

**Материаловедение
и технологии материалов
Materials science and materials technology**

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК: 621.791.012.5: 621.791.754

doi: 10.30987/2782-5957-2026-4-82-94

**ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗРАБОТАННЫХ АКТИВИРУЮЩИХ
ФЛЮСОВ НА ИОНИЗАЦИЮ СВАРОЧНОЙ ДУГИ И ГЛУБИНУ
ПРОПЛАВЛЕНИЯ СТАЛИ 09Г2С ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ
ТЕХНОЛОГИИ А-TIG**

**Александр Леонидович Украинцев^{1✉}, Александр Александрович Терещенко²,
Константин Васильевич Макаренко³**

^{1,3} Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

² Аттестационный центр по сварочному производству, экспертизе и диагностике, Брянск, Россия

¹ alex.ukraintsev2015@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-1923-9386>

² kinrol@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0008-7165-1456>

³ makkon1@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7195-0500>

Аннотация

В статье представлены результаты разработки и изучения составов активирующих флюс-паст на основе традиционных оксидных элементов для аргонодуговой сварки (А-TIG). Основное внимание уделено влиянию состава флюса на ионизацию дуги и отношение глубины проплавления к ширине шва. Проведены эксперименты с различными составами флюс-паст, содержащими плавиковый шпат (CaF₂) и сварочный флюс АН-60, при этом соотношение компонентов в составе паст варьировали. В ходе экспериментов наплавку проводили на стальные пластины толщиной 10 мм, марка стали – 09Г2С. Наибольшая глубина проплавления достигнута составами № 1 и № 2, где глубина проплавления составляла 6,5 мм и 7 мм соответственно. Установлено, что оптимальное содержание плавикового шпата в составе пасты не должно превышать 25 %, что позволяет достичь максимальной глубины проплавления. Определены главные ионизаторы сварочной дуги: Si, Ca, Mg и Mn, содержание которых можно повышать или изменять для оптимизации составов паст. На основании результатов исследования было установлено, что разработанные активирующие флюсы могут быть использованы для оптимизации процессов аргонодуговой сварки толстостенных конструкций, а также для обеспечения поверхностного упрочнения сталей взамен традиционных способов ХТО.

Цель исследования: разработка и экспериментальные исследования комплексных активирующих флюсов, созданных на базе широко распространенных, не дефицитных компонентов, для повышения глубины проплавления при сварке тол-

столистых конструкций стыковыми и нахлесточными соединениями.

Задачи исследования: изучение влияния разработанных активирующих флюсов на ионизацию сварочной дуги и глубину проплавления стали 09Г2С при выполнении поверхностной наплавки аргонодуговым способом.

Методы исследования. Подготовка исходных компонентов и на их основе активирующих флюс-паст; наплавка аргонодуговым способом на поверхности стальных образцов; подготовка образцов, измерение ширины шва и глубины проплавления металлографическим методом; расчеты степени ионизации компонентов флюс-паст и оценка их влияния на дугу в процессе наплавки.

Новизна работы. Применение разработанных составов активирующих флюс-паст для аргонодуговой наплавки/сварки (А-TIG) толстостенных сталей. Увеличение глубины проплавления и сужение ширины шва при активной ионизации дуги. Применение составов активирующих флюсов как базовый компонент флюс-паст для поверхностного упрочнения сталей.

Результаты исследования. Активирующие флюс-пасты составов № 1 и № 2 показали наилучшие результаты проплавления, при их использовании была достигнута наибольшая глубина проплавления 6,5...7 мм, что в 1,5...1,8 раз выше, чем без применения активирующих флюсов. При изучении составов флюсов было определено оптимальное содержание компонентов, где CaF₂ суммарно не должно превышать 25 %. Дефекты в макроструктуре при наплавке не обнаружены.

Вывод: Составы активирующих флюс-паст № 1 и № 2 для аргонодугового способа наплавки/сварки (А-TIG) обеспечивают увеличение глубины проплавления стальных образцов, рекомендованы для дальнейшего применения в составах

флюс-паст для поверхностного упрочнения сталей и дальнейшей модификации химического состава.

Ключевые слова: флюс, глубина, проплавление, сталь, наплавка, паста, плавиковый шпат, макроструктура.

Ссылка для цитирования:

Украинцев А.Л. Изучение влияния разработанных активирующих флюсов на ионизацию сварочной дуги и глубину проплавления стали 09Г2С при использовании технологии А-TIG / А.Л. Украинцев, А.А. Терещенко, К.В. Макаренко // Транспортное машиностроение. – 2026. - № 4. – С. 82-94. doi: 10.30987/2782-5957-2026-4-82-94.

Original article
Open Access Article

STUDYING THE INFLUENCE OF THE DEVELOPED ACTIVATING FLUXES ON WELDING ARC IONIZATION AND DEPTH PENETRATION OF 09G2S STEEL BY USING A-TIG TECHNOLOGY

Aleksandr Leonidovich Ukraintsev^{1✉}, Aleksandr Aleksandrovich Tereshchenko², Konstantin Vasilyevich Makarenko³

^{1,3} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

² Certification Center for Welding, Expertise and Diagnostics, Bryansk, Russia

¹ alex.ukraintsev2015@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-1923-9386>

² kinrol@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0008-7165-1456>

³ makkon1@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7195-0500>

Abstract

The paper presents the results of the development and study of activating flux paste compositions based on traditional oxide elements for argon arc welding (A-TIG). The main attention is paid to the effect of the flux composition on the ionization of the arc and the ratio of the penetration depth to the weld width. Experiments were carried out with various compositions of flux pastes containing fluorspar (CaF₂) and welding flux AN-60, while the ratio of components in the composition of the pastes varied. During the experiments, the coating was carried out on steel plates with a thickness of 10 mm, steel grade – 09G2C. The greatest penetration depth was achieved by compositions No. 1 and No. 2, where the penetration depth was 6.5 mm and 7 mm respectively. It is found out that the optimal fluorspar content in the paste should not exceed 25%, which makes it possible to achieve the maximum penetration depth. The main ionizers of the welding arc are identified: Si, Ca, Mg and Mn, which content can be increased or changed to optimize the paste compositions. Based on the study results, it is found that the developed activating fluxes can be used to optimize argon arc welding of thick-walled structures, as well as to provide surface hardening of steels instead of traditional chemical and thermal treatment methods.

