

УДК 621.791

Е.Б. Вотинова, М.П. Шалимов

Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДУГОВОЙ СВАРКИ ПОРШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ

Приводится физическая и математическая модель процесса дуговой сварки порошковой проволокой. Рассматриваются парциальные коэффициенты перехода относительно сварки порошковой проволокой, методика их оценки, а также взаимосвязь парциальных и усредненного коэффициентов перехода при расчете наплавленного металла.

При сварке порошковой проволокой состав наплавленного металла и его сварочно-технологические свойства зависят от условий плавления ленты и шихты и взаимодействия образовавшихся фаз друг с другом и газом. Состав наплавленного металла может быть определен, если известны общие, усредненные коэффициенты перехода элементов. Последние находят чаще всего экспериментально для конкретных условий сварки, что не позволяет гарантировать точность прогноза при изменившихся условиях. В связи с этим была поставлена задача разработки методики определения парциальных коэффициентов перехода элементов, т.е. коэффициентов перехода на каждой стадии нагрева и плавления, и их зависимости от параметров режима сварки.

Общий коэффициент перехода элемента показывает, какая доля элемента теряется в процессе сварки. Анализ процессов, протекающих при нагреве и плавлении порошковой проволоки, позволил найти взаимосвязь общего (усредненного) коэффициента перехода с парциальными коэффициентами, выраженную количественно. Приведены уравнения, которые позволяют на основе экспериментальных и справочных данных найти парциальные коэффициенты перехода элементов.

Ключевые слова: дуговая сварка порошковой проволокой, моделирование процесса сварки, коэффициент перехода элемента, расчет состава металла шва, порошковая проволока.

E.B. Votnova, M.P. Shalimov

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Ekaterinburg, Russian Federation

SIMULATION OF THE PROCESS OF ARC WELDING BY THE POWDER WIRE

In the work the physical and mathematical models of the process of arc welding by powder wire are given. Are examined partial conversion factors relative to welding by powder wire, the procedure of their estimation, and also the interrelation of partial and averaged of conversion factors with the calculation of weld metal.

With the welding by the powder wire the composition of weld metal and its technological welding properties depend on the conditions tape and the charge and interaction of the formed phases with each other and gas. The composition of weld metal can be determined, if the general, average conversion factors of elements are known. The latter find most frequently experimentally for the specific conditions for welding, that does not make it possible to guarantee the correctness of forecast with the changed conditions. In connection with this, was set the task of developing the procedure of the determination of the partial conversion factors of elements, i.e., conversion factors at each stage of heating and melting, and their dependence on the parameters of welding conditions.

It shows the common conversion factor of element, what share of element is lost in the process to welding. The analysis of the processes, which take place during heating and melting the powder wire, made it possible to find the interrelation of general (average) conversion factor with the partial coefficients, expressed quantitatively. Are given the equations, which will allowed on the basis of experimental and reference data to find the partial conversion factors of elements.

Keywords: arc welding by the powder wire, the simulation of the welding process, the conversion factor of the element, the calculation of the composition of weld material, powder wire.

Основным этапом разработки технологии сварки является расчет состава металла шва или наплавленного металла. Он, в свою очередь, определяется составом шихты и ленты порошковой проволоки.

Для разработки рационального состава шихты порошковой проволоки необходимо знание процессов, протекающих в дуговом промежутке и при формировании сварного шва. Экспериментальное их изучение и теоретическое описание позволят установить полноту перехода элементов из электродного стержня и покрытия, а также оценить доли участия основного и присадочного металлов в сварном соединении. Чаще всего такие исследования проводятся для определения усредненных коэффициентов перехода элементов ($\bar{\eta}_i$) для конкретных условий сварки. Такой подход не позволяет использовать полученные значения $\bar{\eta}_i$ для анализа процессов при изменившихся параметрах режима. В связи с этим необходимо разработать физическую и математическую модель процесса сварки, учитывающие особенности перехода элементов из порошковой проволоки в наплавленный металл.

Физическая модель процесса сварки порошковой проволокой. Физическая модель – установка, устройство или приспособление, воспроизводящее в том или ином масштабе натуральный объект при сохранении физического (динамического) подобия процессов в модели и натуре. При физическом моделировании реальному объекту ставится в соответствие его увеличенный или уменьшенный материальный аналог, допускающий исследование, как правило, в лабораторных услови-

ях, и последующее перенесение свойств изучаемых процессов и явлений с модели на объект на основе теории подобия [1].

