



## Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



### Влияние режимов дуговой автоматической сварки на геометрические параметры шва стыковых соединений из низкоуглеродистой стали, выполненных с применением экспериментального флюса

Егор Старцев <sup>a, \*</sup>, Павел Бахматов <sup>b</sup>

Комсомольский-на-Амуре государственный университет, пр. Ленина, 27, г. Комсомольск-на-Амуре, 681013, Россия

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5811-7071>, [egorstarts@inbox.ru](mailto:egorstarts@inbox.ru); <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4271-0428>, [mim@knastu.ru](mailto:mim@knastu.ru)

#### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.791.753.5

#### История статьи:

Поступила: 15 сентября 2023  
Рецензирование: 20 сентября 2023  
Принята к печати: 27 сентября 2023  
Доступно онлайн: 15 декабря 2023

#### Ключевые слова:

Сварка под флюсом  
Режимы сварки  
Геометрические параметры шва  
Качество сварного соединения

#### Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке из средств ФГБОУ ВО «КнАГУ» по проекту НИР № ВН001/2020 «Разработка алгоритма и исследование процесса программируемого управления формированием сварочного/наплавочного валика (в том числе и в применении аддитивных технологий) на установке автоматической сварки» (2020–2023 гг.).

#### Благодарности

Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнауки № 13.ЦКП.21.0034).

#### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Металлургической промышленностью на территории РФ накоплен значительный объем шлаков, получаемых при выплавке сталей и чугунов. Наличие шлакоотвалов пагубно влияет на экологию регионов, имеющих металлургические предприятия. При восстановлении железа из шлаков побочным продуктом становится агломерат оксидов, который можно рассматривать как флюсовую композицию для дуговой сварки/наплавки под слоем флюса, наполнителей порошковых проволок и покрытий сварочных штучных электродов. **Цель работы:** установить возможность дуговой сварки при использовании полученного авторами флюса и определить оптимальные режимы сварки с условием достижения геометрических параметров шва по ГОСТ 8713–79 и качества сварного соединения (отсутствие внутренних дефектов). **В работе исследованы** стыковые сварные соединения листовой стали ВСт3сп толщиной 5 мм, полученные автоматической сваркой под слоем флюса на постоянном токе с принудительным формированием корневого валика на керамических подкладках с применением флюса из переработанного металлургического шлака электросталеплавильного предприятия. Автоматическую сварку плоских образцов осуществляли на автомате тракторного типа АДФ-1250 с проволокой диаметром 3 мм при постоянной скорости сварки 54 см/мин с варьированием силы тока и напряжения на дуге в пределах 400–600 А и 27–37 В. **Методы исследования.** Оценка качества сварных соединений визуальным-измерительным и рентгенографическим контролем, определение деформации образцов путем их лазерного сканирования и компьютерной обработки 3D-моделей. Статистическое моделирование в виде двухфакторного эксперимента с получением адекватных уравнений регрессии влияния режимов сварки на геометрические параметры шва: высоту усиления и ширину шва с лицевой и обратной стороны соединения. **Результаты и обсуждение.** Показана возможность получения сварочных флюсов из металлургических шлаков электросталеплавильного предприятия и их применения для создания сварных соединений. Установлены оптимальные режимы дуговой сварки тонкостенных листовых деталей из низкоуглеродистой стали с принудительным формированием корневого валика на керамических подкладках, обеспечивающие отсутствие внутренних дефектов в виде пор, трещин и неспроваров, минимум остаточных деформаций и соответствие размеров сварного шва требованиям существующего стандарта. Номинальные значения геометрических параметров шва по ГОСТ 8713–79–С4 соответствуют следующим режимам сварки: скорость сварки 54 см/мин, сила сварочного тока 550 А, напряжение на дуге 30 В. Результаты работы могут быть применены на металлургических электросталеплавильных предприятиях, производящих низкоуглеродистую сталь при отработке технологий применения сварочных материалов из шлаков.

**Для цитирования:** Старцев Е.А., Бахматов П.В. Влияние режимов дуговой автоматической сварки на геометрические параметры шва стыковых соединений из низкоуглеродистой стали, выполненных с применением экспериментального флюса // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 61–73. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-61-73.

#### Введение

Металлургической промышленностью на территории РФ накоплен значительный объем шлаков, получаемых при выплавке сталей и чугунов. Наличие шлакоотвалов пагубно влияет на экологию регионов, имеющих металлургиче-

#### \*Адрес для переписки

Старцев Егор Андреевич, старший преподаватель  
Комсомольский-на-Амуре государственный университет,  
пр. Ленина, 27,  
681013, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия  
Тел.: +7 (914) 188-05-45, e-mail: [egorstarts@inbox.ru](mailto:egorstarts@inbox.ru)

ские предприятия [1]. Переработка накопленных и повышение эффективности утилизации вновь создаваемых шлаков – одна из приоритетных задач развития страны [2].

Электросталеплавильные шлаки пригодны для использования в цементной промышленности [3–10]. Зарубежные страны с развитой металлургической промышленностью перерабатывают все доменные шлаки и значительную часть сталеплавильных шлаков [11, 12].

Дефицит металлического лома на электросталеплавильных предприятиях приводит к поиску возможных вариантов его замены, таких как использование железорудных окатышей, переработка отходов производства (металлургических шлаков, содержащих до 60 % оксида железа) и др. [13].

При восстановлении железа из шлаков побочным продуктом становится агломерат оксидов, который можно рассматривать как флюсовую композицию для дуговой сварки/наплавки под слоем флюса, наполнителей порошковых проволок и покрытий сварочных штучных электродов [14]. Состав новой флюсовой композиции во многом определяется шлаковой системой, используемой электросталеплавильным предприятием для производства стали конкретной марки [15–17].

В работе [18] показано влияние состава флюса на основе переработки техногенных отходов металлургического предприятия и вводимых в него добавок на структурно-фазовые состояния и поверхность разрушения электродуговой наплавки и сварных швов.

