



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Оценка проплавляющей способности оксидных флюсов при сварке новыми методами А-TIG углеродистых и низколегированных сталей

Антонина Карлина^{1, 2, а, *}, Виталий Гладких^{1, б}, Георгий Курдюмов^{2, в},
 Роман Кононенко^{3, д}, Виктор Кондратьев^{2, 4, е}

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Ярославское шоссе, 26, г. Москва, 129337, Россия

² Череповецкий государственный университет, ул. Луначарского, 5, г. Череповец, 162602, Россия

³ Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, г. Иркутск, 664074, Россия

⁴ Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук, ул. Фаворского, стр. 1А, г. Иркутск, 664033, Россия

^а  <https://orcid.org/0000-0003-3287-3298>,  karlinat@mail.com; ^б  <https://orcid.org/0000-0003-1953-1584>,  gladkich_87@mail.ru;

^в  <https://orcid.org/0009-0000-8373-1412>,  gekurdiunov@chsu.ru; ^д  <https://orcid.org/0009-0001-5900-065X>,  istu_politech@mail.ru;

^е  <https://orcid.org/0000-0002-7437-2291>,  imz@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.791

История статьи:

Поступила: 18 января 2026

Рецензирование: 14 марта 2026

Принята к печати: 21 марта 2026

Доступно онлайн: 15 июня 2026

Ключевые слова:

Сварка

Активирующие флюсы

Глубина проплавления

Толщина покрытия

АННОТАЦИЯ

Введение. Цель настоящей работы – оценка технологического потенциала применения оксидных активирующих флюсов по новым методам FB-TIG и FZ-TIG для повышения эффективности проплавления и качества сварочного процесса углеродистых и низколегированных сталей. В работе предпринята попытка рассмотреть и проанализировать опубликованную литературу, которая касается выдвижения различных гипотез, объясняющих причины высокого проплавления, достигаемого с помощью методов применения активирующих флюсов. **Материалы и методы исследований.** В работе использовались образцы низколегированной стали толщиной от 3 до 10 мм. Мелкодисперсные порошки флюса были предварительно диспергированы в ацетоне. Флюс аккуратно наносился на верхнюю часть пластины кистью до половины длины пластины. Другая половина длины пластины оставалась без флюса для проведения обычной TIG-сварки для сравнения. Сварные швы выполнялись в конфигурации «вал на пластине» без добавления какого-либо присадочного материала. Было выполнено несколько параллельных дорожек с достаточным расстоянием между ними для исключения теплового воздействия. Ток дуги варьировался в диапазоне 80...250 А, скорость сварки поддерживалась постоянной на уровне 100 мм/мин. Напряжение сварки было установлено на уровне 15...16 В. Тепловая энергия рассчитывалась с использованием общепринятого выражения, предполагающего эффективность теплопередачи 0,8. Защитным газом служил высокочистый аргон промышленного класса, расход газа был установлен на уровне 20 л/мин. Для оптических исследований использовался стандартный оптический микроскоп, для съемки процесса – фотоаппарат. **Результаты и обсуждение.** Исследования показали, что глубина проплавления в основном зависит от таких факторов сварки, как длина дуги (мм), сварочный ток (А) и скорость подачи (мм/с). Отношение параметра глубины к ширине (DWR) получается высоким для метода FB-TIG. Кроме того, улучшается внешний вид поверхности и отслаиваемость шлака. Анализируется влияние кислотного и щелочного характера флюса на геометрию сварного шва и внешний вид поверхности. Кислотные флюсы обеспечивают более гладкую поверхность сварного шва, чем щелочные оксидные флюсы. Сварка активированным FB-TIG и FZ-TIG с использованием флюса SiO₂ увеличивает глубину проплавления и отношение глубины к ширине шва в 1,5 и 1,7 раза соответственно по сравнению с А-TIG-сваркой.