The study objective: to develop and conduct experimental studies of complex activating fluxes based on widespread components to increase the penetration depth when welding thick-sheet structures with butt and lap weld joints.

The study tasks: to study the effect of the developed activating fluxes on the ionization of the welding arc and the penetration depth of 09G2C steel when performing surfacing by argon arc method.

The research methods. Preparation of the initial components and activating flux pastes based on them; argon arc surfacing on the steel samples; sample preparation, measurement of the weld width and penetration depth by metallographic method; calculations of the ionization degree of the flux pastes components and assessment of their effect on the arc during surfacing.

The novelty of the work. Application of the developed compositions of activating flux pastes for argon arc surfacing/welding (A-TIG) of thick-walled steels. An increase in the penetration depth and a narrowing of the weld width during active ionization of the arc. The use of compositions of activating fluxes as a basic component of flux pastes for surface hardening of steels.

The study results. Activating flux pastes of No. 1 and No. 2 compositions showed the best penetration results, with their use the greatest penetration depth of 6.5...7 mm was achieved, which is 1.5...1.8 times higher than without the use of activating fluxes. When studying the composition of the fluxes, the optimal content of the components was determined, where the total amount of CaF₂ should not exceed 25 %. No defects were found in the macrostructure during surfacing.

Conclusion: Compositions of activating flux pastes No. 1 and No. 2 for the argon arc surfacing/welding (A-TIG) method provide an increase in the penetration depth of steel samples, are recommended for further use in flux pastes for surface hardening of steels and further modification of chemical composition.

Keywords: flux, depth, penetration, steel, surfacing, paste, fluorspar, macrostructure.

Reference for citing:

Ukraintsev AL, Tereshchenko AA, Makarenko KV. Studying the influence of the developed activating fluxes on welding arc ionization and depth of penetration of 09G2C steel by using A-TIG technology. Transport Engineering. 2026;4:82-94. doi: 10.30987/2782-5957-2026-4-82-94.

Введение

Метод аргонодуговой наплавки/сварки с применением активирующих флюсов (А-TIG) широко применяется для наплавки/сварки конструкционных и специальных сталей, а также цветных сплавов. Использование активирующих флюсов позволяет значительно улучшить качество сварных и наплавленных швов, особенно при сварке толстостенных конструкций. Благодаря усиленной ионизации дуга приобретает кинжаловидную форму, где отношение глубины проплавления к ширине шва значительно выше, чем при обычном способе аргонодуговой наплавки/сварки (TIG). Этот физико-химический процесс вызван содержащимися компонентами флюса, которые способствуют ионизации при высоких температурах, за счёт этого увеличивается плотность тока и, соответственно, увеличивается глубина проплавления [1–3].

Основными элементами, используемыми в таких флюсах, являются Ca, Si, Mg и Mn как в свободной форме, так и в виде соединений оксидов, фторидов и карбонатов (CaO, CaF₂, SiO₂, CaCO₃, MgO, MnO). Эти элементы обладают высокой степенью ионизации и способны эффективно влиять на характеристики дуги. В частности, кальций и марганец способствуют снижению вероятности образования кристаллизационных трещин за счет улучшения структуры металла шва [4]. Кремний, в свою очередь, улучшает механические свойства наплавленного металла, такие как прочность и износостойкость, что особенно важно при ремонте изношенных деталей. Плотность тока в анодном пятне играет важную роль в процессе наплавки/сварки. Увеличение плотности тока приводит к более интенсивному проплавлению металла, однако чрезмерное увеличение может привести к ухудшению качества шва из-за перегрева металла [4–6].

Активирующие флюсы находят своё применение в составе других материалов,

в частности паст для поверхностного упрочения, которые используются взамен традиционным методам (ХТО) [7]. Стоит отметить особенности процесса цементации данным способом, при котором аргон защищает дугу и сварочную ванну от агрессивного воздействия окружающей атмосферы; активирующие флюсы увеличивают глубину проплавления за счёт диссоциации компонентов с последующей ионизацией дуги; графит, входящий в состав науглероживающей флюс-пасты, имеет химическую инертность к ионизации дуги, и, тем самым, проникает на достаточную глубину науглероживания без серьезных потерь при выполнении процесса. Таким образом, активирующие флюсы можно комбинировать с разными компонентами, которые могут заменить остальные способы ХТО (азотирование, нитроцементация, силицирование и т.д.), а также могут позволить выполнять легирование поверхности металла для увеличения стойкости к разным средам или для выполнения роли буферных (переходных) слоёв при выполнении разнородной сварки [7–10].

Стоит отметить главный недостаток применения активирующих флюсов – наличие шлака после выполнения процесса наплавки/сварки. Но при практическом применении было выяснено, что шлаковая корка достаточно легко снимается и не внедряется в металл шва. Это обусловлено чистотой защитной среды и сварочной ванны, которую поддерживает аргон, не давая окружающей атмосфере и загрязнениям влиять на процесс наплавки/сварки [5, 11].

Особенность способа заключается в нанесении пастообразного флюса на поверхность металла, выполняемое вручную [1]. Но с применением механизации и автоматизации процесс значительно ускоряется, что положительно повлияет на производительность и позволит значительно

быстрее обрабатывать поверхности сталей разных размеров [9].

Итак, целью работы является разработка и экспериментальные исследования комплексных активирующих флюсов, со-

зданных на базе широко распространенных, не дефицитных компонентов, для повышения глубины проплавления при сварке толстолистовых конструкций стыковыми и нахлесточными соединениями.

Методика исследования

Для увеличения глубины проплавления при аргонодуговой наплавке использовали специально разработанную активирующую флюс-пасту. В качестве компонентов пасты применяли сварочный флюс

АН-60 (химический состав представлен в табл. 1) и плавиковый шпат ФФ-97А (в табл. 2 плавиковый шпат CaF_2 указан с учётом примесей), в качестве связующего использовался изопропиловый спирт [1, 2].

Таблица 1

Химический состав в % сварочного флюса АН-60

Table 1

Chemical composition in % of welding flux AN-60

SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	MnO	CaF_2	S	P
44,5	0,9	0,05	7	1,9	39	6,5	0,09	0,1

Таблица 2

Химический состав в % плавикового шпата ФФ-97А (CaF_2)

Table 1

Chemical composition in % fluorspar FF-97A (CaF_2)

CaF_2	SiO_2	CaCO_3	S
97,0	0,8	1,0	0,1

Перед смешиванием все компоненты (флюс и шпат) были измельчены с помощью шаровой мельницы до мелкой фракции и просеяны через сито, размер ячейки которого составлял 0,2 мм.