Авторами работы [19] получена флюсовая композиция после электрошлакового переплава металлургического шлака завода «Амурсталь»,

дробления и связывания компонентов жидким стеклом. Учитывая сложность состава полученного флюса и неопределенность его теплофизических свойств, **целью работы** ставилось определение оптимальных энергетических параметров процесса дуговой сварки, обеспечивающих стандартизованные размеры сварного соединения.

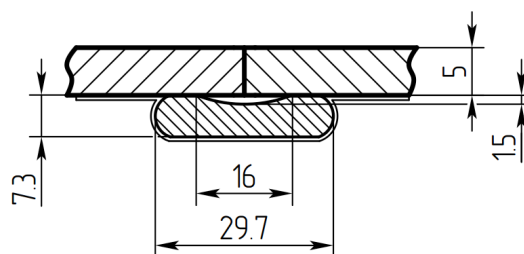
Задачей проведения исследований являлось определение влияния параметров режима автоматической дуговой сварки под слоем экспериментального флюса на качество сварных соединений: наличие внутренних и наружных дефектов, геометрические размеры шва и установление характера воздействия полученного флюса на изменение напряженно-деформационного состояния в объеме сваренных образцов с применением стандартных и экспериментальных флюсов.

### Методика исследований

Исследования проводили на восьми плоских сварных образцах из низкоуглеродистой конструкционной стали ВСт3сп размером 195×440×5 мм (рис. 1, а), имеющих тип сварного соединения С4 по ГОСТ 8713–79 – стыковое одностороннее одностороннее соединение без разделки кромок на плоских керамических подкладках, приклеиваемых к обратной стороне стыка через металлизированный скотч (рис. 1, б). Заготовки собирались без зазора; чтобы не допустить смещения кромок, приваривались технологические планки (100×40×5 мм, ВСт3сп) с проставлением двух коротких прихваток (10–15 мм).



а



б

Рис. 1. Собранный под сварку образец с приклеенной керамической подкладкой:

а – общий вид собранного образца; б – профиль образца и керамической подкладки

Fig. 1. A specimen assembled for welding with a glued ceramic lining:

а – general view of the assembled specimen; б – profile of the specimen and the ceramic lining

Сварка образцов выполнялась проволокой Св-08А по ГОСТ 2246–70 диаметром 3 мм. В качестве защиты при автоматической сварке использовался разработанный и запатентованный сварочный флюс [20] грануляцией 1,0–4,0 мм.

Сварка производилась на автомате АДФ-1250 с источником питания ВДУ-1250 на режимах, указанных в табл. 1. Образец 8 для проведения сравнительного анализа выполнен с применением стандартного сварочного флюса АН-42.

Следует отметить, что при сварке образца № 1 выявлено интенсивное порообразование, вызванное газообразованием по реакции окисления при плавлении флюса и повышением давления в пространстве между поверхностями керамической подкладки и образца. Для предотвращения негативного влияния этого фактора в остальных образцах в фольгированном скотче были сделаны отверстия длиной 10 мм с шагом 15 мм вдоль линии перехода от керамической подкладки к поверхности детали. Поэтому в табл. 1 образцы № 1 и 2 имеют одинаковые режимы.

Визуально-измерительный контроль сварных соединений проводили по СТО 9701105632-003–2021 с применением увеличительной лупы ЛИ-10, штангенциркуля и универсального шаблона сварщика УШС-3.

Рентгенографический контроль сварных соединений осуществлялся по ГОСТ ISO 17636-1–2017 с применением источника ионизированного излучения – рентгеновского аппарата «ПИОН-2М» и рентгеновской пленки Aqfa D4,

фокусное расстояние – 350 мм, время экспозиции – 10 с. Схема просвечивания 1.

Определение степени деформирования сварных образцов проводили по их цифровым двойникам, получаемым путем лазерного сканирования MCAx, и обработкой 3D-моделей в программе Focus 10 Inspection.

Статистическое моделирование проводили с использованием пакета анализа в программе Microsoft Excel. При этом устанавливались зависимости между входными ( $X_1$  – сила сварочного тока;  $X_2$  – напряжение на дуге) и выходными (высота усиления и ширина шва) параметрами. Основной уровень варьируемых параметров определен экспериментально, исходя из стабильности дугового процесса при полноразмерном формировании сварного шва.

### Результаты и их обсуждение

При сварке образцов на экспериментальном флюсе отмечается мягкое, беззвучное горение дуги, отсутствие дымообразования и легкое послесварочное отделение шлаковой корки.

Внешний вид полученных сварных образцов представлен на рис. 2. При проведении визуально-измерительного контроля получены следующие результаты: с лицевой стороны все образцы имеют полноценно сформированную поверхность сварного шва, не имеющую поверхностных дефектов. С обратной стороны в образце № 1 наблюдаются несплошности шириной 1,5–2,0 мм, глубиной 1,0–1,5 мм и средней протяженностью

Таблица 1

Table 1

#### Режимы автоматической сварки под слоем флюса

##### Automatic submerged arc welding modes

Образец / Specimen	Сила сварочного тока, А / Welding arc current, A	Напряжение на дуге, В / Arc voltage, B	Скорость сварки, см/мин / Welding speed, cm/min
1	600	37	54
2	600	37	
3	500	37	
4	400	37	
5	450	37	
6	450	27	
7	500	27	
8	500	27	



Образец / Specimen	Лицевая сторона / Obverse Side	Обратная сторона / Reverse Side	Форма кратера / Crater Shape
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			

Рис. 2. Внешний вид полученных сварных образцов

Fig. 2. Appearance of the resulting welded specimens

10 мм, располагающиеся преимущественно в начале и центральной части шва. Металл корня шва формировался на поверхности керамической подкладки с активным взаимодействием его материала, поэтому поверхность валика не повторяет гладкую форму подкладки. Корневой

валик образца № 2 также имеет несплошности в начале шва глубиной 0,2–0,5 мм, шириной 1,5–2,0 мм, средней протяженностью 5 мм. Образец № 3 не имеет поверхностных дефектов корневого валика, характерных для образцов № 1 и 2, но формирование его поверхности про-

исходило идентично им. Примененные режимы сварки образца № 4 оказались недостаточными для принудительного получения нужной конфигурации геометрических параметров корневого валика в начале шва. В центральной части шва проплав стабилизировался, но корневой валик формировался на весу, без достижения поверхности керамической подкладки. Поверхность образца № 5 сходна с образцом № 3. Образцы № 6–8 имеют в корневом валике четкие отпечатки сегментов керамической подкладки с гладкой поверхностью и полностью сформированы по размерам, соответствующим профилю формирующего элемента подкладки.