Для цитирования: Оценка проплавляющей способности оксидных флюсов при сварке новыми методами А-TIG углеродистых и низколегированных сталей / А.И. Карлина, В.А. Гладких, Г.Е. Курдюмов, Р.В. Кононенко, В.В. Кондратьев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2026. – Т. 28, № 2. – С. 49–71. – DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28-2-49-71.

Введение

В настоящее время дуговая сварка имеет множество вариантов. В литературе по плазменной науке наиболее широко рассматриваются сварка вольфрамовым электродом в инертном газе (TIG) (также известная как газодуговая сварка вольфрамовым электродом или GTAW) и сварка

*Адрес для переписки

Карлина Антонина Игоревна, к.т.н., научный сотрудник
 Национальный исследовательский Московский
 государственный строительный университет,
 Ярославское шоссе, 26,
 129337, г. Москва, Россия
 Тел.: +7 950 120-19-50, e-mail: karlinat@mail.ru

металлом в инертном газе (MIG) или металлом в активном газе (MAG) (последние две также известны как газодуговая сварка металлом или GMAW).

В TIG-сварке электродом обычно является катод, представляющий собой цилиндр из вольфрама, заточенный до конического кончика. Вольфрам обычно легируют редкоземельным элементом, таким как торий или лантан, для снижения работы выхода, тем самым уменьшая температуру, при которой может происходить термоэлектронная эмиссия электронов. TIG-сварка широко изучалась исследователями плазмы, поскольку это относительно простой процесс. Как отмечалось выше, охлаждение заготовки водой позволяет получить свободно горящую дугу, стабильную в течение десятков минут (это ограничивается лишь постепенной эрозией кончика электрода) с незначительным загрязнением парами металла, что упрощает как измерения, так и моделирование. Стандартными защитными газами являются аргон, гелий и смеси аргона и гелия; иногда добавляют небольшое количество водорода.

С развитием промышленности возрастают требования к эффективности сварки. Однако в традиционной GTAW и GMAW конфликт между высокой эффективностью наплавки и низким тепловым воздействием на основной металл противоречит концепции высокой эффективности. Разработка новых и высокоэффективных сварочных процессов стала актуальной областью исследований. Сварка TIG известна своей стабильностью и способностью обеспечивать высококачественные сварные швы [1, 2]. При сварке TIG в качестве источника тепла используется свободно горящая дуга, энергия дуги не концентрируется [3–5], а проплавление низкое [5–15], полное проплавление достигается только в тонких пластинах [5–7]. Эффективность сварки толстых пластин низкая. Кроме того, токовая нагрузка вольфрамовых электродов ограничена [5, 6]. При высоких токах возникает эрозия или даже повреждение, это сокращает срок службы сварочной горелки и влияет на качество сварного шва [4–6]. Поэтому улучшение проплавляющей способности процесса сварки TIG имеет большое значение [5–15]. Так, например, сужение дугового столба для увеличения плотности энергии является эффективным методом повышения эффективности сварки [1–6].

В плазменно-дуговой сварке (ПАВ) к головке горелки добавляется сопло малого диаметра с водяным охлаждением [16]. Дуга преобразуется в сильно суженную дугу под комбинированным воздействием механического ограничения [17], теплового ограничения [18] и электромагнитного ограничения [14, 15]. В процессе сварки легко образуется эффект «замочной скважины», и эффективность сварки значительно повышается [10–15]. Процесс сварки GF-PAW был предложен [19], когда между плазменным газом и защитным газом сварочной горелки PAW добавляется фокусирующий газ с небольшим расходом для создания дополнительного эффекта газового ограничения плазменной дуги. Диаметр дуги уменьшается, а проплавление увеличивается. Однако фокусирующий газ имеет очень ограниченный диапазон регулировки для обеспечения стабильности плазменной дуги из-за узкого канала, и он практически не увеличивает давление дуги. Для ограничения дуги K-TIG было разработано устройство с остриями магнитного поля и водяным охлаждением постоянных магнитных полюсов [20]. Пороговый ток для полного проплавления в системе был уменьшен на 30 А, но магнитный полюс легко повреждается при высоких температурах. Данный процесс может увеличить глубину проплавления в 2...3 раза при сварке нержавеющей стали 304, но при этом сварочный металл имеет более высокое содержание кислорода.