Оба компонента, флюс и шпат по отдельности, прокаливали для удаления из них остатков влаги. Прокалка и просушка производились в муфельной электропечи СНОЛ 6/10-В, температура – 250 °С, время выдержки – 2 часа.

В результате были получены два порошкообразных компонента: сварочный флюс и плавиковый шпат.

После проведения предварительной подготовки всех составляющих пасты, согласно описанной выше по тексту методике, была принята схема оптимизации химических составов пастообразных активирующих флюсов для обеспечения наилучших показателей проплавления свойств образцов из стали 09Г2С. Базовые компоненты пасты (шпат и флюс АН-60) варьировались в разных соотношения, произведены шесть вариантов разных составов пастообразного флюса с шагом 0,2 в объемных долях. Все варианты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Варианты экспериментальных составов активирующих флюс-паст

Table 3

Variants of experimental compositions of activating flux pastes

№ пасты	Соотношение компонентов пасты в объемных долях		
	CaF_2	Флюс АН-60 по ГОСТ 9087 – 81	Спирт изопропиловый по ГОСТ 9805-84
1	–	1	1
2	0,2	0,8	1
3	0,4	0,6	1
4	0,6	0,4	1
5	0,8	0,2	1
6	1	–	1

В табл. 4 представлены примерные химические составы каждой флюс-пасты, которые получены путём смешивания согласно объёмным долям по табл. 4.

После получения составов производилась дополнительная сушка смесей при 350...400 °С 30 мин до добавления спирта.

Таблица 4

Примерные химические составы каждой флюс-пасты в соответствии с их порядковыми номерами (номера образцов)

Table 4

Exemplary chemical compositions of each flux paste according to their order numbers (sample numbers)

№ пасты	SiO ₂	MnO	MgO	CaF ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	S	P
1	44,5	39	1,9	6,5	7	0,9	0,09	0,1
2	35,6	31,2	1,52	25,2	5,6	0,72	0,072	0,08
3	26,7	23,4	1,14	43,9	4,2	0,54	0,054	0,06
4	17,8	15,6	0,76	62,6	2,8	0,36	0,036	0,04
5	8,9	7,8	0,38	81,3	1,4	0,18	0,018	0,02
6	0	0	0	100	0	0	0	0

В металлоконструкциях используется масса различных сталей, как по марке, так и прокату, поэтому для экспериментальной работы была взята наиболее распространённая сталь. В качестве исходного материала для наплавки использовали 2 пластины толщиной 10 мм из стали 09Г2С по ГОСТ 19281-2014. Перед выполнением наплавочных работ поверхности пластин были зачищены от загрязнений, следов коррозии и окалина абразивными дисками (лепестковые с наждачным покрытием и коралловые) и щётками с использованием УШМ.

Перед нанесением флюс-пасту неоднократно тщательно перемешали и встряхнули для создания однородной массы внутри смеси. Флюс-пасту на поверхность участков пластин наносили кистью до плотного заполнения участка под наплавку. В течении 10 мин при комнатной температуре происходила сушка флюса на поверхности участков для испарения излишек спирта. Далее проводилась наплавка для каждого состава в один проход с применением присадочного материала ER70S-

6 (полный аналог Св-08Г2С-О) диаметром 2 мм.

Опытный процесс наплавки *A-TIG* выполняли с помощью сварочного инвертора *FoxWeld VARTEG TIG 501 AC/DC* для аргонодуговой сварки. Угол заточки вольфрамового электрода 30°, сварочный ток 210 А, напряжение 12 В. Функцию защитной среды выполнял аргон высшего сорта по ГОСТ 10157-79.

Перед металлографическими исследованиями был выполнен визуально-измерительный контроль в объёме 100 %. Явные дефекты после наплавки отсутствовали. Для исследования микроструктуры была выполнена механическая обработка образцов: поперечные и продольные разрезы наплавленных слоев выполнены на электроэрозионном вырезном станке *REALREZ 550*; подготовка металлографических шлифов была произведена на шлифовально-полировальном станке *MP-2B*; травление выполнено 4 %-м спиртовым раствором азотной кислоты; исследование микроструктуры проводили на цифровом автоматизированном микроскопе *Leica DVM6A* [2].

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 представлены макрошлифы двух образцов (№ 0.1 и № 0.2), где наплавленные участки выполнены аргонодуговым способом (TIG) и без применения флюс-паст. Максимальная глубина про-

плавления до 5 мм. В качестве исследуемого участка была выбрана средняя область (середина по длине и ширине) наплавленного шва. Все остальные образцы исследовались аналогичным способом.

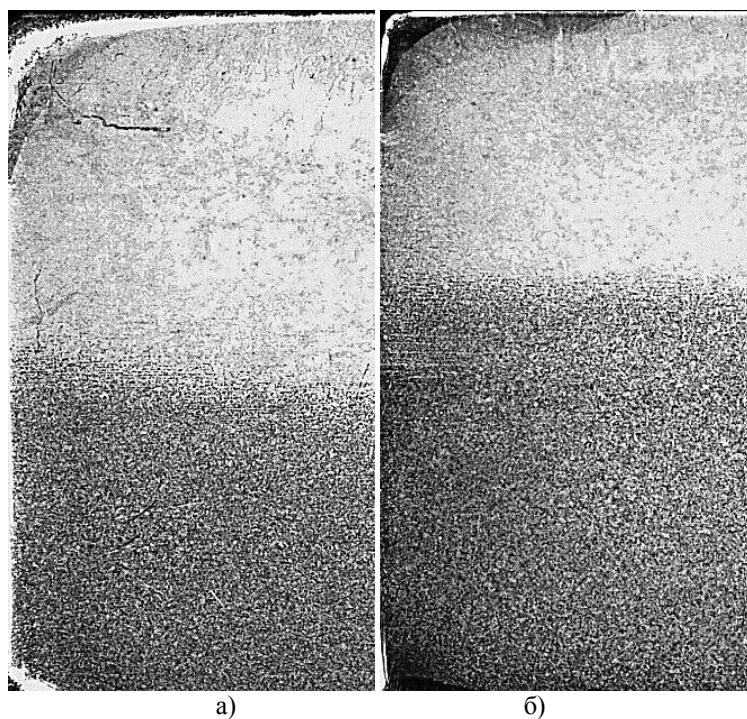


Рис. 1. Микроструктура исходной стали 09Г2С, используемой в эксперименте, $\times 45$ (травление: здесь и далее 4 %-ный спиртовой раствор азотной кислоты)
 Fig. 1. Microstructure of the initial steel 09G2C used in the experiment, $\times 45$ (etching: hereafter 4% alcohol solution of nitric acid)

