

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 621.791

**МЕХАНИЗМ ПОВЫШЕНИЯ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ
СОЕДИНЕНИЙ В АТОМНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ
ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА СВАРОЧНЫЙ КОНТУР**

© 2016 С.М. Бурдаков

Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

При изготовлении и эксплуатации ответственных металлических конструкций в атомно-энергетическом комплексе на основе жаропрочных легированных сталей могут иметь место процессы пластической деформации, протекающие с различной скоростью. Ряд деталей и узлов могут испытывать разные деформационные изменения.

Были изготовлены три образца для испытания на ударную вязкость при сварке с наложением напряжения 80В частотой 40кГц и три образца без наложения импульсной составляющей.

С помощью ручной дуговой сварки электродом ТМЛ-3У диаметром 4 мм, выполнялось многопроходное стыковое соединение стальных пластин толщиной 15мм с наложением и без наложения на дугу постоянного тока напряжения 80В частотой 40кГц от специального генератора при параллельном подключении к основному сварочному источнику. После проведения механических испытаний были получены следующие результаты. Среднее значение ударной вязкости для образцов без наложения импульсной составляющей составило 24 кгс·м/см², а для образцов при сварке с наложением напряжения 80В частотой 40кГц составило 26,6 кгс·м/см². Сделан вывод о том, что электромагнитное поле частотой 40кГц обеспечивает формирование структуры металла сварного шва с более высокими показателями ударной вязкости.

Ключевые слова: ответственные металлические конструкции, процессы пластической деформации, устойчивость горения дугового разряда, механические свойства, динамические нагрузки, ударная вязкость, измельчение дендритов, дефекты сварного соединения, электромагнитное поле, структура металла сварного шва, высокочастотные колебания.

Поступила в редакцию 14.05.2016 г.

Ряд ответственных металлических конструкций на основе жаропрочных легированных сталей, используемых в атомно-энергетическом комплексе, их детали и узлы могут испытывать пластические деформационные изменения в течение многих лет, а другие – мгновенно.

Скорость деформации при статических нагрузках, составляет, $10^{-4} \div 10^{-2}$ сек. При динамической нагрузке на конструкцию меняется поведение дефектов в кристаллической решетке (в первую очередь дислокаций): увеличивается их количество, затрудняется перемещение. Результатом этого является изменение механических свойств сварочных соединений при динамических нагрузках по сравнению со статическими. Это изменение заключается в том, что прочностные характеристики при динамическом нагружении увеличиваются, а характеристики пластичности (ударной вязкости), как правило, уменьшаются [1].

Труднодоступность мест сварки в монтажных условиях, сложная геометрия сварных стыков, атмосферные воздействия способствуют частым, вынужденным

обрывам сварочной дуги с образованием недопустимых дефектов. Такие дефекты как неправильная форма швов, в частности чрезмерное усиление, резкие переходы от шва к основному металлу, бугристость и т. п. могут существенно снижать работоспособность соединения, эксплуатационную надежность конструкции в целом и возникновению аварийных ситуаций, особенно при динамических или вибрационных нагрузках [2].

Для работы в монтажных условиях сварочная дуга должна обладать повышенной устойчивостью горения.

Устойчивость горения сварочной дуги является важным технологическим фактором, влияющим на качество и прочностные характеристики сварочных швов при изготовлении металлических конструкций ответственного назначения. Следует отметить, что наложение напряжения 80В, частотой 40кГц на дугу постоянного тока способствует повышению ее устойчивости [3].

Известно, что сварочная дуга постоянного тока с наложением напряжения 80В, частотой 40кГц при ручной дуговой сварке обладающая повышенной устойчивостью и эластичностью, дает возможность увеличить глубину проплавления, улучшить механические свойства и качество металла шва [4].

Величина ударной вязкости зависит от пластичности и прочности испытываемого материала. Чем выше пластичность и чем больше напряжения на всем протяжении испытаний, тем большая работа, которую необходимо затратить на пластическую деформацию и разрушение в процессе испытания и эксплуатации конструкции. Следует отметить, что испытания на ударную вязкость позволяют выявить факторы, влияющие на прочность и пластичность (химический состав, форма и величина кристаллов, наличие дефектов и т.д.) [2].

