

DOI: 10.15593/2224-9877/2015.4.02

УДК 621.791.755

**Ю.Д. Щицын<sup>1</sup>, А.В. Кожанов<sup>2</sup>, Д.С. Белинин<sup>1</sup>, С.Д. Неулыбин<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, г. Пермь, Россия<sup>2</sup>ООО «Производственная компания «Теплов и Сухов»», г. Пермь, Россия

## **ПЛАЗМЕННАЯ СВАРКА РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ НА ТОКЕ ОБРАТНОЙ ПОЛЯРНОСТИ**

Представлены результаты исследования возможности плазменной сварки на токе обратной полярности разнородных металлов. Работа выполнялась на оборудовании, разработанном на кафедре сварочного производства и технологии конструкционных материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета. Для всех пар металлов: Al – Cu, Al – Ti, Cu – Ti, Al – X18H10T, Cu – X18H10T – использовался вариант ручной сварки без предварительного нанесения легкоплавких металлов на свариваемые кромки более тугоплавкого металла. Сваривались стыковые швы пластин из различных материалов толщиной 5 мм. Свариваемые кромки на алюминиевом сплаве Д16 не обрабатывались, на медной пластине делался скос под углом 110°. Перед сваркой на титане выполнена односторонняя разделка кромки под углом примерно 45° с приотуплением 1,5–2 мм. Разделка стальной кромки производилась под углом 45°. При сварке меди М1 и титанового сплава ОТ4 проводилась разделка кромок обоих материалов под углом 45° и механическая очистка. В качестве защитного и плазмообразующего газа использовался аргон. Плазменная сварка выполнялась ручным способом. Сварка выполнялась без плавления более тугоплавкого в паре металла с использованием в качестве присадочного материала проволоки из металла, имеющего более низкую температуру плавления.

Были выполнены металлографические исследования и механические испытания сварных соединений. На всех металлах с более высокой температурой плавления обеспечивается хорошее смачивание жидким металлом всей поверхности, очищенной катодным распылением. Для всех пар металлов получены сварные швы без внутренних дефектов с минимальным перемешиванием свариваемых металлов.

**Ключевые слова:** плазменная сварка, плазмотрон, обратная полярность, аргон, цветные металлы, диффузия, титан, алюминий, медь, высоколегированные сплавы.

**Iu.D. Shchitsyn<sup>1</sup>, A.V. Kozhanov<sup>2</sup>, D.S. Belinin<sup>1</sup>, S.D. Neulybin<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation<sup>2</sup>Ltd. "Production company Teplov and Sukhov", Perm, Russian Federation

## **PLASMA WELDING OF DISSIMILAR METALS AT REVERSE CURRENT POLARITY**

The article presents the results of a study on the possibility of plasma welding current polarity reversal of dissimilar metals. The work performed on the equipment developed at the Department of welding and structural materials technology PNIPU. For all pairs of metals: Al-Cu, Al-Ti, Cu-Ti, Al-X18H10T, Cu-X18H10T use a variant of manual welding without applying fusible metal welded to the edge of a re-

fractory metal. Butt welded joints of plates of different materials, thickness 5 mm. Welded edges on the aluminum alloy D16 is not treated, a copper plate was placed bevel 110 degrees. Before welding performed on titanium-sided cutting edge at an angle of about 45° with the dulling of 1.5-2 mm. Cutting edge made of steel angle of 45°. When welding copper M1 and titanium alloy OT4 conducted cutting edge of both materials at an angle of 45° and mechanical cleaning. The shielding and plasma-forming gas was used argon. Plasma welding performed manually. The filler metal used as a metal wire having a lower melting point. Welding was performed without melting a refractory metal in a pair using as a filler material, a wire of a metal having a lower melting point.

Metallographic studies were made and mechanical testing of welds. All metals with higher melting temperature ensures good wetting of the molten metal across the surface treated by cathodic sputtering. For all pairs of metal welds produced without internal defects with minimal stirring welded metals.

**Keywords:** plasma welding, plasma arc, reverse polarity, argon, non-ferrous metals, diffusion, titanium, aluminum, copper, high alloys.