Процесс сварки является достаточно сложным для изучения. Высокая температура металла, скорость протекания реакций и самого процесса, зависимость конечного результата (состав, качество металла шва) от многих факторов не позволяют изучать данный процесс непосредственно на объекте. Требуется применение модели.

Схему процесса сварки порошковой проволокой можно представить следующим образом [2, 3]. Электрическая дуга возбуждается между оболочкой порошковой проволоки и основным металлом. За счет тепла, выделяемого в дуге, плавится оболочка и сердечник проволоки. Процесс плавления порошковой проволоки разделяется на три стадии, различающиеся по температурным, геометрическим, гидродинамическим и физико-химическим характеристикам. Первая стадия – это нагрев и плавление проволоки. Она в свою очередь подразделяется на нагрев проволоки до плавления и плавление. Во время нагрева происходят такие процессы, как диссоциация различных соединений, испарение воды, окисление ферросплавов и взаимодействие шихтовых материалов в твердом состоянии. На подстадии плавления образуются три вида капель: капли металла, капли шлака и капли металла, покрытые шлаком. Вторая стадия – это перенос капель в ванну (стадия капли), и третья – стадия ванны. В этот период происходит множество разнообразных взаимодействий: капель металла и капель шлака с газовой фазой и между собой, ферросплавов со шлаком.

Расплавившийся металл оболочки и сердечника образует на торце проволоки капли, которые растут и переносятся в сварочную ванну. При расплавлении минералов, руд и химикатов, входящих в состав сердечника, образуется шлак, покрывающий тонким слоем капли и сварочную ванну. При разложении карбонатов и органических материалов сердечника выделяются газы, которые защищают расплавленный металл от воздуха. Проволока по мере оплавления автоматически подается в зону сварки [4]. При удалении дуги жидкий металл сварочной ванны кристаллизуется, образуя сварной шов, покрытый слоем затвердевшего шлака (рисунки).

Результаты исследования процессов, протекающих в смесях порошков при нагревании, позволяют заключить следующее. Введение в смесь металлических порошков смещает температурный диапазон

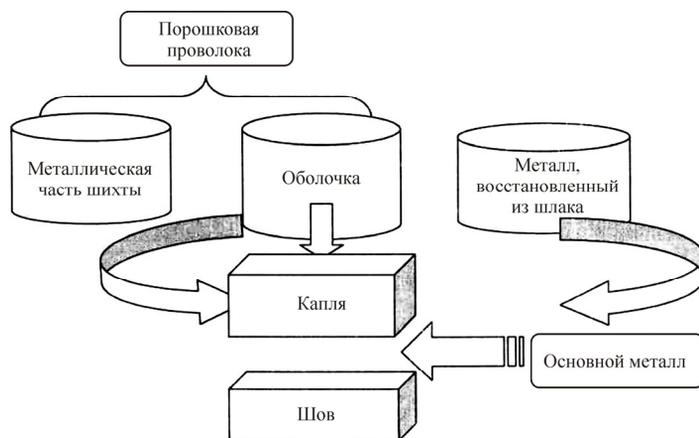


Рис. Физическая модель формирования металла шва

диссоциации карбонатов в область более низких температур. Диссоциация карбоната способствует интенсификации окисления железного порошка и ферросплавов. Использование смесей карбонатов способствует более равномерному выделению углекислого газа в широком диапазоне температур при диссоциации карбонатов, чем введение отдельных карбонатов. Приближение состава шлакообразующей части сердечника к составу эвтектических смесей способствует быстрому образованию расплава. Шлакообразованию предшествуют и сопровождают его реакции образования комплексных соединений [5].

Математическая модель процесса сварки порошковой проволокой. Современные тенденции развития науки и техники характеризуются разработкой, внедрением и широким использованием различных моделей, создаваемых как на базе традиционного экспериментального подхода, так и с применением новейших информационных технологий [1].

На сегодняшний день применяются такие подходы к оценке состава металла шва, как расчет по смешению, расчет с учетом коэффициентов перехода, регрессионные уравнения, термодинамические или кинетические расчеты.