Поэтому исследования металла сварного шва на ударную вязкость и механизмов влияющих на ее изменение являются актуальной задачей.

Для оценки влияния низковольтного напряжения частотой 40кГц на механические свойства и структуру металла сварного шва при сварке покрытыми электродами ТМЛ-3У был проведен ряд экспериментов по определению механических свойств металла сварного шва, а именно - ударной вязкости (КсuШ). ТМЛ-3У относится к электродам с фтористо-кальциевым покрытием, применяются для сварки оборудования и трубопроводов из сталей марок 12МХ, 15ХМ, 20ХМЛ, 12Х2М1, 12Х1МФ, 12Х2МФБ, 12Х2МФСР, 20ХМФЛ, 15Х1М1Ф и 15Х1М1ФЛ, работающих при температурах до 570°С [5].

В соответствии с [6] для испытаний на ударную вязкость был принят тип образца с U – образным концентратором напряжений (рис. 1). В данной работе испытания проводились на маятниковом копре МК-30.

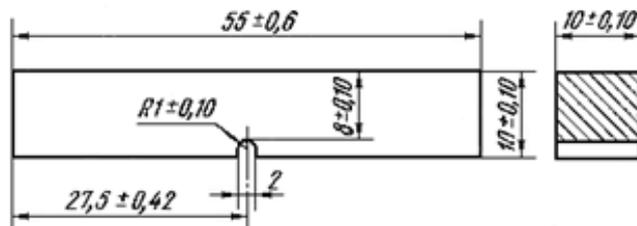


Рис. 1. – Тип образца для испытания на ударную вязкость

Образцы изготавливались следующим образом. С помощью ручной дуговой сварки электродом ТМЛ-3У диаметром 4 мм, выполнялось многопроходное стыковое соединение стальных пластин толщиной 15мм с наложением и без наложения на дугу постоянного тока напряжения 80В частотой 40кГц от специального генератора при параллельном подключении к основному сварочному источнику. Использовался

сварочный источник ВДУ-504, сварочный ток в данном случае составлял паспортное значение для данной марки электрода 140А в обоих случаях. Использовалась разделка кромок пластин согласно [7] – С23. После чего из металла полученного сварного соединения велось изготовление выше указанных образцов для испытаний. Были изготовлены три образца для испытания на ударную вязкость при сварке с наложением напряжения 80В частотой 40кГц и три образца без наложения импульсной составляющей.

После проведения механических испытаний были получены следующие результаты. Значение ударной вязкости (K_{cuIII}) для образцов без наложения импульсной составляющей (образец 1. – 24,8 кгс·м/см², образец 2. – 24,3 кгс·м/см², образец 3. – 23 кгс·м/см²). Для образцов с наложением импульсной составляющей (образец 1-1. – 25,9 кгс·м/см², образец 2-1. – 26,5 кгс·м/см², образец 3-1. – 28 кгс·м/см²). Среднее значение ударной вязкости для образцов без наложения импульсной составляющей составило 24 кгс·м/см², а для образцов при сварке с наложением напряжения 80В частотой 40кГц составило 26,6 кгс·м/см².

Анализируя эти данные, можно сказать, что электромагнитное поле частотой 40кГц обеспечивает формирование структуры металла сварного шва с более высокими показателями ударной вязкости.

Наложение на дугу напряжения 80В частотой 40кГц приводит к изменению таких технологических характеристик процесса, как формирование шва, условия первичной кристаллизации металла сварочной ванны [8].

В целях выявления особенностей формирования шва необходимо определить его размеры и форму. Основные размеры сварного шва определяли экспериментально, так как применение аналитических методов затруднено, при сварке в нижнем положении на стальной пластине толщиной 8мм без наложения (образец 1), и с наложением напряжения 80В частотой 40кГц на дуговой разряд ($I_{св}=140А$) (образец 2).

Размеры сварного шва определялись по поперечным макрошлифам (рис. 2 а, б). В таблице 1 приведены результаты измерения геометрических параметров сварного шва при сварке в нижнем положении (рис. 3).