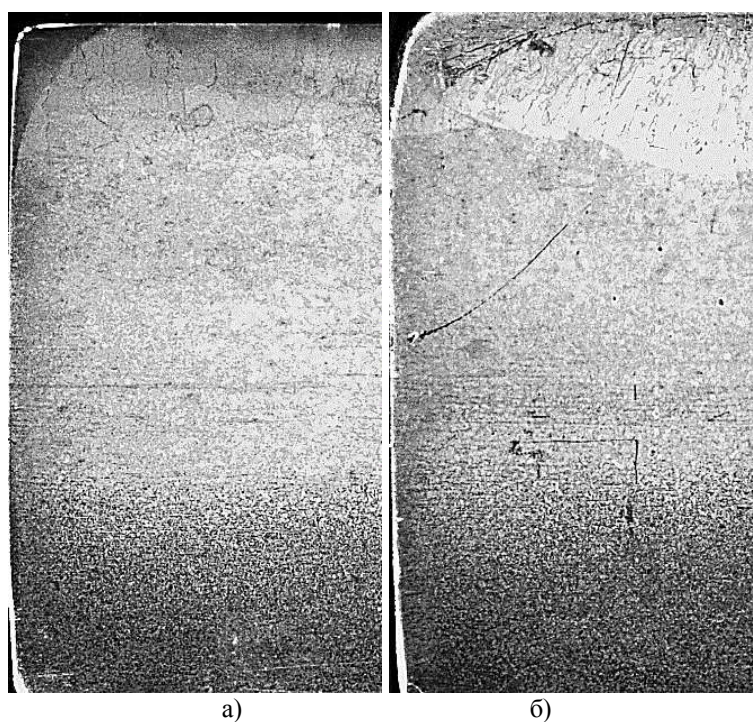


Рис. 2. Макрошлиф наплавленного слоя $\times 45$: а – состав пасты № 1; б – состав пасты № 2 согласно табл. 2
 Fig. 2. Macroglyph of the deposited layer $\times 45$: a – composition of paste No. 1; b – composition of paste No. 2 according to Table 2

Паста № 1. На рис. 2, а показан макрошлиф, на котором глубина проплавления достигает 6,5 мм, что говорит об увеличении ионизации дуги. В составе пасты был флюс АН-60 в количестве 100 %.

Видна разница между отсутствием флюс-пасты (рис. 1) и её использованием.

Паста № 2. На рис. 2б показан макрошлиф, на котором глубина проплавления достигает 7 мм, следовательно, значе-

ние ионизации дуги стало немного выше, чем на образце № 1. Как и в случае с пастой № 1 ионизация дуги увеличивается. В состав пасты вошел плавиковый шпат

(CaF₂) в количестве 20 % (табл. 3), учитывая его наличие в флюсе АН-60, общее содержание шпата в пасте составляет около 25 % (табл. 4).

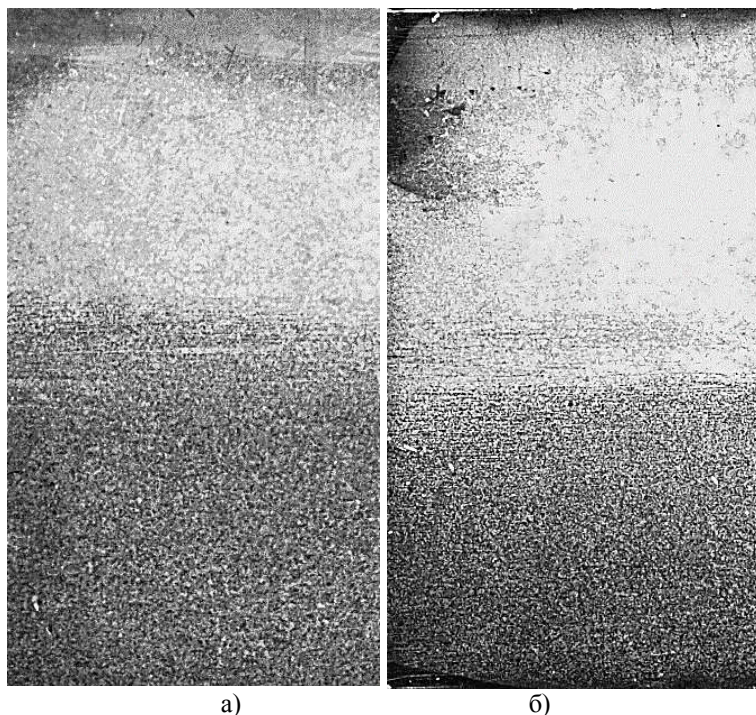


Рис. 3. Макрошлиф наплавленного слоя $\times 45$: а – состав пасты № 3; б – состав пасты № 4 согласно табл. 2

Fig. 3. Macrograph of the deposited layer $\times 45$: a – composition of paste No. 3; b – composition of paste No. 4 according to Table 2

Паста № 3. На рис. 3а показан макрошлиф, на котором глубина проплавления достигает 6 мм, что в сравнении с предыдущими образцами стало ниже. Соответственно, значение ионизации дуги стало меньше. В составе пасты содержание плавикового шпата (CaF₂) составляет около 44 % (табл. 4).

Пасты № 4–6. На рис. 3б, 4а и 4б показаны макрошлифы образцов № 4 (5,8 мм), № 5 (5,6 мм) и № 6 (5,5 мм) соответственно. Содержание плавикового шпата увеличивается с каждым последующим составом (табл. 4), а в № 6 содержание составляет 100 %. Заметно, что ионизирующие свойства дуги значительно падают практически до уровня без применения активирующего флюса.

Результаты визуально-измерительного контроля и металлографических измерений зоны шва (ширина и глубина) наплавленных участков представлены в табл. 5.