При изготовлении конструкций специального назначения возникает необходимость сварки разнородных материалов. Такие конструкции находят применение в авиастроении, ракетостроении, атомной энергетике, военно-промышленном комплексе, химической промышленности и др. Зачастую соединяемые металлы имеют большое различие по физико-химическим свойствам, что ограничивает возможности получения качественных сварных соединений. Многие проблемы решаются использованием некоторых способов сварки давлением: диффузионной, трением, контактной. Однако в ряде случаев требуется использование сварки плавлением. При этом возникают большие, а иногда практически неразрешимые затруднения при сварке металлов, имеющих значительные отличия по температуре плавления, плотности, жидкотекучести, теплопроводности, кристаллическому строению, химической активности и т.д. Первые сведения о сварке плавлением разнородных металлов были получены еще Н.Г. Славяновым во время его работы на Мотовилихинских пушечных заводах в г. Перми в конце XIX в. [1]. Однако при этом соединяемые пары металлов обладали неограниченной взаимной растворимостью и близостью физико-химических свойств.

На сегодняшний день возникает необходимость сварки таких пар металлов, как: Al – Cu, Al – Ti, Cu – Ti, Al – X18H10T, Cu – X18H10T.

Металлы в этих парах значительно различаются по температуре плавления, плотности, жидкотекучести, теплопроводности, кристаллическому строению, не образуют твердых растворов, склонны к образованию хрупких интерметаллидных соединений.

При необходимости сварки таких пар плавлением используется предварительное нанесение на свариваемые кромки металла, имеющего более высокую температуру плавления, слоя металла с низкой тем-

пературой плавления [2, 3]. Для соединения чаще всего используется аргонодуговая сварка неплавящимся электродом на режимах с минимальной погонной энергией. В качестве присадочного металла используется более легкоплавкий металл. Сварка по такой технологии дорогостояща и трудоемка, при этом качество соединения не всегда отвечает предъявляемым требованиям.

Плазменная сварка на токе обратной полярности обеспечивает мощную катодную очистку и активацию поверхности металла в зоне обработки, широкое регулирование тепловложения в зону сварки, поэтому можно предположить, что использование ее для сварки разнородных металлов может дать хорошие результаты [4, 5].

Исследование возможности плазменной сварки на токе обратной полярности разнородных металлов проводилось на оборудовании, разработанном на кафедре сварочного производства и технологии конструкционных материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета [6].

Для всех пар металлов: Al – Cu, Al – Ti, Cu – Ti, Al – X18H10T, Cu – X18H10T – использовался вариант сварки без предварительного нанесения легкоплавких металлов на свариваемые кромки более тугоплавкого металла. Сваривались стыковые швы пластин толщиной 5 мм. В качестве защитного и плазмообразующего газа использовался аргон. Сварка выполнялась ручным способом. В качестве присадочного металла использовалась проволока из металла, имеющего более низкую температуру плавления.

### **Плазменная сварка алюминия с медью**

Свариваемые кромки на алюминиевом сплаве Д16 не обрабатывались, на медной пластине делался скос под углом 110°. При сварке металлов с разной теплопроводностью рекомендуется смещение источника нагрева с оси шва в сторону металла, имеющего большую теплопроводность, на расстояние равное половине толщины свариваемых металлов [3]. В данном случае сжатая дуга смещалась на кромки медного образца, происходила катодная очистка поверхности свариваемых кромок. Присадочная проволока св. АК5 подавалась со стороны алюминиевого образца на кромки меди и принудительно смачивала ее поверхность, при этом соединение происходило без плавления меди. Особенностью подачи присадочной проволоки является то, что она подается с обязатель-

ным касанием нагретой, прошедшей катодную очистку поверхности кромок в зоне защиты или непосредственно в сварочную ванну [7]. Полученный сварной шов (рис. 1) имеет механические характеристики на уровне характеристик присадочного материала.



Рис. 1. Сварное соединение Al с Cu

Макро- и микроструктурные исследования показывают, что металл шва плотный, без внутренних дефектов (рис. 2, 3).