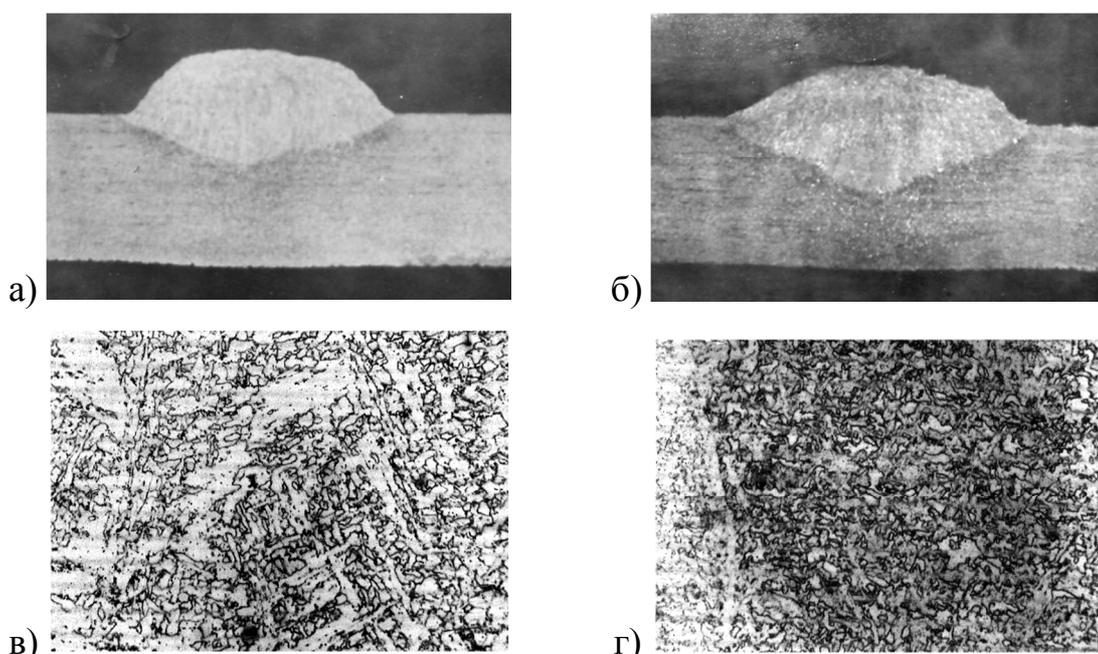


Рис. 2. – Макрошлиф сварного шва, без наложения (а), и с наложением напряжения 80В частотой 40кГц ($I_{св}=140А$) (б), и микрошлиф с увеличением структуры x500 (в), (г)

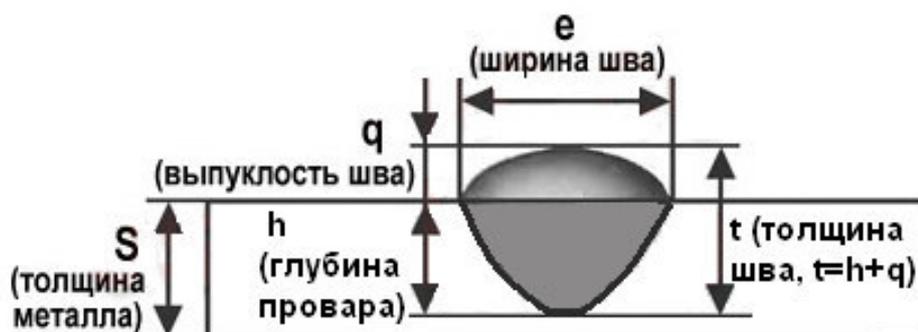


Рис. 3. – Основные геометрические параметры сварного шва:

- S – толщина металлической пластины;
- e – ширина сварного шва;
- q – выпуклость стыкового шва (высота усиления) – наибольшая высота (глубина) между поверхностью сварного шва и уровнем расположения поверхности сваренных деталей;
- h – глубина провара (глубина проплавления) – наибольшая глубина расплавления основного металла;
- t – толщина шва, $t = q + h$.

Следует отметить, что при наложении напряжения 80В частотой 40кГц на дуговой разряд размеры сварочной ванны несколько увеличиваются с получением более мелкозернистой его структуры (рис. 2 в, г). Повышается глубина проплавления на 35%. Понижается выпуклость шва на 7,7%.