Глубина образцов № 0.1 и № 0.2 колебалась от 4,2 до 5 мм, это говорит о непостоянной глубине проплавления по длине шва. На общепринятой практике при аргонодуговой сварке встык без разделки глубина провара составляет около 4 мм (соединение С2 по ГОСТ 14771-76). При большей толщине наблюдается несплавление кромок в корне шва, для таких случаев комбинированно применяют разделку кромок и подварку корня шва. Промежуточный вывод: полученные данные о глубине проплавления образцов № 0.1 и № 0.2 соответствуют провару листов толщиной не более 4 мм.

Заметно, что наибольшее отношение глубины к ширине наблюдается у образцов № 1 и № 2, тогда как у образцов № 3–№ 6 отношение меньше и больше соответствует образцам № 0.1 и № 0.2, где флюс-паста не применялась. Такое уменьшение глубины и увеличение ширины шва говорит о падении степени ионизации дуги. В этих

составах происходило постепенное повышение содержания плавикового шпата (CaF₂) до уровня без применения флюспаств (рис. 5). Предположительно это сви-

детельствует об неионизирующих свойствах фтора (F), входящего в состав плавикового шпата (CaF₂) [12].

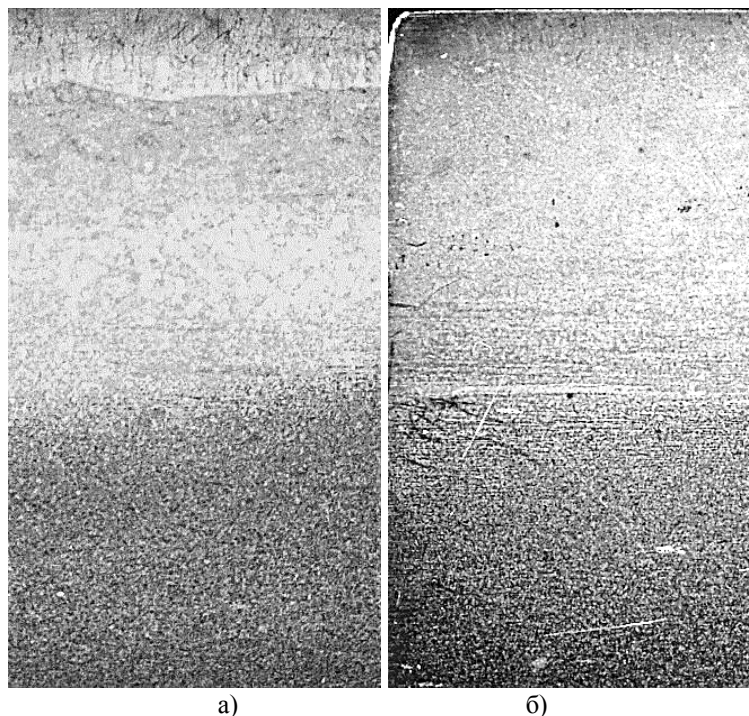


Рис. 4. Макрошлиф наплавленного слоя $\times 45$: а – состав пасты № 5; б – состав пасты № 6 согласно табл. 2

Fig. 4. Macrograph of the deposited layer $\times 45$: a – composition of paste No. 5; b – composition of paste No. 6 according to Table 2

Таблица 5

Результаты замеров ширины и глубины наплавленных участков

Table 5

The results of measurements of the width and depth of the deposited areas

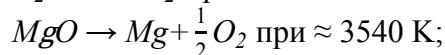
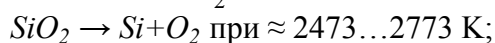
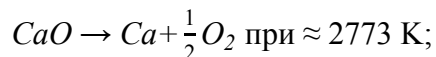
№ пасты	Результаты исследования наплавленного слоя		
	Ширина шва e, мм	Глубина проплавления h, мм	Отношение h/e, мм
№ 0.1 (без флюса)	12,65	5	0,395
№ 0.2 (без флюса)	11,9	4,2	0,353
№ 1	15,5	6,5	0,419
№ 2	14,7	7	0,476
№ 3	15,7	6	0,382
№ 4	14,8	5,8	0,390
№ 5	15,5	5,6	0,361
№ 6	16,4	5,5	0,335

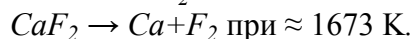
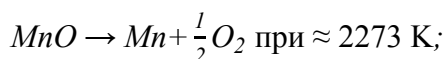
Необходимо рассмотреть механизм процесса ионизации каждого компонента и элемента активирующих флюспаств для определения главных элементов-ионизаторов процесса.

Чтобы рассмотреть процесс ионизации дуги активирующими флюсами, необходимо понять при какой температуре

происходит диссоциация главных составляющих (CaO, SiO₂, MgO, MnO и CaF₂).

Рассмотрим при каких температурах происходит диссоциации основных соединений:





Из справочных материалов известно, что при аргонодуговой сварке (TIG) тем-

пература столба дуги в чистом аргоне (Ar 100 %) составляет $T \approx 1000 \cdot U_0$ (16000 К), где U_0 – эффективный потенциал ионизации в плазме.

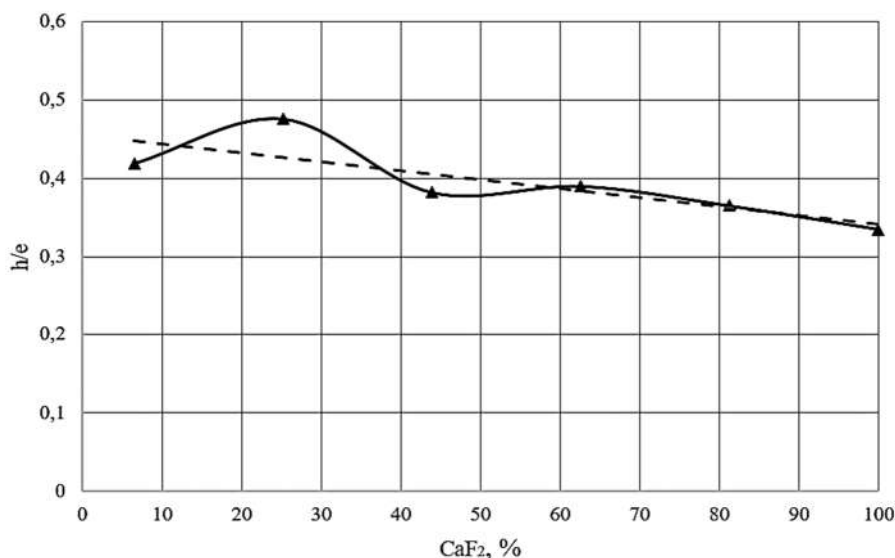


Рис. 5. Падание отношения глубины к ширине шва при увеличении концентрации CaF₂

Fig. 5. Decrease in the ratio of depth to width of the seam with increasing concentration of CaF₂

Для сварки потенциал ионизации аргона составляет $U_0=15,68$. При данной температуре наступает достаточная для существования дуги ионизация $n \approx 10^{17}$ ионов/см³ [13, 14].