С методологической точки зрения можно выделить два основных подхода к математическому моделированию сложных систем: метод «черного ящика» и аналитический метод [6–8]. Метод «черного ящика» применяется в том случае, когда внутреннее строение системы неизвестно или не интересует исследователя. Структура объекта исследу-

дования исключается из рассмотрения, если его состояние характеризуется лишь входными, выходными параметрами и возмущающими воздействиями, а сведения о внутренней структуре объекта отсутствуют. Математическая модель строится путем установления соотношения между входными и выходными параметрами с исследованием реакции объекта на внешние воздействия. При этом широко применяются методы планирования эксперимента, дисперсионного, регрессионного и корреляционного анализа. К основным достоинствам метода «черного ящика» можно отнести его простоту, разработанность математического аппарата, гарантированность результата моделирования. Недостатки его связаны в основном с малой информативностью получаемых моделей и невозможностью оценки истинных причин явлений, протекающих в изучаемой системе [1].

При аналитическом подходе модель строится на основе изучения внутренней структуры явлений, протекающих в системе. В этом случае входные и выходные параметры модели связываются друг с другом путем применения фундаментальных физических и физико-химических закономерностей, учитывающих внутреннюю структуру объекта моделирования. Получаемое математическое описание процесса имеет высокую информативность, широкую область применения, универсальность. Применение такой модели позволяет понять ход протекания процесса, легко стыкуется с процедурами оптимизации. Аналитический подход значительно сокращает объем экспериментов, повышает эффективность моделирования [1].

К моделям, использующим метод «черного ящика», можно отнести модели на основе расчета металла шва по смещению, с учетом коэффициентов перехода, регрессионных уравнений. Аналитический метод применяют в моделях, основанных на термодинамическом и кинетическом анализе.

Расчет состава шва по смещению удобен для предварительной оценки, однако дает приблизительный результат.

Модель, основанная только на регрессионных уравнениях, дающих зависимость коэффициентов перехода от одного-двух параметров, является узкоприменимой [9, 10]. По мнению многих авторов, говорить о равновесии при сварке неправомерно, так как оно заведомо не достигается [11], определение скоростей плавления, времени взаимодействия и межфазных площадей крайне затруднено [12, 13]. По-

добная неопределенность не позволяет вести термодинамические и кинетические расчеты с достаточной точностью и, как следствие, обеспечить получение устойчивых результатов.

На основании предложенной физической модели составим математическую модель процесса сварки порошковой проволокой, основанную на полном материальном балансе в каждой из фаз.

В работе [14] были выведены уравнения, описывающие зависимость массы компонента i в наплавленном металле и оксида компонента $I_n O_m$ в шлаке, образованном при плавлении порошковой проволоки, а также описана методика определения усредненного коэффициента перехода $\bar{\eta}_i$.

Нагрев и плавление порошковой проволоки сопровождается различными физико-химическими процессами, которые могут быть учтены введением парциальных коэффициентов перехода:

– $K_1^{\text{Э}i}$ – доля массы компонента i металлической части шихты, окисляемой газом;

– $K_2^{\text{Э}i}$ – доля массы компонента i металла ленты (оболочки), окисляемой газом;

– $K_3^{\text{Э}i}$ – доля массы оксида компонента i неметаллической части шихты, переходящей в металл в результате реакций восстановления на стадии капли [14].

Введем уравнения, связывающие величины $K_1^{\text{Э}i}$, $K_2^{\text{Э}i}$ и $K_3^{\text{Э}i}$ с парциальными коэффициентами перехода $\eta_{\text{Э}i}$:

$$1 - K_1^{\text{Э}i} = \eta_{\text{Э}i}^{\text{ф}},$$

$$1 - K_2^{\text{Э}i} = \eta_{\text{Э}i}^{\text{л}},$$

$$K_3^{\text{Э}i} = \eta_{\text{Э}i}^{\text{ш}},$$

где $\eta_{\text{Э}i}^{\text{л}}$, $\eta_{\text{Э}i}^{\text{ф}}$, $\eta_{\text{Э}i}^{\text{ш}}$ – парциальные коэффициенты перехода элемента Э $_i$ в наплавленный металл из ленты, ферросплавов и шлака соответственно.