Таблица 1. – Результаты измерения геометрических параметров сварного шва

№	Параметры режима сварки		Основные геометрические параметры сварного шва				
	f, к Гц	I _{св} , А	S, мм	h, мм.	q, мм.	e, мм.	t, мм.
образец 1	–	140	8	3,15	3,5	15,5	6,65
образец 2	40	140	8	4,25	3,25	16,65	7,5

Механизм повышения ударной вязкости в данном случае может быть связан с изменением структуры металла шва, что может быть объяснено следующим образом [9]:

1) Ввод колебаний в жидкий металл приводит к гомогенному образованию новых центров кристаллизации. Это связано с появлением скачков давления в жидкой фазе, что согласно принципу Ле–Шателье приводит к повышению равновесной температуры кристаллизации и к созданию участков переохлажденного металла. Такое переохлаждение называется динамическим.

2) Измельчение растущих кристаллов при колебаниях жидкой фазы происходит за счет сил трения, возникающих между подвижной жидкой фазой и растущим кристаллом.

В работе [9] приводится, что при частотах колебаний свыше 9 кГц силы трения достигают значений, превышающих прочность кристаллита при температуре плавления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Громов, Н.П. Теория обработки металлов давлением [Текст] / Н.П. Громов. – М.: Metallurgy, 1978. – 361 с.
2. Волченко, В.Н. и др. Контроль качества сварки [Текст] / В.Н. Волченко, А.К. Гурвич, А.Н. Майоров, Л.А. Кашуба, Э.Л. Макаров, М.Х. Хусанов. – М.: Машиностроение, 1975. – 328 с.
3. Чернов, А.В. и др. Повышение устойчивости горения дуги при сварке покрытыми электродами [Текст] / А.В. Чернов, Ю.В. Полетаев, З.О. Кавришвили, С.М. Бурдаков // Сварочное производство. – 2000. – №2. – С. 7–9.
4. Бурдаков, С.М. и др. Физическая модель электрического дугового разряда с наложением высокочастотного напряжения [Текст] / С.М. Бурдаков, А.В. Чернов, Ю.В. Полетаев, С.В. Полежаев // Сварочное производство. – 2001. – № 11. – С. 13-16.
5. ГОСТ 9466–75. Electrodes covered metal for manual arc welding of steels and deposition. Classification and general specifications [Текст]. – М.: Standartinform, 2007. – 25 с.
6. ГОСТ 6996-66 (ISO 4136-89, ISO 5173-81, ISO 5177-81). Svarnye soedineniya. Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoystv [Текст]. – М.: Standartinform, 2006.– 44 с.
7. ГОСТ 5264-80. Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры [Текст]. – М.: Standartinform, 2005.– 33 с.
8. Бурдаков, С.М. и др. Повышение устойчивости дугового разряда и качества соединений при сварке покрытыми электродами [Текст] / С.М. Бурдаков, А.В. Чернов, Ю.В. Полетаев, С.В. Полежаев, В.В. Прокопенко // Новые методы теоретических и экспериментальных исследований материалов, приборов и технологий : сб. науч.тр. Волгодон. ин-т. Новочерк. гос. техн. ун-та. – Новочеркасск: Набла, 2001. – С. 111–115.
9. Болдырев, А.М. О механизме формирования структуры металла шва при введении низкочастотных колебаний в сварочную ванну [Текст] / А.М. Болдырев // Сварочное производство. – 1976. – №2. – С. 52–55.