Авторы применили двухзащитную TIG-сварку для сварки сверхтонких металлических пластин [21]. Таким образом, подводя итог вышеописанной оптимизации, можно сказать, что ограничение потока газа может повысить плотность энергии дуги и обеспечить стабильность процесса сварки. В двухзащитной TIG-сварке внутренний поток газа должен быть достаточно высоким для повышения способности к проплавлению дуги, иначе внешний активный газ увеличит плотность кислорода в сварочном металле. Для более эффективного использования внутреннего потока газа необходимо провести дальнейшие улучшения.

В настоящее время предложено много технических и технологических решений по увеличению энергоэффективности TIG-сварки. На основе имеющейся литературы [6–35] были определены два направления повышения плот-

ности энергии дуги. Первый – это контроль и уменьшение пространства дуги, т. е. сжатие и ограничение дуги. Второй – увеличение количества и энергии частиц в дуге. Основные методы достижения вышеупомянутых целей: добавление энергии в дугу, изменение ионизации дуги и увеличение теплоотдачи дуги.

Например, многоэлектродная TIG-сварка с применением вольфрамовых электродов (MT-TIG) включает в себя двухэлектродную TIG-сварку (T-TIG), конденсационную TIG-сварку (C-TIG) и MT-TIG [34, 35]. Типичными характеристиками этих методов являются использование двух, трех или более вольфрамовых электродов, изолированных друг от друга в выровненном массиве, вместо традиционного вольфрама. К группам вольфрамовых электродов подключается несколько источников питания, и между несколькими электродами формируется соединительная дуга. Необходимые характеристики дуги достигаются путем логического управления несколькими источниками питания для удовлетворения требований высокой эффективности наплавки и высокоскоростной сварки.

Метод сварки TIG с образованием сквозного отверстия (K-TIG) [35] был предложен Австралийской организацией научных и промышленных исследований (CSIRO) в 1997 году. Принцип K-TIG заключается в использовании специального источника энергии для дуговой сварки с уникальной конструкцией сварочной горелки, а именно с вольфрамовым электродом большого диаметра (обычно более 6 мм), большого критического тока (более 600...650 А) и высокого напряжения (16...20 В). В результате дуга сжимается, плотность энергии значительно повышается, жесткость и глубина проплавления дуги возрастают, а глубина проплавления увеличивается [35].

C-TIG – это новый метод дуговой сварки [35], где дуга защищена двумя слоями защитного газа – внутренним и внешним. Три параллельных вольфрамовых электрода питаются от трех независимых источников питания. Для направления дуги используются правильно спроектированные отклоняющие вольфрамовые электроды, так что три параллельные дуги сходятся в одну. Ток протекает через три вольфрамовых электрода, и ток связанной дуги, образованной тремя параллельными дугами, эквивалентен сумме токов

трех вольфрамовых электродов. Следовательно, общий сварочный ток через связанную дугу может быть чрезвычайно большим.

Одновременно высокая температура, создаваемая сильным током, усиливает термическую ионизацию газа в центре дуги и термоэлектронную эмиссию в электроде; кроме того, энергия дуги значительно возрастает. В сочетании с термическим сжатием и сдерживающим эффектом внешнего защитного газа плотность энергии дуги дополнительно увеличивается.