Таким образом, при соединении листовых заготовок из низкоуглеродистой стали толщиной 5 мм с использованием экспериментального флюса получены следующие результаты: режим сварки 400 А, 37 В недостаточен для формирования корневого валика; режимы 600–500 А, 37 В энергетически избыточны, приводят к расплавлению материала подкладки и активному взаимодействию с расплавом сва-

рочной ванны, газообразованию и появлению дефектов в виде несплошностей. Наиболее рациональные режимы сварки: 450–500 А, 27 В.

Практически во всех сварных образцах, полученных с применением экспериментального флюса, вне зависимости от режима сварки наблюдается вытянутое очертание кратера со средней длиной 100–110 мм и глубиной 1–1,5 мм, практически вдвое превышающей длину кратера шва, полученного с использованием стандартного флюса – 6 мм (образец № 8). Это можно объяснить повышенной теплоемкостью экспериментального флюса. Вогнутость кратера свидетельствует о большей плотности экспериментального флюса, препятствующей сбросу давления перегретых газов и паров металла в подфлюсовом пространстве над сварочной ванной при прекращении действия дуги.

В табл. 2 приведены результаты измерения геометрических параметров сварных швов образцов в соответствии с ГОСТ 8713–79-С4 для толщины свариваемых элементов 5 мм.

Таблица 2

Table 2

### Результаты визуально-измерительного контроля

#### Results of visual and dimensional inspection

ГОСТ 8713–79-С4 (для толщины деталей 5 мм) / GOST 8713–79-C 4 (for parts with a thickness of 5 mm)			
Ширина шва $e$ , мм / Seam width $e$ , mm	$\leq 23$		
Ширина корня шва $e_1$ , мм / Width of the seam root $e_1$ , mm	$12 \pm 4$		
Высота шва $g$ , мм / Seam height $g$ , mm	$1,5 \pm 1,0$		
Высота корня шва $g_1$ , мм / The height of the seam root $g_1$ , mm	$1,5 \pm 1,0$		
Образец № 1 (600 А, 37 В) / Specimen No.1 (600 А, 37 V)			
Место замера / Place of measurement	Начало / Beginning	Середина / Middle	Конец / End
Ширина шва $e$ , мм	17,5	15,9	18,6
Ширина корня шва $e_1$ , мм	18,3	16,3	17,5
Высота шва $g$ , мм	2	1	3
Высота корня шва $g_1$ , мм	1	1	1
Образец № 2 (600 А, 37 В) / Specimen No.2 (600 А, 37 V)			
Место замера	Начало	Середина	Конец
Ширина шва $e$ , мм	17	18	17
Ширина корня шва $e_1$ , мм	14,2	13,5	13,8
Высота шва $g$ , мм	1,5	0	0,5
Высота корня шва $g_1$ , мм	3	4	4

Окончание табл. 2

The End Table 2

ГОСТ 8713–79-C4 (для толщины деталей 5 мм) / GOST 8713–79-C 4 (for parts with a thickness of 5 mm)			
Образец № 3 (500 А, 37 В) / Specimen No.3 (500 А, 37 V)			
Место замера	Начало	Середина	Конец
Ширина шва $e$ , мм	16,5	17,4	16,6
Ширина корня шва $e_1$ , мм	12,1	11	13,5
Высота шва $g$ , мм	2,5	2	2
Высота корня шва $g_1$ , мм	0	1	1
Образец № 4 (400 А, 37 В) / Specimen No.4 (400 А, 37 V)			
Место замера	Начало	Середина	Конец
Ширина шва $e$ , мм	14,4	14	14,2
Ширина корня шва $e_1$ , мм	непровар	5,5	7
Высота шва $g$ , мм	1	2	1
Высота корня шва $g_1$ , мм	непровар	1,5	1,5
Образец № 5 (450 А, 37 В) / Specimen No.5 (450 А, 37 V)			
Место замера	Начало	Середина	Конец
Ширина шва $e$ , мм	15,7	15	15,8
Ширина корня шва $e_1$ , мм	9,8	9	8,9
Высота шва $g$ , мм	0	0,5	0
Высота корня шва $g_1$ , мм	1	2	0
Образец № 6 (450 А, 27 В) / Specimen No.6 (450 А, 27 V)			
Место замера	Начало	Середина	Конец
Ширина шва $e$ , мм	12,4	12,5	12,4
Ширина корня шва $e_1$ , мм	8	8	8,6
Высота шва $g$ , мм	1,5	1	1
Высота корня шва $g_1$ , мм	0,5	0,5	0,5
Образец № 7 (500 А, 27 В) / Specimen No.7 (500 А, 27 V)			
Место замера	Начало	Середина	Конец
Ширина шва $e$ , мм	11,7	12,5	11,2
Ширина корня шва $e_1$ , мм	14,7	9,3	9,9
Высота шва $g$ , мм	2	2	2
Высота корня шва $g_1$ , мм	1	1	0,5
Образец № 8 (500 А, 27 В) (стандартный флюс) / Specimen No.8 (500 А, 27 V) (standard flux)			
Место замера	Начало	Середина	Конец
Ширина шва $e$ , мм	13,4	13,1	13,6
Ширина корня шва $e_1$ , мм	10,6	10,2	9,2
Высота шва $g$ , мм	1	2	2
Высота корня шва $g_1$ , мм	1	0,5	1
Примечание:	– удовлетворительный		– неудовлетворительный параметр



Согласно табл. 2 не удовлетворяющими требованиям к геометрическим параметрам сварных соединений С4 по ГОСТ 8713–79 являются образцы № 1–5. Остальные образцы (№ 6–8) полностью отвечают этим требованиям.