REFERENCES

- [1] Gromov Y.G. Teoriya obrabotki metallov davleniem [Theory of processing of metals pressure]. M. Pub. "Metallurgy" [Metallurgy publishing house], 1978, 361 p. (in Russian)
- [2] Volchenko V.N. Kontrol kachestva svarki [Welding quality control]. M. Pub. "Mashinostroenie" [Mashinostroenie publishing house], 1975, 328 p. (in Russian)
- [3] Chernov A.V., Poletaev Yu.V., Kavrishvili Z.O., Burdakov S.M. Povyshenie ustoychivosti gorenija dugi pri svarke pokrytymi elektrodami [Increasing the stability of arcing in welding with coated electrodes]. Welding fabrication, 2000, №2(783), ISSN 0491-6441, pp. 7–9. (in Russian)
- [4] Burdakov S.M., Chernov A.V., Poletaev Yu.V., Polezhaev S.V. Fizicheskaya model elektricheskogo dugovogo razryada s nalozheniem vysokochastotnogo napryazheniya [Physical model of electric arc discharge with the application of high-frequency voltage]. Welding fabrication, 2001, №11(804), ISSN 0491-6441, pp. 13–16. (in Russian)
- [5] GOST 9466–75. Elektrody pokrytye metallicheskie dlya ruchnoy dugovoy svarki staley i naplavki. Klassifikatsiya i obshchie tekhnicheskie usloviya [Covered metal electrodes for manual arc welding of steels and deposition. Classification and general specifications]. M. Pub. "Standartinform" [Standartinform publishing house], 2007, 25 p. (in Russian)
- [6] GOST 6996-66 (ISO 4136-89, ISO 5173-81, ISO 5177-81). Svarnye soedineniya. Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoystv [Welded joints. Methods of mechanical properties determination]. M. Pub. "Standartinform" [Standartinform publishing house], 2006, 44 p. (in Russian)
- [7] GOST 5264-80. Ruchnaya dugovaya svarka. Soedineniya svarnye. Osnovnye tipy, konstruktivnye elementy i razmery [Manual arc welding. Welding joints. Main types, design elements and dimensions]. M. Pub. "Standartinform" [Standartinform publishing house], 2005, 33 p. (in Russian)
- [8] Burdakov S.M., Chernov A.V., Poletaev Yu.V., Polezhaev S.V., Prokopenko V.V. Povyshenie ustoychivosti dugovogo razryada i kachestva soedineniy pri svarke pokrytymi elektrodami [Increase of stability of the arc category and quality of connections when welding by the covered electrodes] [Works of the conference Volgodonsk institute of Novocherkassk state technical university "New methods of theoretical and pilot studies of materials, devices and technologies"]. Novocherkassk. Pub. "Nabla" [Volgodonsk institute of Novocherkassk state technical university], 2001, pp. 111–115. (in Russian)
- [9] Boldyrev A.M. O mekhanizme formirovaniya struktury metalla shva pri vvedenii nizkochastotnykh kolebaniy v svarochnuyu vannu [About the mechanism of formation of structure of metal of a seam at introduction of low-frequency fluctuations to a welding bathtub]. Welding fabrication, 1976, №2(496), ISSN 0491-6441, pp. 52–55. (in Russian)

The Mechanism of Connection Impact Strength Increase during Pulse Impact on the Welding Circuit in the Nuclear Power Complex

S.M. Burdakov

*Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,
Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360
e-mail: SMBurdakov@mephi.ru*

Abstract – BACKGROUND The processes of plastic deformation proceeding with different speed can take place at production and operation of responsible metal designs on the basis of heat resisting alloyed by steels in the nuclear power complex. A number of the used designs of their details and knots can be exposed to different deformation changes.

Three samples for test for impact strength when welding with imposing of tension 80B with a frequency of 40 kHz and three samples without imposing of a pulse component were made.

METHODS Multipass butt connection of steel plates 15 mm thick with imposing and without imposing on an arch of a direct current of tension 80B with a frequency of 40 kHz from the special generator at parallel connection to the main welding source was carried out by means of manual arc welding the electrode of TML-3U with a diameter of 4 mm.

RESULTS The following results were received after carrying out mechanical tests. Average value of impact strength for samples without imposing of a pulse component is 24 kgf·m/cm², and for samples when welding with imposing of tension 80B with a frequency of 40 kHz is 26,6 kgf·m/cm².

CONCLUSIONS It is possible to tell that the electromagnetic field with a frequency of 40 kHz provides metal structure formation of welded seam with higher rates of impact strength.

Keywords: responsible metal designs, processes of plastic deformation, stability of the arc category burning, mechanical properties, dynamic loadings, impact strength, crushing of dendrites, defects of welded connection, electromagnetic field, metal structure of welded seam, high-frequency fluctuations.