Другим направлением повышения эффективности метода сварки TIG является дополнительное физико-химическое воздействие на сварочную ванну с применением активирующих флюсов [6–15]. Первые работы в этом направлении были выполнены в СССР [6–15], в качестве свариваемого материала использовали титан, и удалось существенно увеличить глубину проплавления. Недостатком является то, что TIG-сварка соединяет тонкие листы титана за один проход. Для соединения толстых пластин требуется механическая обработка канавок и подача присадочного материала. Скорость осаждения материала низкая, а зерна в зоне плавления имеют тенденцию к увеличению размера, что приводит к ухудшению свойств соединения. В дальнейшем положительный опыт распространили на конструкционные и нержавеющие стали. В этом процессе на свариваемую поверхность наносится тонкий слой флюса, после чего выполняется TIG-сварка. Обычно используются оксиды, хлориды и фториды флюсов. Флюсы наносятся на поверхность после смешивания с подходящим растворителем, таким как ацетон или этанол, в соответствующей пропорции с помощью кисти или распыления.

Первичным эффектом применения флюса во время сварки TIG является заметное увеличение напряжения дуги [6, 7]. Традиционно во время сварки TIG напряжение на сварочной дуге возрастает с ростом длины дуги. Например, при длине дуги 2,5 мм напряжение составляет 9,8...10 В, а при длине дуги 10 мм – уже 14,5...14,8 В. Однако увеличение длины дуги во время сварки TIG ухудшает защиту сварочной ванны и увеличивает расход защитного газа. Сварка A-TIG, по результатам большого количества опубликованных работ [6–25], успешно обеспечивает большую глубину проплавления

(DOP) для различных материалов, включая углеродистую сталь [6–8], титановые сплавы [6–10], нержавеющие стали [5–15] и др. Кроме того, в настоящее время появились работы, где были разработаны и экспериментально исследованы новые варианты сварки FB-TIG и FZ-TIG [22–24] путем изменения геометрического расположения флюсов на поверхности свариваемого металла.

При сварке FB-TIG две полосы флюса наносят по обе стороны от центральной линии сварного шва, оставляя небольшой зазор в центре пластины, тогда как при сварке FZ-TIG на боковые поверхности сварного шва наносится флюсовый слой с высокой температурой плавления, высокой температурой кипения и низкой электропроводностью, а на центральные участки поверхности сварного шва наносится флюсовый слой с низкой температурой плавления, низкой температурой кипения и высокой электропроводностью соответственно [22–28].

В работе [25] было проведено сравнительное исследование влияния однокомпонентных флюсов на отношение глубины к ширине (DWR) бескислородной меди с использованием новых вариантов сварки A-TIG и флюсов MoO_3 и MgO . Глубина проплавления возрастает.

В последнее время новые методы FB-TIG и FZ-TIG (варианты сварки A-TIG) также изучались в контексте улучшения DWR и общих свойств сварного шва. Авторы [25] показали, что сварка FB-TIG алюминиевого сплава AA 2219-T87 с использованием флюса SiO_2 обеспечивает эстетически более качественную сварку без трещин и с образованием жидких шлаков по сравнению с традиционными методами TIG. Кроме того, предел прочности на разрыв и предел текучести сварного шва заметно улучшились – на 50...54 %.

Исследование FB-TIG [26] на коммерчески чистом алюминии с использованием флюсов с различным размером частиц, таких как SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 и Cr_2O_3 , показало, что флюс с малым размером частиц увеличивает проплавление на 30 % по сравнению с флюсом с крупными частицами. Кроме того, зазор между флюсами играет решающую роль в достижении высокой степени сварного шва. Когда зазор между флюсами поддерживался в диапазоне 4...5 мм, степень отношения глубины к ширине (DWR) свар-

ного шва увеличивалась как минимум в пять раз по сравнению с обычной TIG-сваркой [6–15].