Рентгенограммы полученных сварных образцов представлены на рис. 3.

В результате рентгенографии сварных соединений (рис. 3) обнаружены выявленные визуально-измерительным контролем дефекты образцов

№ 1, 2 и 5 (несплошности). В образце № 4 в начале шва обнаружен непровар длиной 17 мм. За исключением указанных выше несоответствий, все образцы имеют плотный металл шва, внутренние дефекты (поры, трещины) отсутствуют.

На рис. 4 представлены результаты компьютерной обработки 3D-моделей сварных образцов, полученных лазерным сканированием, которые отображают общую картину их остаточной деформации.

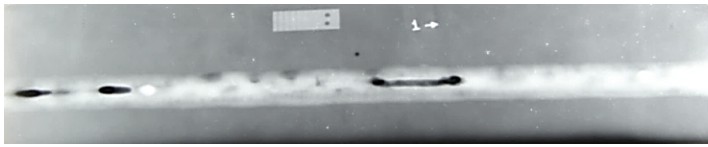
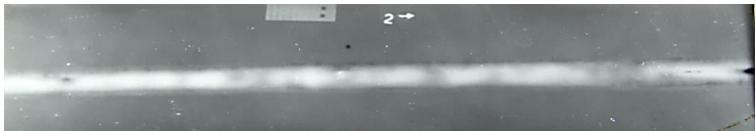
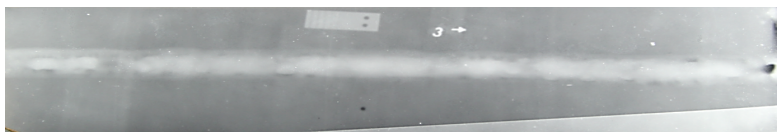
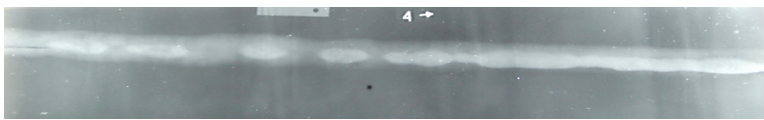
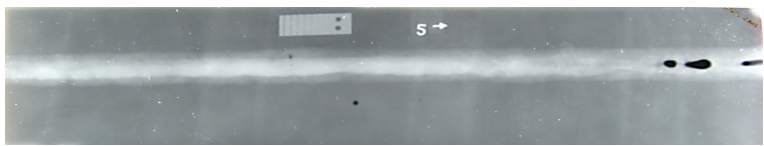
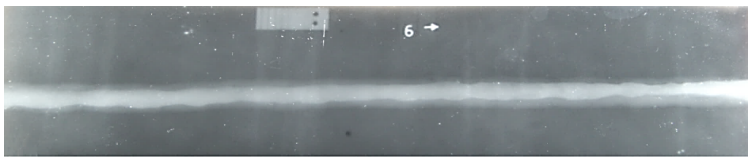
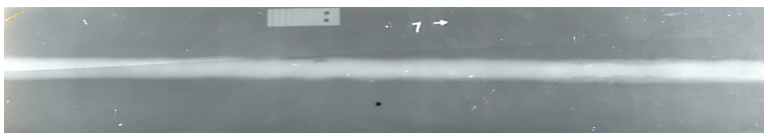
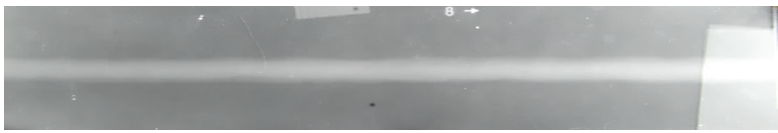
Образец / Specimen	Рентгенограмма / X-ray pattern	Дефект по ГОСТ 7512–82 / Defect according to GOST 7512–82
1		Ш20×2; 2Ш10×2; Σ 30
2		П1,5; Нр 10×0,3
3		Не обнаружено
4		Нр 17×0,5
5		Ш5×2; Ш10×2; Σ15
6		Не обнаружено
7		Не обнаружено
8		Не обнаружено
Примечание: стрелкой на рентгенограмме обозначено направление сварки. Note: the arrow on the X-ray pattern indicates the direction of welding.		