В связи с этим можно предположить, что общий (усредненный) коэффициент перехода имеет следующую взаимосвязь с парциальными коэффициентами:

$$\eta_{\text{Э}_i} = a\eta_{\text{Э}_i}^{\text{ст}} + b\eta_{\text{Э}_i}^{\text{ф}} + c\eta_{\text{Э}_i}^{\text{ш}} = a(1 - K_1^{\text{Э}_i}) + b(1 - K_2^{\text{Э}_i}) + cK_3^{\text{Э}_i},$$

где a, b, c – доли участия электродного стержня, ферросплавов и восстановленного из шлака металла в наплавленном металле; $\eta_{\text{Э}_i}$ – общий усредненный коэффициент перехода элемента Э_i .

Кроме того, процесс сварки порошковой проволокой сопровождается испарением компонентов и разбрызгиванием, учтем их через введение коэффициента потерь $K_{\text{пот}}$.

С учетом изложенного определение парциальных коэффициентов перехода заключается в решении системы уравнений с тремя неизвестными:

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_{\text{Э}_i} = a\eta_{\text{Э}_i}^{\text{ст}} + b\eta_{\text{Э}_i}^{\text{ф}} + c\eta_{\text{Э}_i}^{\text{ш}} = a(1 - K_1^{\text{Э}_i}) + b(1 - K_2^{\text{Э}_i}) + cK_3^{\text{Э}_i}, \\ m_{\text{Э}_i} = m_{\text{пр}}(1 - K_{\text{пот}}) \times \\ \times \left\{ (1 - K_{\text{зап}}) \frac{[\text{Э}_i]_{\text{л}}}{100} (1 - K_2^{\text{Э}_i}) + \right. \\ \left. + K_{\text{зап}} \left(\sum_{k=1}^k \frac{\% \text{фер}_k}{100} \frac{[\text{Э}_i]_{\text{к}}}{100} (1 - K_1^{\text{Э}_i}) + \sum_{j=1}^j \frac{\% j (\text{Э}_{\text{in}} O_m)_j}{100} \right) \frac{M_{\text{Э}_i}}{M_{\text{Э}_{\text{in}} O_m}} K_3^{\text{Э}_i} \right\} \\ m_{\text{Э}_{\text{in}} O_m} = \frac{m_{\text{пр}}(1 - K_{\text{пот}})}{1 - K_{\text{зап}}} \times \\ \times \left\{ \frac{[\text{Э}_i]_{\text{л}}}{100} \frac{M_{\text{Э}_{\text{in}} O_m}}{M_{\text{Э}_i}} K_2^{\text{Э}_i} + K_{\text{зап}} \left(\sum_{k=1}^k \frac{\% \text{фер}_k}{100} \frac{[\text{Э}_i]_{\text{к}}}{100} \frac{M_{\text{Э}_{\text{in}} O_m}}{M_{\text{Э}_i}} K_1^{\text{Э}_i} + \right. \right. \\ \left. \left. + \left(\sum_{j=1}^j \frac{\% j (\text{Э}_{\text{in}} O_m)_j}{100} \right) (1 - K_3^{\text{Э}_i}) \right\}, \end{array} \right.$$

где $m_{\text{Э}_i}$ – масса элемента Э_i в данном объеме металла, кг; $m_{\text{пр}}$ – масса порошковой проволоки, кг; $K_{\text{зап}}$ – коэффициент заполнения; $[\text{Э}_i]_{\text{ст}}$ – концентрация компонента Э_i в ленте порошковой проволоки, мас. %; $\% \text{фер}_k$ – концентрация ферросплава k в шихте порошковой проволоки, мас. %; $[\text{Э}_i]_{\text{к}}$ – концентрация компонента Э_i в ферросплаве k , мас. %; $\% j$ – концентрация минерала j в шихте порошковой проволоки, мас. %;

($\mathcal{E}_{in}O_m$) – концентрация оксида $\mathcal{E}_{in}O_m$ в минерале j , мас. %; $M_{\mathcal{E}_i}$ – атомная масса элемента \mathcal{E}_i , кг/моль; $M_{\mathcal{E}_{in}O_m}$ – молекулярная масса оксида $\mathcal{E}_{in}O_m$, кг/моль; $m_{\mathcal{E}_{in}O_m}$ – масса оксида $\mathcal{E}_{in}O_m$ в шлаке, кг.