По уравнению Саха рассмотрим достижение степени ионизации Ca, Si, Mg и Mn при температуре 16000 К:

$$\frac{x^2}{1-x^2} \cdot p = 2,4 \cdot 10^{-4} \cdot T^{\frac{5}{2}} \cdot e^{\frac{e_0 U_{ii}}{kT}} = 2,4 \cdot 10^{-4} \cdot T^{\frac{5}{2}} \cdot e^{\frac{-11600 \cdot U_{ii}}{kT}},$$

где p – давление; T – температура; $e_0 U_{ii}$ – работа ионизации, Дж (табл. 6); k – постоянная Больцмана [13].

По табл. 7 самыми близкими к достижению степени ионизации стали Ca, Si, Mg и Mn, входящие в оксидные соединения флюс-паст. Наибольшим эффектом

ионизации обладали кремний и марганец, их содержание в составе флюса-паст № 1 и № 2 наибольшее, в то время как кальций и магний лишь немного поддерживали этот процесс в силу своей относительно малой концентрации (рис. 6).

Таблица 6

Потенциалы ионизации компонентов согласно справочным данным (1-я энергия ионизации) [14]

Table 6

Ionization potentials of the components according to the reference data (1st ionization energy) [14]

Хим. эл.	Ar	C	Ca	F	Si	O	Fe	Mn	Mg
U_0	15,68	11,22	6,09	18,60	8,12	13,56	7,83	7,40	7,61

Достижение степени ионизации при температуре 16000 К

Achieving the degree of ionization at a temperature of 16000 K

T, K	Ar	C	Ca	F	Si	O	Fe	Mn	Mg
1000	2,37E-39	2,17E-28	1,82E-15	5,59E-47	1,4E-20	5,82E-34	7,52E-20	9,11E-19	2,7E-19
2000	3,34E-19	6,99E-14	2,02E-07	3,55E-23	5,61E-10	1,66E-16	1,3E-09	4,53E-09	2,46E-09
3000	2,16E-12	5,96E-09	0,000121	3,79E-15	2,39E-06	1,36E-10	4,18E-06	9,61E-06	6,4E-06
4000	6,12E-09	1,93E-06	0,003289	4,36E-11	0,000173	1,36E-07	0,000264	0,000492	0,000363
5000	7,68E-07	6,62E-05	0,025411	1,27E-08	0,002413	9,2E-06	0,003377	0,005562	0,004359
6000	2,01E-05	0,000727	0,103077	5,8E-07	0,014561	0,000159	0,019272	0,029197	0,023836
7000	0,000213	0,004153	0,279715	9,18E-06	0,054111	0,001253	0,068746	0,097931	0,082407
8000	0,001279	0,015687	0,54315	7,45E-05	0,146866	0,006033	0,180217	0,242755	0,210103
9000	0,005247	0,044835	0,774441	0,000386	0,314133	0,020834	0,370491	0,465696	0,417631
10000	0,016461	0,104922	0,900238	0,00146	0,537251	0,056868	0,601873	0,695201	0,650396
11000	0,042403	0,209966	0,954776	0,004385	0,740265	0,130053	0,788719	0,849402	0,821516
12000	0,093906	0,364958	0,977912	0,011069	0,868716	0,256476	0,896001	0,927645	0,913419
13000	0,183705	0,549393	0,988318	0,024424	0,934334	0,436778	0,948164	0,963798	0,956815
14000	0,320323	0,717946	0,993366	0,048427	0,965811	0,634355	0,972819	0,980732	0,977195
15000	0,494337	0,837507	0,995996	0,087996	0,981184	0,79282	0,984879	0,989087	0,9872
16000	0,669339	0,908858	0,997456	0,148445	0,989055	0,890478	0,991103	0,993462	0,9924

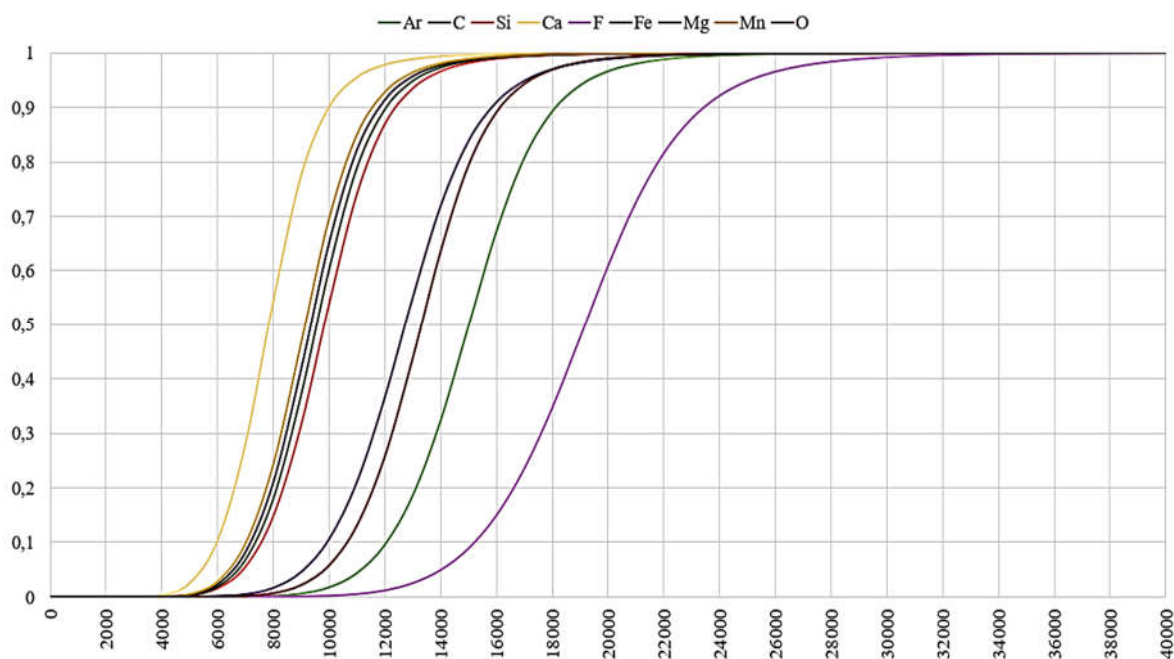


Рис. 6. Достижение степени ионизации для отдельных элементов

Fig. 6. Achieving the degree of ionization for individual elements

Соединение CaF_2 (плавиковый шпат) диссоциирует раньше всех остальных при температуре 1673 К, при этом фтору, чтобы достичь степени ионизации, потребуется температура в два раза выше. Это говорит о том, что фтор является самым элект-

