова.* – М.: Машиностроение, 1978. – Т. 1. – 462 с.
3. *Сварка и свариваемые материалы: справ.: в 3 т. / под ред. В.Н. Волченко.* – М.: Металлургия, 1991. – Т. 1. – 527с.
4. Райский, В.Г. *Технология импульсного сварочного процесса: TwinPulse, SpeedPulse, STT, HighSpeed.* – www.intertehno.ru.
5. *О преимуществах импульсной дуговой MIG-сварки высокопрочных алюминиевых сплавов* / В.И. Зайцев, А.Т. Дружинин, Д.П. Семин, Б.Ф. Якушин // *Сварка и диагностика.* – 2010. – № 2. – С. 34–39.

Поступила в редакцию 3 марта 2014 г.

## EFFECT OF PULSE-ARC MIG WELDING ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF WELDED SEAMS MADE WITH AUSTENITIC-FERRITIC WELDING WIRES

*S.I. Yaroslavtsev*, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
*element-54@mail.ru*,

*A.O. Khudyakov*, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
*temkaho@gmail.com*

The results of the impact of pulse-arc MIG welding on the microstructure and mechanical properties of the multi-pass welds made with austenitic-ferritic welding wires are presented. It is shown that the use of pulsed arc process contributes significantly to the metal structure refinement and increases the metal impact toughness from 3 to 4 times.

*Keywords: direct current, pulse-arc welding, impact toughness, microstructure, dendritic structure.*

### References

1. Lifshitz L.S., Khakimov A.N. *Metallovedenie svarki i termicheskaya obrabotka svarnykh soedineniy* [Metallography of Welding and Heat Treatment of Welded Joints]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 336 p.
2. *Svarka v mashinostroenii* [Welding Engineering]. Akulov A.I. (Ed.). Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978, vol. 1. 462 p.
3. *Svarka i svarivaemye materialy* [Welding and welding materials]. Volchenko V.N. (Ed.). Moscow, Metallurgiya Publ., 1991, vol. 1. 527 p.
4. Rayskiy V.G. *Tekhnologiya impul'snogo svarochnogo protsessa: TwinPulse, SpeedPulse, STT, High Speed* [Technology of Pulsed Welding Process: TwinPulse, SpeedPulse, STT, High Speed]. Available at: <http://www.intertehno.ru>.
5. Zaytsev V.I., Druzhinin A.T., Semin D.P., Yakushin B.F. [On the Advantages of Pulsed MIG Arc Welding of High-Strength Aluminium Alloys]. *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics], 2010, no. 2, pp. 34–39. (in Russ.)

*Received 3 March 2014*