Таким образом, разработанная методика позволяет оценивать парциальные коэффициенты перехода элементов в зависимости от параметров режима. Это позволит с достаточной точностью рассчитывать состав наплавленного металла, а также проводить корректировку состава шихты порошковой проволоки в зависимости от технологических потребностей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, контракт № Н979.42Б.002/14 «Исследование физических и химических процессов в зоне сварки для создания научных основ оптимизации технологий и разработки материалов».

Список литературы

1. Моделирование структуры, свойств и процессов межфазного взаимодействия в системе металл – оксидный расплав – газ / В.Н. Бороненков [и др.]; под ред. академика Л.И. Леонтьева; УрО РАН, Ин-т металлургии. – Екатеринбург, 2010. – 452 с.
2. Шалимов М.П., Панов В.И. Сварка вчера, сегодня, завтра... (Введение в специальность): учеб. пособие / УГТУ–УПИ. – Екатеринбург, 2006. – 227 с.
3. Шлепаков В.Н., Супрун С.А., Котельчук А.С. Кинетика газообразования при сварке порошковой проволокой // Информ. материалы СЭВ. – Киев, 1986. – № 1. – С. 19–28.
4. Взаимодействие компонентов электродных покрытий с жидким стеклом при нагревании / А.И. Николаев [и др.] // Сварочное производство. – 2009. – № 11. – С. 13–17.
5. Металлургия дуговой сварки. Процессы в дуге и плавление электродов / под ред. И.К. Походни. – Киев: Наукова думка, 1990. – 223 с.
6. Введение в системный анализ теплофизических процессов металлургии / Н.А. Спирин [и др.]. – Екатеринбург, 1999. – 205 с.

7. Galenko P.K., Zhuravlev V.A. Physics of Dendrites: Computational Experiments. – Singapore, 1994. – 192 p.

8. Анищенко Л.М., Лавренюк С.Ю. Математические основы проектирования высокотемпературных технологических процессов. – М., 1986. – 80 с.

9. Прогнозирование химического состава металла, наплавленно-го электродами с рутиловым и ильменитовым покрытиями / И.К. Походня [и др.] // Автоматическая сварка. – 1976. – № 7. – С. 1–4.

10. Килина Е.М. Расчет условных коэффициентов перехода элементов из сварочной проволоки в наплавленный металл при сварке в углекислом газе // Сварка и контроль-2004: матер. Всерос. науч.-техн. конф. с международным участием, посвященной 150-летию со дня рождения Н.Г. Славянова: в 3 т. Т. 3. Сварочные материалы. – Пермь, 2004. – С. 263–265.

11. Буки А.А. Математическая модель процесса окисления легирующих присадок при автоматической сварке в газах // Сварочное производство. – 1975. – № 10. – С. 7–11.

12. Ерохин А.А. Кинетика металлургических процессов дуговой сварки. – М.: Машиностроение, 1964. – 256 с.

13. Черных А.В., Черных В.В. Расчет температуры электродных капель при дуговой сварке плавящимся электродом с помощью метода конечных элементов // Сварочное производство. – 2008. – № 3. – С. 6–7.

14. Вотина Е.Б., Шалимов М.П. Разработка методики расчета состава металла шва при сварке покрытыми электродами или порошковой проволокой // Сварка и диагностика. – 2011. – № 5. – С. 31–35.

References

1. Boronenkov V.N., Zinigrad M.I., Leont'ev L.I., Pastuhov Je.A., Shalimov M.P., Shanchurov S.M. Modelirovanie struktury, svojstv i processov mezhfaznogo vzaimodejstvija v sisteme metall – oksidnyj rasplav – gaz [Modeling of structure, properties and processes of interphase interaction in the metal – oxide melt – gas]. Ekaterinburg: Ural'skoe otdelenie Rossiiskoi akademii nauk, 2010. 452 p.

2. Shalimov M.P., Panov V. I. Svarka vchera, segodnja, zavtra... (Vvedenie v special'nost') [Welding yesterday, today, tomorrow... (introduction to the profession): proc. the manual]. Ekaterinburg: Ural'skii gosu-

darstvennyi tekhnicheskii universitet-ural'skii politekhnicheskii institut, 2006. 227 p.