троотрицательным элементом (По шкале Полинга он имеет значение ≈ 4), который в процессе сварки захватывает свободные электроны из плазмы, образуя собственные отрицательные ионы. И, несмотря на повышенное содержание кальция в соста-

вах № 3–№ 6, фтор блокирует процесс ионизации дуги. Оставшаяся доля кальция обеспечивает ионизацию дуги, это проявляется вследствие незначительно увеличившейся глубины проплавления в сравнении с образцами без применения флюс-пасты.

Неэффективность применения плавикового шпата (и остальных фторидов) в составе активирующего флюса можно оценить по результатам проведенных экспериментов. Из их анализа следует, что максимальное содержание плавикового шпата (CaF_2) в составах разработанных активирующих флюсов не должно превышать 25 %.

Выводы

Проведенные экспериментальные исследования позволили разработать составы активирующих флюс-паст для аргонодуговой сварки и наплавки (способ А-TIG). Экспериментальные данные показали, что использование активирующих флюсов позволяет увеличить глубину проплавления в 1,5 раза.

Наилучшие результаты продемонстрировали два состава: № 1 и № 2, в которых содержание плавикового шпата (CaF_2) не превышает 25 %. Это подтверждается результатами металлографического анализа и визуально-измерительного контроля макрошлифа, где дефектов (пор, неметаллических или шлаковых включений, трещин и т.д.) не обнаружено, что свидетельствует о хорошей подготовке материалов перед началом опытных работ.

Изученные результаты исследования позволяют перспективно оценить приме-

Касаемо остальных составляющих флюс-паст – оксидных соединений Ca, Si, Mg и Mn, рекомендуется добавление данных оксидов в разных пропорциях для достижения максимального эффекта ионизации.

В свете изложенного исследования можно констатировать, что активирующие флюс-пасты составов № 1 и № 2 наиболее полно соответствуют поставленной цели. Данные экспериментальные составы рекомендуются для дальнейшего модифицирования и как базовый материал для создания флюс-паст для науглероживания и других заменителей традиционных методов ХТО [15, 16].

нение аргонодуговой сварки с активирующими флюс-пастами (А-TIG) для увеличения глубины проплавления и применения в качестве базового компонента для разработки составов паст, заменяющих способы ХТО, путём наплавки на поверхность стальных.

Разработанные составы № 1 и № 2 вместе с технологией А-TIG могут быть внедрены как на промышленные производства, так и в бытовое использование, особенно при сварке стальных толстостенных металлоконструкций. Использование активирующих флюс-паст позволит повысить эффективность аргонодуговой сварки, снизить энергозатраты, увеличить производительность, а также использовать этот метод для поверхностного упрочнения изделий или для применения в восстановительных работах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Украинцев А.Л., Макаренко К.В. Анализ ионизации сварочной дуги компонентами активирующих флюсов при применении технологии А-TIG // Новые горизонты: сборник материалов и докладов XII научно-практической конференции с международным участием. Брянск: БГТУ, 2025. С. 717-722.
2. Украинцев, А. Л. Разработка состава активирующего флюса на базе традиционных оксидных элементов для технологии А-TIG / А. Л. Украинцев, К. В. Макаренко // Новые горизонты: сборник материалов и докладов X научно-практической конференции с международным участием, Брянск, 14 апреля 2023 года. –
3. Паршин С.Г. Технология сварки. Сварка плавлением. Технология сварки высоколегированных сталей / С.Г. Паршин. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2015. 102 с.
4. Кузьменко В.Г., Токарев В.С., Галинич В.И., Сокольский В.Э., Казимиров В.П., Выбор составов сварочных флюсов с учетом структурных характеристик их расплавов / Автоматическая сварка. 2002. № 10. С.24-29.
5. Исследование энергоэффективности процесса А-TIG сварки нержавеющей сталей с использованием индивидуальных флюсов-оксидов. Саидов Р.М., Куш М., Майр П., Хоефер К., Хуанг

- Й., Комилова Д.Р. Computational Nanotechnology. 2017. № 3. С. 36-44.
6. Ющенко, К. А. Применение активаторов при дуговой сварке вольфрамовым электродом в инертных газах сталей и сплавов / К. А. Ющенко, Д. В. Коваленко, И. В. Коваленко // Автоматическая сварка. 2001. № 7.
 7. Макаренко, К. В. Науглероживание поверхности стальных деталей с использованием паст по аргонодуговой технологии / К. В. Макаренко, А. Л. Украинцев // Технологическое обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической отрасли : сборник научных статей 14-ой международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию Брянской научной школы технологов-машиностроителей, Брянск, 05–07 октября 2022 года. Брянск: Брянский государственный технический университет, 2022. С. 218-222. EDN MHDYOH.
 8. Новый способ науглероживания поверхности стальных изделий с использованием специальной пасты методом аргонодуговой наплавки / К. В. Макаренко, А. В. Вдовин, А. Л. Украинцев [и др.] // Транспортное машиностроение. 2025. № 6(42). С. 62-76. DOI 10.30987/2782-5957-2025-6-62-76. EDN Awnsbm.
 9. Красиков, П.П. Исследование формирования корневых швов при сварке в защитных газах с применением флюсовых паст: дис. канд. техн. наук 2.5.8 Сварка, родственные процессы и технологии (технические науки) / Волгоградский государственный технический университет. Волгоград, 2022. 169 с.