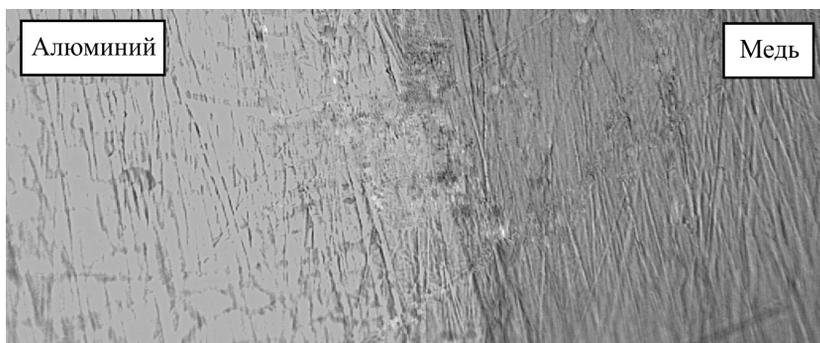


Рис. 2. Макроструктура сварного соединения Al – Cu ( $\times 130$ )

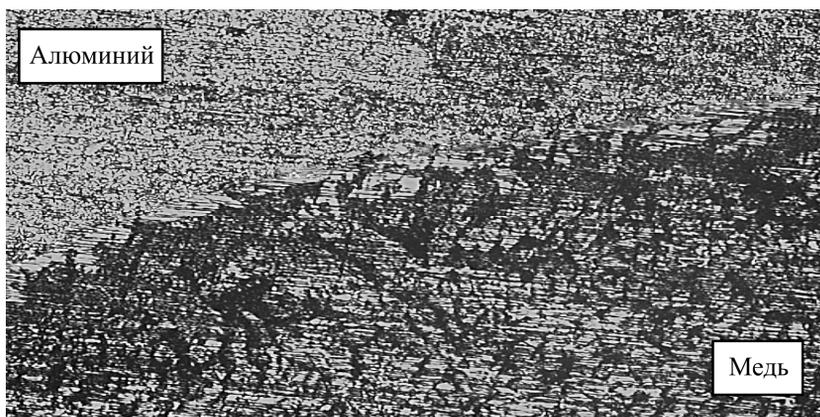


Рис. 3. Микроструктура сварного соединения Al – Cu ( $\times 500$ )

На макро- и микрошлифах видно, что:

- граница между металлами четкая, переход от одного металла к другому резкий;
- по всей длине соединения трещин не наблюдается;
- поры и неметаллические включения отсутствуют;
- перемешивания металлов по всей длине соединения не наблюдается.

### **Плазменная сварка алюминия с титаном**

Сварка алюминия и титана осуществлялась по методу, использовавшемуся для сварки алюминия и меди. Сваривались алюминиевый сплав Д16 и титановый сплав ОТ4.

Перед сваркой на титане выполнена односторонняя разделка кромки под углом примерно  $45^\circ$  с притуплением 1,5–2 мм и механическая очистка верхней и нижней поверхности на ширину 20 мм [8].

Во время сварки сжатая дуга была смещена от оси на алюминиевый образец, величина смещения составляла примерно 2 мм. После появления подплавления алюминиевой кромки в сварочную ванну подавалась присадочная проволока марки АК5, при этом жидкий металл проталкивался на кромки титанового образца и принудительно смачивал его. Стремилась обеспечить сварку без плавления титанового сплава. Как правило, при сварке титана и его сплавов предъявляются высокие требования к защите зоны сварки. В данном случае образцы были плотно прижаты на приспособлении для сварки, защита сварочной ванны осуществлялась за счет подачи защитного газа из плазмотрона, поддува защитного газа с обратной стороны шва не было. Сварной шов получен при отсутствии смачивания алюминием притупления на титане (рис. 4).

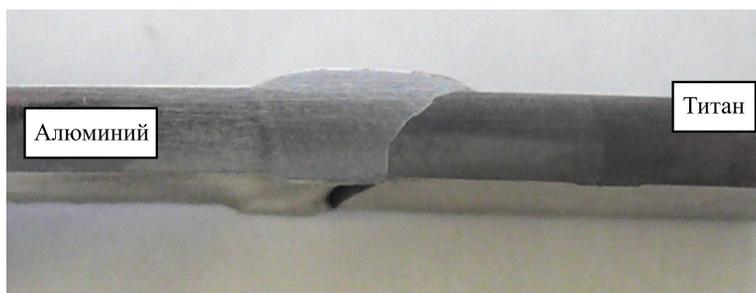


Рис. 4. Сварное соединение Al с Ti

На макрошлифе сварного соединения видна четкая граница между алюминием и титаном, трещин по всей длине соединения не наблюдается, перемешивание металлов не выявляется, пористость отсутствует (рис. 5). При увеличении в 500 раз на границе алюминий – титан наблюдается тонкая светлая полоса (рис. 6). Скорее всего, это зона частичного подплавления поверхности титана с возможным образованием интерметаллидов.