Рис. 3. Рентгенограммы сварных образцов

Fig. 3. X-ray patterns of welded specimens

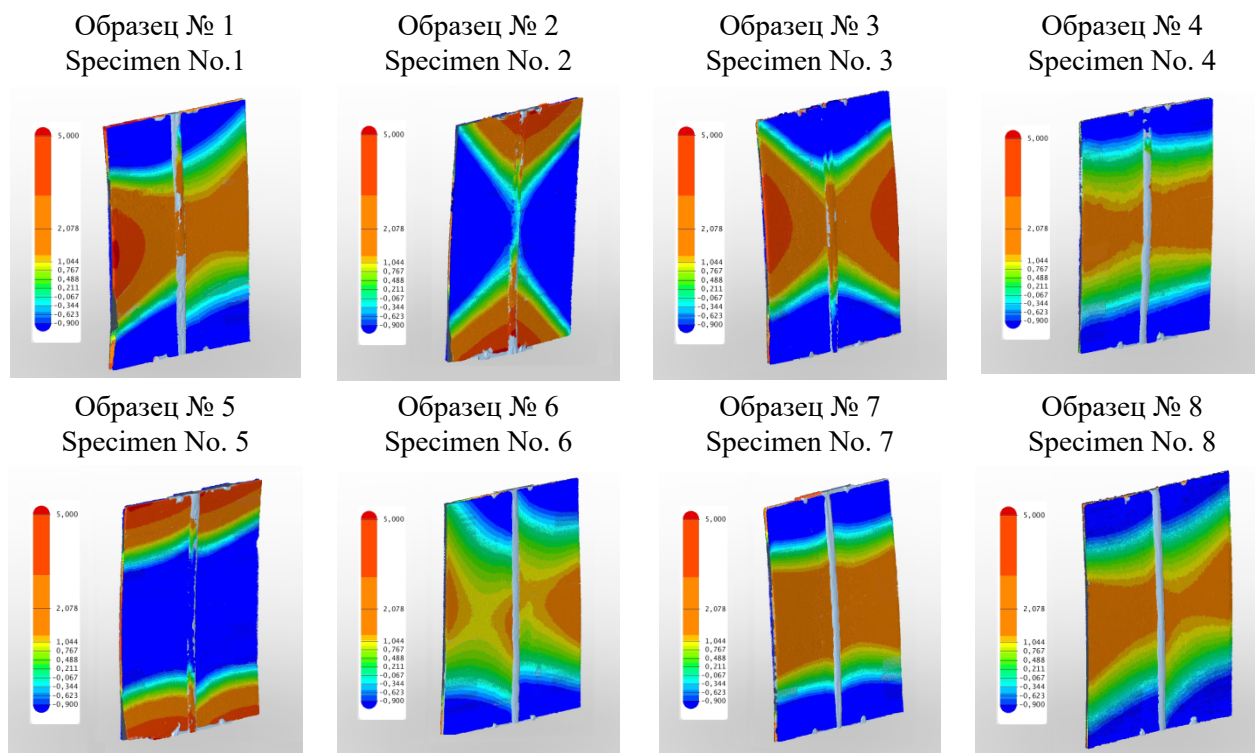


Рис. 4. Деформационная картина сварных образцов

Fig. 4. Deformation pattern of welded specimens

Как видно из рис. 4, для образцов № 1, 3–8 характерна общая продольная деформация, признаком которой является выгиб образца лицевой стороны с максимумом в поперечной плоскости центральной части шва, причем на образцах № 2 и 5 имеется прогиб в направлении обратной стороны. В образце № 2 превалирует поперечная деформация с максимумами в начале и конце шва. В образцах № 3 и 6 наблюдается пропеллерность – поворот поперечного сечения относительно продольной оси, связанный со смешанным характером деформирования.

Минимальный уровень деформаций отмечен в образцах № 4, 6–8. Картина деформирования образцов № 4 и 8 схожа по значениям ширины зон с предельными размерами деформации. Наилучший результат достигнут в образце № 6.

Таким образом, высокие значения энергии дуги (600 А, 37 В, (2466 кДж/мм)) при использовании экспериментального флюса приводят к появлению как продольных, так и поперечных деформаций с прогибом до 5 мм. В промежуточном значении вводимой энергии 500 А, 37 В (2055,5 кДж/мм) наблюдается сложный характер деформирования, сочетающий как продольные,

так и поперечные деформации. При режиме 400 А, 37 В (1645 кДж/мм) выявлен минимум продольных деформаций, а также недостаточность сформированности корневого валика. Наиболее рациональным режимом сварки тонкостенных деталей толщиной 5 мм на экспериментальном флюсе с применением керамических подкладок является 450 А, 27 В (1350 кДж/мм), позволяющий сформировать полноценный валик как с лицевой, так и с обратной стороны, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 8713–79–С4, а также минимизировать остаточные деформации сварной конструкции.

В табл. 3 представлен результат статистического моделирования влияния режимов сварки на геометрические параметры получаемых швов при использовании экспериментального флюса.

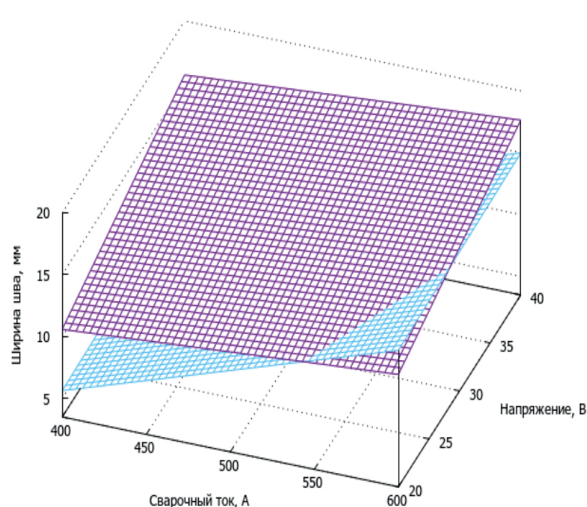
По полученным уравнениям регрессии построены графики (рис. 5), отображающие зависимость геометрических параметров швов от режимов сварки.

Повышение напряжения на дуге не вызывает такого значительного увеличения ширины шва с лицевой стороны, как повышение силы тока. И наоборот, повышение напряжения приводит к увеличению ширины корневого валика, а по-



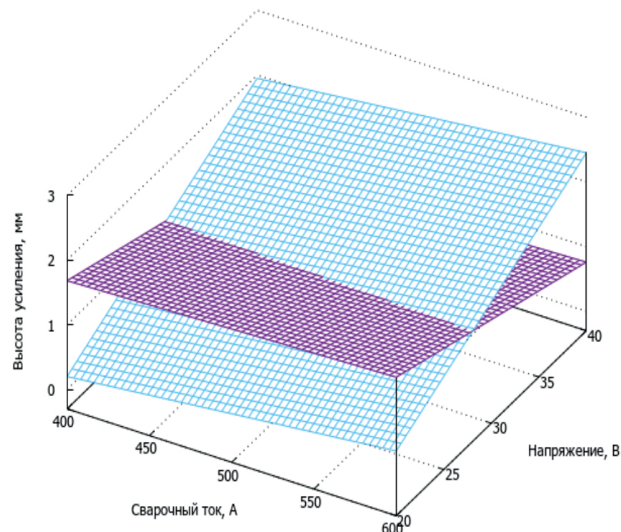
**Результат двухфакторного эксперимента**  
**The result of a two-factor experiment**