Авторы работы [28] считают FZ-TIG наиболее передовой технологией, которая, как сообщается, объединяет преимущества как A-TIG-, так и FB-TIG-вариантов TIG-сварки. Они применили эту новую технологию к алюминиевому сплаву A3003, используя специально изготовленный флюс FZ108, содержащий смесь нескольких галогенидов и элементарных веществ в качестве центрального флюса, а SiO_2 был выбран в качестве бокового флюса. Результаты неожиданно показали, что степень сварного шва, достигнутая с помощью FZ-TIG, более чем в три раза превышала степень сварного шва обычной TIG-сварки и почти в два раза превышала степень сварного шва A-TIG. Другие авторы [29] также сообщили о трехкратном увеличении глубины проплавления по сравнению с обычной TIG-сваркой с заметным улучшением механических свойств алюминиевого сплава.

В работах большого количества авторов отмечается, что флюсы на основе оксидов, такие как SiO_2 , MoO_3 , MoS_2 , CrO_3 и TiO_2 , значительно увеличивают глубину проплавления (DOP) на различных материалах и во многих случаях обеспечивают сквозное проплавление (проплавление выходит за пределы толщины пластины) для обычной TIG-сварки. Заметное увеличение проплавления наблюдается благодаря добавлению H_2 в защитный газ. Добавление гелия также способствует увеличению DOP. Поведение дуги показывает сужение дугового столба во время активированной TIG-сварки, и наблюдается положительное течение, вызванное поверхностным натяжением, в центростремительном (внутри) направлении.

В проанализированной литературе были предложены различные виды сварочных работ и технологии их измерения [6–49]. В некоторых исследованиях описаны интересные аспекты метода и рекомендации измерения качества сварки A-TIG. В то же время при кратком анализе результатов работ различных авторов [6–49] и анализе других научных работ в этом направлении мы не нашли исследований новых методов для сварки низкоуглеродистой стали. В нашей предыдущей работе [50] мы уже приводили результаты испытаний оксидных флюсов при сварке A-TIG. С учетом этого представляет

научный интерес рассмотреть вопрос, как влияет размещение активированного флюса по методам FB-TIG и FZ-TIG на поверхности свариваемых изделий.

Цель работы: выполнить оценку проплавляющей способности при сварке по методам FB-TIG и FZ-TIG (оксидных флюсов FeO, TiO₂ и SiO₂) на углеродистых и низколегированных сталях. Для достижения поставленной цели в процессе исследования решались следующие задачи:

- определение технологических параметров процесса сварки FB-TIG и FZ-TIG с использованием оксидных флюсов FeO, TiO₂ и SiO₂ (силы тока, толщины покрытия, скорости сварки), влияющих на проплавляющую способность;
- металлографическое исследование характера структуры, формирующейся в сварных швах при сварке FB-TIG и FZ-TIG с использованием оксидных флюсов FeO, TiO₂ и SiO₂;
- визуализированные исследования процесса с фотофиксацией отдельных его стадий для

установления особенностей взаимодействия сварочной дуги с активированными флюсами при FB-TIG и FZ-TIG.

Методы и материалы исследований

В предыдущей нашей работе [50] мы подробно описали методику проведения исследований.

Материалы для проведения экспериментов

Из листов толщиной 3, 5, 10 мм вырезались прямоугольные пластины для сварки размерами 20×50 мм. Для каждой толщины было подготовлено по 60 образцов.

Дополнительные исследования проводились в случае неудовлетворительного формирования поверхности сварного шва (в части несплавления или плохого формирования).

Химический состав стали Ст3пс по ГОСТ 380–2005 приведен в табл. 1, стали 09Г2С по ГОСТ 19281–2014 – в табл. 2, стали 10ХСНД по ГОСТ 19281–2014 – в табл. 3.