Рис. 5. Макроструктура сварного соединения Al – Ti ( $\times 130$ )

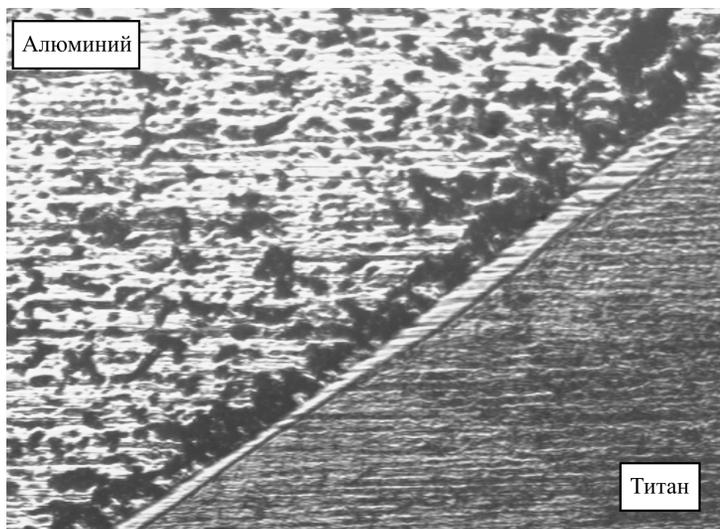


Рис. 6. Микроструктура сварного соединения Al – Ti ( $\times 500$ )

### **Плазменная сварка алюминия с нержавеющей сталью**

Сваривались алюминиевый сплав Д16 и нержавеющая сталь 08Х18Н10Т. Предварительно проводилась очистка образцов и разделка стальной кромки под углом  $45^\circ$  [2]. Сжатая дуга была примерно ориентирована в центр шва, после плавления алюминия и катодной очистки стальной кромки подавалась присадочная проволока АК5. Смачивание нержавеющей стали алюминием хорошее.

На макрошлифе видно, что трещин по всей длине соединения не наблюдается, перемешивания металлов нет, внутренние дефекты отсутствуют (рис. 7).



Рис. 7. Макроструктура сварного соединения ( $\times 130$ )

Из анализа микроструктуры видно, что глубина взаимопроникновения металлов минимальна, со стороны алюминия наблюдается темный участок, объясняемый выделением вторичной фазы при нагреве (рис. 8).

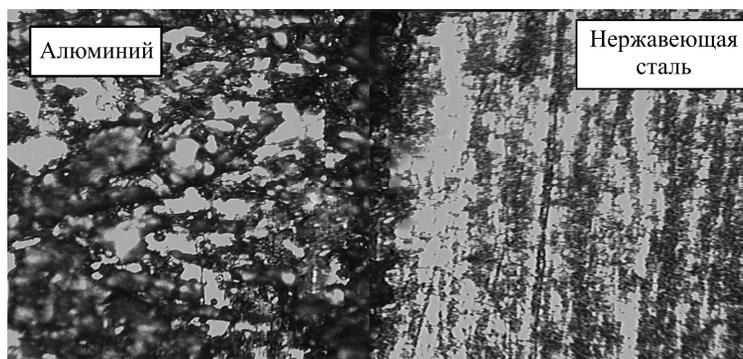


Рис. 8. Микроструктура сварного соединения  
Al – нержавеющая сталь ( $\times 500$ )

### Плазменная сварка меди с титаном

Сваривались медь М1 и титановый сплав ОТ4. Проводилась разделка кромок обоих материалов под углом  $45^\circ$  и механическая очистка [9, 10].

Сжатая дуга была смещена в сторону меди на 3 мм. После начала плавления меди и катодной очистки поверхности титана подавалась присадочная проволока.

Макроструктура сварного соединения показывает, что трещин по всей длине контакта не наблюдается, дефекты отсутствуют, перемешивания металла не наблюдается (рис. 9).