Опыт	$X_1$	$X_2$	Ширина шва	Ширина корня шва	Высота шва	Высота корня шва
1	600	37	15,9	16,3	1	1
2	600	37	18	13,5	0	4
3	500	37	17,4	11	2	1
4	400	37	14	5,5	0,5	2
5	450	37	15	9	0,5	2
6	450	27	12,5	8	1	0,5
7	500	27	12,5	9,3	2	1
8	500	27	13,1	10,2	2	0,5
Уравнение регрессии			$Y = 1,52 + 0,01X_1 + 0,253X_2$	$Y = -12,62 + 0,0445X_1 + 0,0225X_2$	$Y = 2,44 + 0,0008X_1 - 0,054X_2$	$Y = -2,55 + 0,0025X_1 + 0,0875X_2$



— лицевая сторона шва  
 — obverse side of the weld

*a*



— обратная (корневая) сторона шва  
 — reverse (root) side of the weld

*б*

**Рис. 5.** Графики зависимости ширины (*a*) и высоты усиления (*б*) шва из уравнений регрессии для сварки пластин толщиной 5 мм от режимов сварки

**Fig. 5.** Graphs of the dependence of the width (*a*) and the height of the reinforcement (*б*) of the seam from the regression equations for welding plates with a thickness of 5 mm on the welding modes

вышение значения силы сварочного тока не влияет на этот параметр (рис. 5, *a*).

Как видно из рис. 5, *б*, установленный диапазон режимов сварки 400–600 А, 25–40 В не

оказывает существенного влияния на высоту усиления шва с лицевой стороны, но весьма существенно влияет на возрастание усиления корневого валика.

Решением системы из четырех уравнений регрессии найден оптимальный режим сварки, позволяющий получить номинальные значения геометрических параметров шва: 550 А, 30 В.

### Выводы

Разработанный экспериментальный флюс позволяет получать сварные соединения с минимальными остаточными деформациями, не имеющие внутренних дефектов.

В процессе сварки деталей толщиной 5 мм на экспериментальном флюсе с применением керамических подкладок погонная энергия дуги 600 А, 37 В, (2000–2466 кДж/мм) оказывается избыточной, приводит к активному взаимодействию сварочной ванны и материала подкладки и к появлению как продольных, так и поперечных деформаций с прогибом до 5 мм. При режиме 400 А, 37 В выявлен минимум продольных деформаций и недостаточность сформированности корневого валика. Наиболее рациональным режимом сварки является 450 А, 27 В (1350 кДж/мм), позволяющий сформировать полноценный валик как с лицевой, так и с обратной стороны, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 8713–79-С4, а также минимизировать остаточные деформации сварной конструкции.

Установлено, что повышение напряжения на дуге приводит к увеличению ширины корневого валика и не оказывает значительного влияния на ширину шва с лицевой стороны. Повышение силы сварочного тока, напротив, увеличивает ширину шва с лицевой стороны и не влияет на ширину корневого валика. Установленный диапазон режимов сварки 400–600 А, 25–40 В не оказывает влияния на высоту усиления шва с лицевой стороны, но весьма существенно влияет на величину усиления корневого валика.

Определен оптимальный режим сварки стыковых соединений листов низкоуглеродистой стали толщиной 5 мм, позволяющий получить номинальные значения геометрических параметров шва по ГОСТ 8713–79-С4: скорость сварки 54 см/мин, сила сварочного тока 550 А, напряжение на дуге 30 В.

### Список литературы

1. *Верхотуров А.Д., Бабенко Э.Г., Макиенко В.М.* Методология создания сварочных материалов / под

ред. Б.А. Воронова. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2009. – 128 с. – ISBN 978-5-262-00458-4.

2. Evaluation of the influence of slag heaps on the state of the urban residential area / T.V. Sviridova, O.B. Bobrova, A.Yu. Peryatinsky, E.A. Nekarov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 537 (6). – DOI: 10.1088/1757-899X/537/6/062009.

3. *Хаматова А.Р., Хохряков О.В.* Электросталеплавильный шлак ОАО «Ижсталь» для цементов низкой водопотребности и бетонов на их основе // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – № 2 (36). – С. 221–227.

4. Utilization of steel slag for Portland cement clinker production / P.E. Tsakiridis, G.D. Papadimitriou, S. Tsiivilis, C. Koroneos // Journal of Hazardous Materials. – 2008. – Vol. 152 (2). – P. 805–811. – DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.07.093.

5. Patent № 201610570916 China, XA. Mixed slag-smelting reduction production and thermal refining method: filed 18.07.2016: publ. 04.05.2018 / Chzhan Wu.

6. Patent № 6391086 United States of America, B1. Method for the use of electric steel plant slag for self-reducing agglomerates: filed 20.03.2001: publ. 30.10.2002 / M. Albuquerque Contrucci, E.S. Marcheze.

7. Patent № 6033467 United States of America, A. Method of making cement or mine backfill from base metal smelter slag: filed 08.05.1998: publ. 07.03.2000 / D. Krofchak.

8. Patent № 5944870 United States of America, A. Method of manufacturing pig iron or steel and cement clinker from slags: filed 07.02.1995: publ. 07.02.2016 / A. Edlinger.

9. *Song Q., Shen B., Zhou Z.* Effect of blast furnace slag and steel slag on cement strength, pore structure and autoclave expansion // Advanced Materials Research. – 2011. – Vol. 168–170. – P. 17–20. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.168-170.17.

10. EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use / M. Skaf, M.J. Manso, A. Aragon, J.A. Fuente-Alonso, V. Ortega-López // Resources, Conservation and Recycling. – 2017. – Vol. 120. – P. 176–185. – DOI: 10.1016/j.resconrec.2016.12.009.

11. *Технология вяжущих веществ* / В.Н. Юнг, Ю.М. Бутт, В.Ф. Журавлев, С.Д. Окорочков. – М.: Госстройиздат, 1952. – 600 с.

12. *Проблемы развития безотходных производств* / Б.Н. Ласкорин, Б.В. Громов, А.П. Цыганков, В.Н. Сенин. – М.: Стройиздат, 1981. – 207 с.