Таблица 1
Table 1

Химический состав в % материала Ст3пс по ГОСТ 380–2005
Chemical composition (wt. %) of St3ps steel according to GOST 380–2005

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	As	Cu
0,14...0,22	0,5...1,5	0,4...0,65	До 0,3	До 0,04	До 0,04	До 0,3	До 0,08	До 0,3

Таблица 2
Table 2

Химический состав в % материала 09Г2С по ГОСТ 19281–2014
Chemical composition (wt. %) of 0.09 C-2 Mn-Si steel according to GOST 19281–2014

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	V	Cu
До 0,12	0,5...0,8	1,3...1,7	До 0,3	До 0,035	До 0,03	До 0,3	До 0,12	До 0,3

Таблица 3
Table 3

Химический состав в % материала 10ХСНД по ГОСТ 19281–2014
Chemical composition (wt. %) of 0.1 C-Cr-Ni-Cu steel according to GOST 19281–2014

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	V	Cu
До 0,12	0,8...1,1	0,5...0,8	0,5...0,8	До 0,035	До 0,03	0,6...0,9	До 0,12	0,4...0,6

Для исследований, как и в прошлой нашей работе [50], были использованы однокомпонентные флюсы в виде порошков оксидов (TiO_2 , SiO_2 , FeO) фракцией 40...80 мкм (производитель ООО «Реал-Дзержинск», РФ). Дополнительно использовали отходы производства кремния SiO_2 и пыль газоочистки FeSi . Пыль газоочистки производства кремния и ферросилиция состоит из оксидов: кремния 85,4 %, алюминия 10,46 %, железа 0,30 %, кальция 1,50 % и магния 1,24 % [14]. Перед сваркой образцы очищали ленточной шлифовальной машиной, а затем протирали ацетоном для предотвращения загрязнения поверхности.

Во время экспериментов по сварке сила сварочного тока дуги варьировалась в диапазоне 80...250 А, скорость сварки поддерживалась постоянной на уровне 100 мм/мин, напряжение сварки было установлено на уровне 15 В. Оборудование для сварки: источник тока MasterTig 300 AC/DC (Финляндия). Тепловая энергия рассчитывалась с использованием общепринятого выражения, предполагающего эффективность теплопередачи 0,8 [6–8]. Защитным газом служил высокочистый аргон по ГОСТ 10157–2016. Расход газа был установлен на уровне 20 л/мин. Компоненты флюса оптимизированы в более раннем исследовании [50]. Мелкодисперсные порошки флюса были предварительно диспергированы в ацетоне, полученный раствор по консистенции напоминал краску, которая в дальнейшем наносилась на поверхность образцов с использованием шаблона-трафарета. Толщина покрытия при нанесении варьировалась от 0,5 до 2 мм.

После сварки образцы были обработаны на отрезном станке STRUERS SECOTOM-15 (Дания) по всей длине каждого сварного шва для металлографического исследования. Проведена горячая запрессовка на оборудовании FlexPRESS-600. Образцы были тщательно отполированы с помощью полуавтоматического станка (Struers Laborol, Дания). Тонкая полировка выполнялась последовательно с использованием суспензии оксида алюминия и алмаза для получения зеркальной поверхности. Травление поверхности проводили 4%-м раствором азотной кислоты. Микроснимки области соединения были получены с помощью оптического микроскопа (микроскоп «Микромед МЕТ 2», Китай).

Общий макроскопический вид зоны сварного шва и зоны термического влияния был получен с помощью стереомикроскопа Olympus SZX16. Все измерения, касающиеся геометрии сварного шва, проводились с использованием программного обеспечения ImageJ.

Методология, принятая для проведения экспериментальной работы, представлена на рис. 1. Для получения информации о многочисленных микроструктурных свойствах в процессе сварки были применены различные методы дополнительных измерений, такие как высокоскоростная фотография камерой Nikon Z30 (способной сни-