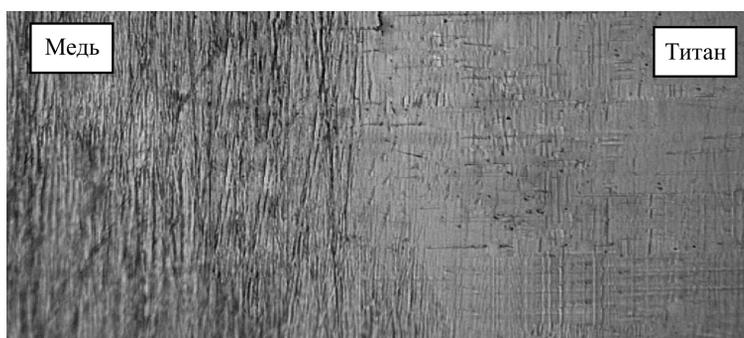


Рис. 9. Макроструктура сварного соединения Cu – Ti ( $\times 130$ )

При большом увеличении видна четкая граница между соединяемыми металлами (рис. 10). В обоих металлах вблизи границы наблюдается ориентированная структура с вытянутыми зернами.



Рис. 10. Микроструктура сварного соединения Cu – Ti ( $\times 500$ )

### **Плазменная сварка меди с нержавеющей сталью**

Сваривалась медь М1 и нержавеющая сталь 08Х18Р10Т, использовалась медная присадочная проволока. Сварка этих материалов сопровождалась наименьшими трудностями. Медь и никель обладают неограниченной взаимной растворимостью, что обеспечивает качественное соединение (рис. 11, 12).

На микроструктуре видно выделение карбидов в образце из нержавеющей стали и мелкозернистую структуру наплавленной меди (см. рис. 12).



Рис. 11. Макроструктура сварного соединения  
Cu – нержавеющая сталь (×130)

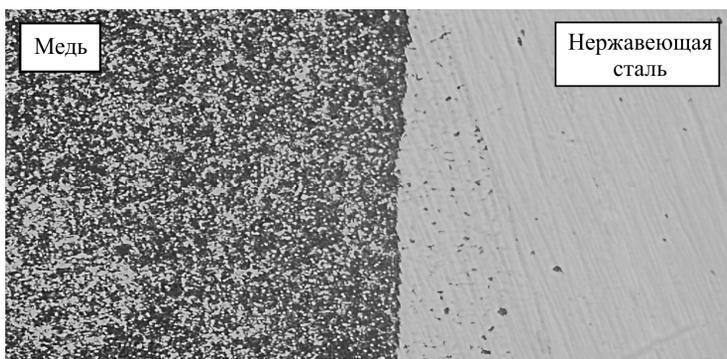


Рис. 12. Микроструктура сварного соединения  
Cu – нержавеющая сталь (×500)

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Установлена возможность использования сжатой дуги обратной полярности для сварки разнородных металлов: алюминий – медь, алю-

миний – титан, алюминий – нержавеющая сталь, медь – титан, медь – нержавеющая сталь.

2. Сварка выполнялась без плавления более тугоплавкого металла с использованием в качестве присадочного материала проволоки из металла, имеющего более низкую температуру плавления.

3. На всех металлах с более высокой температурой плавления обеспечивается хорошее смачивание жидким металлом всей поверхности, очищенной катодным распылением.

4. Для всех пар металлов получены сварные швы без внутренних дефектов с минимальным перемешиванием свариваемых металлов.

### **Список литературы**

1. Славянов Н.Г. Труды и изобретения. – Пермь: Кн. изд-во, 1988. – 296 с.

2. Свариваемость материалов / под ред. Э.Л. Макарова. – М., 1991. – 527 с.

3. Петров Г.Л. Сварка разнородных металлов. – М.; Л.: Машгиз, 1963. – 248 с.

4. Приэлектродные процессы и эрозия электродов плазмотронов: сб. ст. – Новосибирск: Наука, 1977. – 122 с.

5. Щицын Ю.Д., Косолапов О.А., Щицын В.Ю. Возможности плазменной обработки металлов током обратной полярности // Сварка и диагностика. – 2009. – № 2. – С. 42–45.

6. Щицын Ю.Д., Тыткин Ю.М. Исследование способа катодной очистки для подготовки деталей под пайку // Сварка в машиностроении: сб. науч. тр. – М.: Знание, 1995. – С. 95–99.