3. Shlepakov V.N., Suprun S.A., Kotel'chuk A.S. Kinetika gazoobra-zovaniya pri svarke poroshkovej provolokoj [Kinetics of gas formation when welding with flux-cored wire]. *Informatsionnye materialy SJeV*. Kiev, 1986, no. 1, pp. 19-28.

4. Nikolaev A.I., Pecheniuk S.I., Semushina Iu.P., Semushin V.V., Kuz'mich L.F., Rogachev D.L., Mikhailova N.L., Brusnitsyn Iu.D., Rybin V.V. Vzaimodeistvie komponentov elektrodnykh pokrytii s zhidkim steklom pri nagrevanii [The interaction of components of electrode coatings with molten glass when heated]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2009, no. 11, pp. 13-17.

5. Pokhodnia I.K. Metallurgiiia dugovoi svarki. Protsessy v duge i plavlenie elektrodov [The interaction of components of electrode coatings with molten glass when heated]. Kiev: Naukova dumka, 1990. 223 p.

6. Spirin N.A. Vvedenie v sistemnyj analiz teplofizicheskikh processov metallurgii [Introduction to system analysis of thermal processes in metallurgy]. Ekaterinburg, 1999. 205 p.

7. Galenko P.K., Zhuravlev V.A. Physics of Dendrites: Computational Experiments. *Singapore*, 1994. 192 p.

8. Anishhenko L.M., Lavrenjuk S.Ju. Matematicheskie osnovy proektirovaniya vysokotemperaturnykh tehnologicheskikh processov [The mathematical basis for the design of high-temperature technological processes]. Moscow: Nauka, 1986. 80 p.

9. Pohodnja I.K., Koljada G.E., Javdoshhin I.R., Kasatkin O.G., Demchenko L.I. Prognozirovanie himicheskogo sostava metalla, naplavlennogo jelektrodami s rutilovym i il'menitovym pokrytijami [Prediction of the chemical composition of the metal deposited by electrodes with rutile and ilmenite coatings]. *Avtomaticheskaja svarka*, 1976, no.7, pp. 1-4.

10. Kilina E.M. Raschet uslovnnykh kojefficientov perehoda jelementov iz svarочноj provoloki v naplavlennyj metall pri svarke v uglekislom gaze [The calculation of the conditional transition rates of the items of the welding wire in the weld metal when welding in carbon dioxide]. *Svarka i kontrol'-2004: materialy Vserossiiskoi s mezhdunarodnym uchastiem nauch.-tekh. konf., posviashchennoi 150-letiiu so dnia rozhdeniia Slavianova N.G.: v 3 t. T. 3. Svarochnye materialy. – Perm'*, 2004, pp. 263-265.

11. Buki A.A. Matematicheskaja model' processa okislenija legirujushhih prisadok pri avtomaticheskoi svarke v gazah [Mathematical model

of the process of oxidation of the alloying additives in automatic welding in gases]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1975, no. 10, pp. 7-11.

12. Erohin A.A. Kinetika metallurgicheskikh processov dugovoj svarki [Kinetics of metallurgical processes arc welding]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1964. 256 p.

13. Chernyh A.V., Chernyh V.V. Raschet temperatury jelektrodnykh kapel' pri dugovoj svarke plavjashhimsja jelektrodom s pomoshh'ju metoda konechnykh jelementov [Calculation of the temperature of the electrode droplets in arc welding consumable electrode by using the finite element method]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2008, no. 3, pp. 6-7.

14. Votnova E.B., Shalimov M.P. Razrabotka metodiki rascheta sostava metalla shva pri svarke pokrytymi elektrodami ili poroshkovoi provolokoi [Development of a method to calculate the composition of the weld metal when welding with coated electrodes or flux-cored wire]. *Svarka i diagnostika*, 2011, no. 5, pp. 31-35.

Получено 06.05.2015

Вотинова Екатерина Борисовна (Екатеринбург, Россия) – старший преподаватель кафедры «Технология сварочного производства» Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: votinovacat@rambler.ru.

Шалимов Михаил Петрович (Екатеринбург, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология сварочного производства» Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: m.p.shalimov@urfu.ru.

Votnova Ekaterina (Ekaterinburg, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department “Welding Technology”, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; e-mail: votinovacat@rambler.ru.

Shalimov Mikhail (Ekaterinburg, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department “Welding technology”, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; e-mail: m.p.shalimov@urfu.ru.