10. Исследование анализа физико-химических свойств флюсов-оксидов на флюсы сварных швов нержавеющей сталей / Саидов Р.М., Куш М., Майр П., Хоефер К. и др. // Вычислительные нанотехнологии, №4, 2016, 10-20 с.
11. Рябцев, И.А. Теория и практика наплавочных работ / И.А. Рябцев, И.К. Сенченков. К.: «Эко-технология», 2013. 400 с.
12. Haynes, W.M. (Ed.). (2012). CRC Handbook of Chemistry and Physics (93th ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b12286>.
13. Исследование энергоэффективности процесса атиг сварки нержавеющей сталей с использованием индивидуальных флюсов-оксидов / Р. М. Саидов, М. Куш, П. Майр [и др.] // Computational Nanotechnology. 2017. № 3. С. 36-44. EDN ZIFSQR.
14. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник: Справ. изд./ Под ред. А.А. Потехина и А.И. Ефимова. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Химия, 1991. 432 с. ISBN 5–7245–0703–Х.
15. Патент № 2755912 С1 Российская Федерация, МПК В23К 35/36. Науглероживающая паста для наплавки : № 2021103164 : заявл. 09.02.2021 : опубл. 22.09.2021 / К. В. Макаренко, Д. Н. Савинов, А. В. Вдовин ; заявитель ФГБОУ «Брянский государственный технический университет». EDN AHNIZF.
16. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. В 2-х т. Т. I. / И.В. Суминов, П.Н. Белкин, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин, Б.Л. Крит, А.М. Борисов // Под общей редакцией И.В. Суминова. М.: Техносфера, 2011. 464 с.

REFERENCES

1. Ukraintsev AL, Makarenko KV. Analysis of the welding arc ionization by components of activating fluxes using A-TIG technology. Collection of Papers of the XII Scientific and Practical Conference with International Participation, 2025: New Horizons; Bryansk: BSTU; 2025.
2. Ukraintsev AL, Makarenko KV. Development of an activating flux composition based on traditional oxide elements for A-TIG technology. Collection of Papers of the XII Scientific and Practical Conference with International Participation, April 14, 2023: New Horizons; Bryansk: BSTU; 2023.
3. Parshin SG. Welding technology. Fusion welding. Welding technology of high-alloy steels. St. Petersburg: Polytechnic University Publishing House; 2015.
4. Kuzmenko VG, Tokarev VS, Galinich VI, Sokolsky VE, Kazimirov VP. Selection of welding flux compositions taking into account the structural characteristics of their melts. Avtomaticheskaya Svarka (Automatic Welding). 2002;10:24-29.
5. Saidov RM, Kush M, Mayr P, Hofer K, Huang Y, Komilova DR. Study of the energy efficiency of A-TIG welding of stainless steels using individual

- flux oxides. Computational Nanotechnology. 2017;3:36-44.
6. Yushchenko KA, Kovalenko DV, Kovalenko IV. Use of activators in arc welding with a tungsten electrode in inert gases of steels and alloys. Avtomaticheskaya Svarka (Automatic Welding). 2001;7.
7. Makarenko KV, Ukraintsev AL. Carburization of the surface of steel parts using pastes according to argon arc technology. Collection of Scientific Papers of the 14th International Scientific and Technical Conference dedicated to the 50th anniversary of the Bryansk Scientific School of Engineering Technologists, 05-07 October, 2022: Technological Support and Quality Improvement of Mechanical Engineering and Aerospace Products; Bryansk: Bryansk State Technical University; 2022.
8. Makarenko KV, Vdovin AV, Ukraintsev AL, Savinov DN, Baydimirov MA, Dmitrieva NV. A new method of carburizing the surface of steel products using a special paste by argon arc welding. Transport Engineering. 2025;6: 62-76. DOI 10.30987/2782-5957-2025-6-62-76.
9. Krasikov PP. Study of forming root welds during welding in protective gases using flux pastes [dis-

- sertation]. [Volgograd (RF)]: Volgograd State Technical University; 2022.
10. Saidov RM, Kush M, Mayr P, Hoefler K. Analysis of physico-chemical properties of oxide fluxes on stainless steel weld fluxes, *Computational Nanotechnologies*. 2016;4:10-20.
 11. Ryabtsev IA, Senchenkov IK. Theory and practice of surfacing operations. Kiev: Ecotekhnologiya; 2013.
 12. Haynes WM, editor. CRC Handbook of Chemistry and Physics [Internet]. CRC Press; 2012. Available from: <https://doi.org/10.1201/b12286>.

13. Saidov RM, Kush M, Mayr P. Study of the energy efficiency of a-tig welding of stainless steels using individual flux oxides. *Computational Nanotechnology*. 2017;3:36-44.
14. Rabinovich VA, Khavin ZYa. A short chemical reference book. 3rd ed. Leningrad: Khimiya; 1991.
15. Makarenko KV, Savinov DN, Vdovin AV. Carburizing paste for surfacing. RF Patent No. 2755912 C1 МПК B23K 35/36. 22 Sept 2021.
16. Suminov IV, Belkin PN, Epelfeld AV, Lyudin VB, Crete BL, Borisov AM. Plasma-electrolytic modification of the surface of metals and alloys. Moscow: Technosphere; 2011.

Информация об авторах:

Украинцев Александр Леонидович – аспирант кафедры «Машиностроение и материаловедение» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», тел.: +7 (4832) 58-82-23.
Терещенко Александр Александрович – руководитель АЦСТ ООО «Аттестационный центр по

сварочному производству, экспертизе и диагностике», г. Брянск 241013, тел.: +7 (4832) 52-19-56.

Макаренко Константин Васильевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Машиностроение и материаловедение» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», тел.: +7 (4832) 58-82-18.

Ukraintsev Aleksandr Leonidovich – Postgraduate student of the Department of Mechanical Engineering and Materials Science at Bryansk State Technical University, phone: +7 (4832) 58-82-23.

Diagnostics, Bryansk, 241013, phone: +7 (4832) 52-19-56.

Tereshchenko Aleksandr Aleksandrovich – Head of the Certification Center for Welding, Expertise and

Makarenko Konstantin Vasilyevich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering and Materials Science, Bryansk State Technical University, phone: +7 (4832) 58-82-18.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 22.12.2025; одобрена после рецензирования 20.02.2026; принята к публикации 27.03.2026. Рецензент – Химухин С.Н., доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения РАН, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 22.12.2025; approved after review on 20.02.2026; accepted for publication on 27.03.2026. The reviewer is Khimukhin S.N., Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher at the Institute of Materials Science of the Khabarovsk Scientific Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.