7. Абрамович В.Р., Демянцевич В.П., Ефимов Л.А. Сварка плавлением меди и сплавов на их основе. – Л.: Машиностроение, 1988. – 215 с.

8. Сварка разнородных металлов и сплавов / В.Р. Рябов, Д.М. Рабкин, Р.С. Курочко, Л.Г. Стрижевская. – М.: Машиностроение, 1984. – 239 с.

9. Плазменная наплавка металлов / А.Е. Вайнерман, М.Х. Шоршоров, В.Д. Веселков, В.С. Новосадов. – М.: Машиностроение, 1969. – 192 с.

10. Сидоров В.П. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой. – М.: Машиностроение, 1980. – 190 с.

## References

1. Slavianov N.G. Trudy i izobreneniia [Works and inventions]. Perm': Knizhnoe izdatel'stvo, 1988. 296 p.
2. Makarova E.L. Svarivaemost' materialov [Weldability of materials]. Moscow, 1991. 527 p.
3. Petrov G.L. Svarka raznorodnykh metallov [Welding of dissimilar metals]. Moscow, Leningrad: Mashgiz, 1963. 248 p.
4. Prielektrodnye protsessy i eroziia elektrodov plazmotronov [Near-electrode processes and the erosion of the electrodes of plasma torches]. Novosibirsk: Nauka, 1977. 122 p.
5. Shchitsyn Iu.D., Kosolapov O.A., Shchitsyn V.Iu. Vozmozhnosti plazmennoi obrabotki metallov tokom obratnoi poliarnosti [Features plasma processing of metals current reverse polarity]. *Svarka i Diagnostika*, 2009, no. 2, pp. 42-45.
6. Shchitsyn Iu.D., Tytkin Iu.M. Issledovanie sposoba katodnoi ochistki dlia podgotovki detalei pod paiku [Research cathodic cleaning method for the preparation of details for soldering]. *Sbornik nauchnykh trudov "Svarka v mashinostroenii"*. Moscow: Znanie, 1995, pp. 95-99.
7. Abramovich V.R., Demiantsevich V.P., Efimov L.A. Svarka plavlaniem medi i splavov na ikh osnove [Fusion welding of copper and their alloys]. Leningrad: Mashinostroenie, 1988. 215 p.
8. Riabov V.R., Rabkin D.M., Kurochko R.S., Strizhevskaiia L.G. Svarka raznorodnykh metallov i splavov [Welding dissimilar metals and alloys]. Moscow: Mashinostroenie, 1984. 239 p.
9. Vainerman A.E., Shorshorov M.X., Veselkov V.D., Novosadov B.C. Plazmennaiia naplavka metallov [Plasma welding of metals]. Moscow: Mashinostroenie, 1969. 192 p.
10. Sidorov V.P. Vosstanovlenie detalei mashin napyleniem i naplavkoi [Restoration of machine parts spraying and welding]. Moscow: Mashinostroenie, 1980. 190 p.

Получено 28.10.2015

## Об авторах

**Щицын Юрий Дмитриевич** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского националь-

ного исследовательского политехнического университета; e-mail: svarka@pstu.ru.

**Кожанов Антон Владимирович** – заместитель генерального директора по производству ООО «Производственная компания “Теплов и Сухов”»; e-mail: kozhanov@teplov.ru.

**Белинин Дмитрий Сергеевич** (Пермь, Россия) – научный сотрудник кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: 5ly87@mail.ru.

**Неулыбин Сергей Дмитриевич** (Пермь, Россия) – лаборант-исследователь кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: sn-1991@mail.ru.

#### **About the authors**

**Iurii D. Shchitsyn** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department “Welding Production and Structural Materials Technology”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: svarka@pstu.ru.

**Anton V. Kozhanov** (Perm, Russian Federation) – Deputy Director of Production, Ltd. «Production company “Teplov and Sukhov”»; e-mail: kozhanov@teplov.ru.

**Dmitrii S. Belinin** (Perm, Russian Federation) – Researcher, Department “Welding Production and Structural Materials Technology”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: 5ly87@mail.ru.

**Sergei D. Neulybin** (Perm, Russian Federation) – Researcher Laboratory, Department “Welding Production and Structural Materials Technology”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: sn-1991@mail.ru.