13. Scrap deficit problem at the Amurstal metallurgical plant and search for alternatives to substitute it / P.V. Bakhmatov, E.A. Startsev, V.V. Grigor'ev, A.A. Bryanskii // Metallurgist. – 2022. – Vol. 66 (3). – P. 376–382. – DOI: 10.1007/s11015-022-01339-6.

14. Современное состояние переработки шлаков сталеплавильного производства / С.С. Бельский, А.А. Зайцева, А.А. Тютрин, З.З. Исмоилов, А.Н. Баранов, Ю.В. Сокольников // *iPolytech Journal*. – 2021. – Т. 25 (6). – С. 782–794. – DOI: 10.21285/1814-3520-2021-6-782-794.

15. ИТС 26–2017. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Производство чугуна, стали и ферросплавов: дата введ. 2018–07–01. – М.: Бюро НТД, 2017. – 478 с.

16. Разработка новых сварочных флюсов и флюс-добавок для сварки и наплавки стали на основе техногенных отходов металлургического производства / Н.А. Козырев, Р.Е. Крюков, Н.Е. Крюков, И.Н. Ковальский, А.А. Усольцев // *Заготовительные производства в машиностроении*. – 2017. – Т. 15, № 6. – С. 249–254.

17. Разработка новых сварочных флюсов на основе шлака силикомарганца и ковшевого электрошлака / Н.А. Козырев, Р.Е. Крюков,

А.Р. Михно, А.А. Усольцев, А.А. Уманский // *Сварочное производство*. – 2020. – № 2 (1023). – С. 16–21.

18. Структурно-фазовые состояния и поверхность разрушения электродуговой наплавки и сварных швов / Р.Е. Крюков, В.Е. Громов, Н.А. Козырев, Ю.Ф. Иванов, Ю.А. Шлярова. – Новокузнецк: СибГИУ, 2022. – 136 с. – ISBN 978-5-7806-0585-0.

19. *Bakhmatov P.V., Startsev E.A., Sobolev B.M.* Impact and effect study of submerged-arc welding conditions on structural changes in weld metal // *Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2021. – Vol. 200. – P. 65–76. – DOI: 10.1007/978-3-030-69421-0\_8.

20. Патент № 2793303 С1 Российская Федерация, МПК В23К 35/362, В23К 35/40, С21С 5/54. Способ изготовления сварочного флюса из техногенных отходов сталеплавильного производства: № 2022128798: заявл. 07.11.2022: опубл. 31.03.2023, Бюл. № 10 / П.В. Бахматов, Е.А. Старцев, Р.Е. Гладовский, Б.М. Соболев.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2023 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



# Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## The influence of automatic arc welding modes on the geometric parameters of the seam of butt joints made of low-carbon steel, made using experimental flux

Egor Startsev<sup>a, \*</sup>, Pavel Bakhmatov<sup>b</sup>

Komsomolsk-na-Amure State University, 27 Lenin Avenue, Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russian Federation

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5811-7071>, [egorstarts@inbox.ru](mailto:egorstarts@inbox.ru); <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4271-0428>, [mim@knastu.ru](mailto:mim@knastu.ru)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 15 September 2023

Revised: 20 September 2023

Accepted: 27 September 2023

Available online: 15 December 2023

#### Keywords:

Submerged welding

Welding modes

Geometric parameters of the seam

The quality of the welded joint

#### Funding

The study was carried out with financial support from the funds of the Federal State Educational Institution of Higher Education “KNAU” under the research project No. VN001/2020 “Development of an algorithm and study of the process of programmable control of the formation of a welding/surfacing roller (including the use of additive technologies) on an automatic welding installation” (2020–2023).

#### Acknowledgements

Research was partially conducted at core facility “Structure, mechanical and physical properties of materials”.

### ABSTRACT

**Introduction.** The metallurgical industry in the territory of the Russian Federation has accumulated a significant amount of slags obtained during the smelting of steels and cast iron. The presence of slag dumps adversely affects the ecology of regions with metallurgical enterprises. When reducing iron from slags, the by-product becomes an oxide agglomerate, which can be considered as a flux composition for arc welding/surfacing under a layer of flux, fillers of powder wires, coatings of welding stick electrodes. **The purpose of the work** is to establish the possibility of arc welding using the flux obtained by the authors and to determine the optimal welding modes with the condition of achieving the geometric parameters of the seam according to *GOST 8713-79* and the quality of the welded joint (absence of internal defects). In this paper, butt welded joints of sheet steel *VSt3sp* with a thickness of 5 mm obtained by automatic welding under a layer of flux at direct current with forced formation of a root roller on ceramic linings using flux from recycled metallurgical slag of an electric steelmaking enterprise **are investigated**. Automatic welding of flat specimens was carried out on a tractor-type *ADF-1250* machine with a wire with a diameter of 3 mm, at a constant welding speed of 54 cm/min with varying current and arc voltage within 400–600 A and 27–37 V. **The methods of investigation:** Visual measuring and radiographic control, determination of deformation of specimens by laser scanning and computer processing of 3D models were used to evaluate the quality of welded joints. Statistical modeling in the form of a two-factor experiment was also used in the work, with obtaining adequate regression equations of the influence of welding modes on the geometric parameters of the seam: the height of reinforcement and the width of the seam on the front and back of the joint. **Results and discussion.** The possibility of obtaining welding fluxes from metallurgical slags of an electric steelmaking enterprise and its use for creating welded joints is shown. Optimal modes of arc welding of thin-walled sheet parts made of low-carbon steel with forced formation of a root roller on ceramic linings is established, ensuring the absence of internal defects in the form of pores, cracks and lacks of penetration, a minimum of residual deformations and compliance of the weld size with the requirements of the existing standard. The nominal values of the geometric parameters of the seam according to *GOST 8713-79-C4* correspond to welding mode: welding speed 54 cm/min, welding current 550 A, arc voltage 30 V. The results of the work can be applied in metallurgical electric steelmaking enterprises producing low-carbon steel in the development of technologies for the use of welding materials from slag.

**For citation:** Startsev E.A., Bakhmatov P.V. The influence of automatic arc welding modes on the geometric parameters of the seam of butt joints made of low-carbon steel, made using experimental flux. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 4, pp. 61–73. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-61-73. (In Russian).

### References

1. Verkhoturov A.D., Babenko E.G., Makienko V.M. *Metodologiya sozdaniya svarochnykh materialov* [Methodology of creation of welding materials]. Khabarovsk, Far Eastern State Transport University Publ., 2009. 128 p. ISBN 978-5-262-00458-4.
2. Sviridova T.V., Bobrova O.B., Peryatinsky A.Yu., Nekero E.A. Evaluation of the influence of slag heaps on the state of the urban residential area. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 537 (6). DOI: 10.1088/1757-899X/537/6/062009.

#### \* Corresponding author

Startsev Egor A., Senior lecturer

Komsomolsk-na-Amure State University, 27 Lenin Ave., 681013, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation

Tel.: +7 (914) 188-05-45, e-mail: [egorstarts@inbox.ru](mailto:egorstarts@inbox.ru)





3. Khamatova A.R., Khohryakov O.V. Elektrostaleplavil'nyi shlak OAO «Izhstal» dlya tsementov nizkoi vodopotrebnosti i betonov na ikh osnove [The electro-steel-smelting slag JSC «Izhstal» for cements of low water demand and concrete on their basis]. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta* = *News KSUAE*, 2016, no. 2 (36), pp. 221–227.
4. Tsakiridis P.E., Papadimitriou G.D., Tsivilis S., Koroneos C. Utilization of steel slag for Portland cement clinker production. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, vol. 152 (2), pp. 805–811. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.07.093.
5. Wu Chzhan. *Mixed slag smelting reduction production and thermal refining method*. Patent of China, no. 201610570916, 2018.
6. Albuquerque Contrucci M., Marcheze E.S. *Method for the use of electric steel plant slag for self-reducing agglomerates*. Patent US, no. 6391086, 2002.
7. Krofchak D. *Method of making cement or mine backfill from base metal smelter slag*. Patent US, no. 6033467, 2000.
8. Edlinger A. *Method of manufacturing pig iron or steel and cement clinker from slags*. Patent US, no. 5944870, 2016.
9. Song Q., Shen B., Zhou Z. Effect of blast furnace slag and steel slag on cement strength, pore structure and autoclave expansion. *Advanced Materials Research*, 2011, vol. 168–170, pp. 17–20. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.168-170.17.
10. Skaf M., Manso M.J., Aragon A., Fuente-Alonso J.A., Ortega-López V. EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, vol. 120, pp. 176–185. DOI: 10.1016/j.resconrec.2016.12.009.
11. Yung V.N., Butt Yu.M., Zhuravlev V.F., Okorokov S.D. *Tekhnologiya vyazhushchikh veshchestv* [Technology of binders]. Moscow, Gosstroizdat Publ., 1952. 600 p.
12. Laskorin B.N., Gromov B.V., Tsygankov A.P., Senin V.N. *Problemy razvitiya bezotkhodnykh proizvodstv* [Problems of development of waste-free production]. Moscow, Stroizdat Publ., 1981. 207 p.
13. Bakhmatov P.V., Startsev E.A., Grigor'ev V.V., Bryanskii A.A. Scrap deficit problem at the Amurstal metallurgical plant and search for alternatives to substitute it. *Metallurgist*, 2022, vol. 66 (3), pp. 376–382. DOI: 10.1007/s11015-022-01339-6.
14. Belskii S.S., Zaitseva A.A., Tyutrin A.A., Ismoilov Z.Z., Baranov A.N., Sokolnikova Yu.V. Current state of steelmaking slag processing. *iPolytech Journal*, 2021, vol. 25 (6), pp. 782–794. DOI: 10.21285/1814-3520-2021-6-782-794.
15. ITS 26–2017. *Informatsionno-tekhnicheskii spravochnik po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam. Proizvodstvo chuguna, stali i ferrosplavov* [ITS 26–2017. Information and technical guide to the best available technologies. Production of pig iron, steel and ferroalloys]. Moscow, Byuro NTD Publ., 2017. 478 p.
16. Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Kryukov N.E., Koval'skii I.N., Usol'tsev A.A. Razrabotka novykh svarochnykh flyusov i flyus-dobavok dlya svarki i naplavki stali na osnove tekhnogennykh otkhodov metallurgicheskogo proizvodstva [Development of new welding fluxes and flux-additives for welding and surfacing steel on basis of technogenic wastes of metallurgical production]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii* = *Blanking productions in mechanical engineering*, 2017, vol. 15 (6), pp. 249–254.
17. Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Mikhno A.R., Usoltsev A.A., Umanskiy A.A. Razrabotka novykh svarochnykh flyusov na osnove shlaka silikomargantsa i kovshevogo elektrostaleplavil'nogo shlaka [Development of new welding fluxes based on silicomanganese slag and ladle electric steel-smelting slag]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2020, no. 2, pp. 16–21. (In Russian).
18. Kryukov R.E., Gromov V.E., Kozyrev N.A., Ivanov Yu.F., Shlyarova Yu.A. *Strukturno-fazovye sostoyaniya i poverkhnost' razrusheniya elektrodugovoi naplavki i svarnykh shvov* [Structural-phase states and fracture surface of electric arc surfacing and welds]. Novokuznetsk, SibGIU Publ., 2022. 136 p. ISBN 978-5-7806-0585-0.
19. Bakhmatov P.V., Startsev E.A., Sobolev B.M. Impact and effect study of submerged-arc welding conditions on structural changes in weld metal. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2021, vol. 200, pp. 65–76. DOI: 10.1007/978-3-030-69421-0\_8.
20. Bakhmatov P.V., Startsev E.A., Gladovskij R.E., Sobolev B.M. *Sposob izgotovleniya svarochnogo flyusa iz tekhnogennykh otkhodov staleplavil'nogo proizvodstva* [Method for manufacturing welding flux from man-made waste of steelmaking]. Patent RF, no. 2022128798, 2023.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.