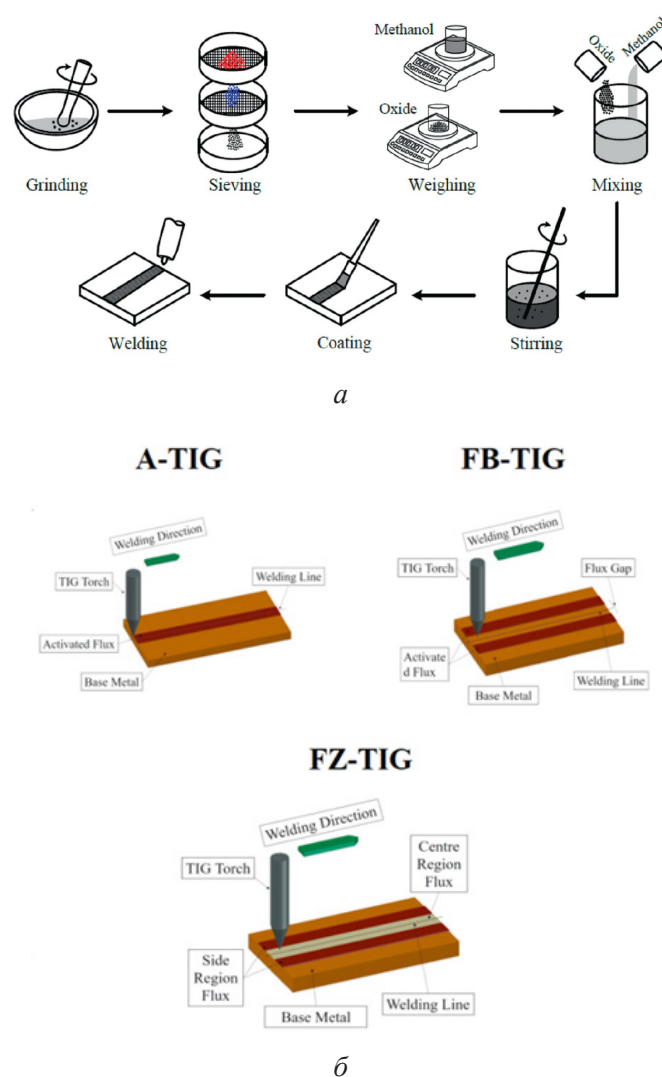


Рис. 1. Процедура подготовки активированного флюса [50] (а) и схематическое изображение вариантов новых методов сварки А-TIG с активированным флюсом (б)

Fig. 1. Procedure for preparing activated flux [50] and schematic representation of variants of new A-TIG welding methods with activated flux (b)

мать видео в формате 4K со скоростью до 30 кадров в секунду (fps)) и регистрация параметров тока и напряжения с использованием регистра-тора сварочных параметров (РСП-102Д).

Экспериментально исследованы варианты сварки FB-TIG и FZ-TIG путем изменения геометрического расположения флюсов. При сварке FB-TIG две полосы флюса наносят по обе стороны от центральной линии сварного шва, оставляя небольшой зазор в центре пластины, как показано на рис. 1, б, тогда как при сварке FZ-TIG на боковые и центральные участки поверхности сварного шва наносится флюсовый слой с высокой температурой плавления, высокой температурой кипения и низкой электропроводностью (например, SiO), а на боковые и центральные участки поверхности сварного шва наносится флюсовый слой с низкой температурой плавления, низкой температурой кипения и высокой электропроводностью соответственно (например, основные CaO, Al₂O₃ и др.), как показано на рис. 1, б. Для каждого значения силы тока и способа сварки испытывалось не менее

трех образцов. Далее определяли среднее значение геометрических параметров.

Результаты исследований

Макрографический вид зоны плавления с активирующим флюсом и без него показан на рис. 2–5. Граница зоны плавления отчетлива и видна на всех изображениях. Протравленная поверхность на некоторых образцах была настолько яркой, что отражала свет от портативной лампы, используемой со стереомикроскопом. Поэтому возникли трудности в создании достаточного контраста между различными микроскопическими областями на макроснимках. Макроснимки подтверждают отсутствие распространенных дефектов сварки (пористости, подрезов или трещин), наблюдаемых на сварных швах. Результаты измерений глубины проплавления и ширины шва при сварке FB-TIG и FZ-TIG приведены в табл. 4, 5. Видно, что способ нанесения активирующего флюса имеет большое значение. Типичные

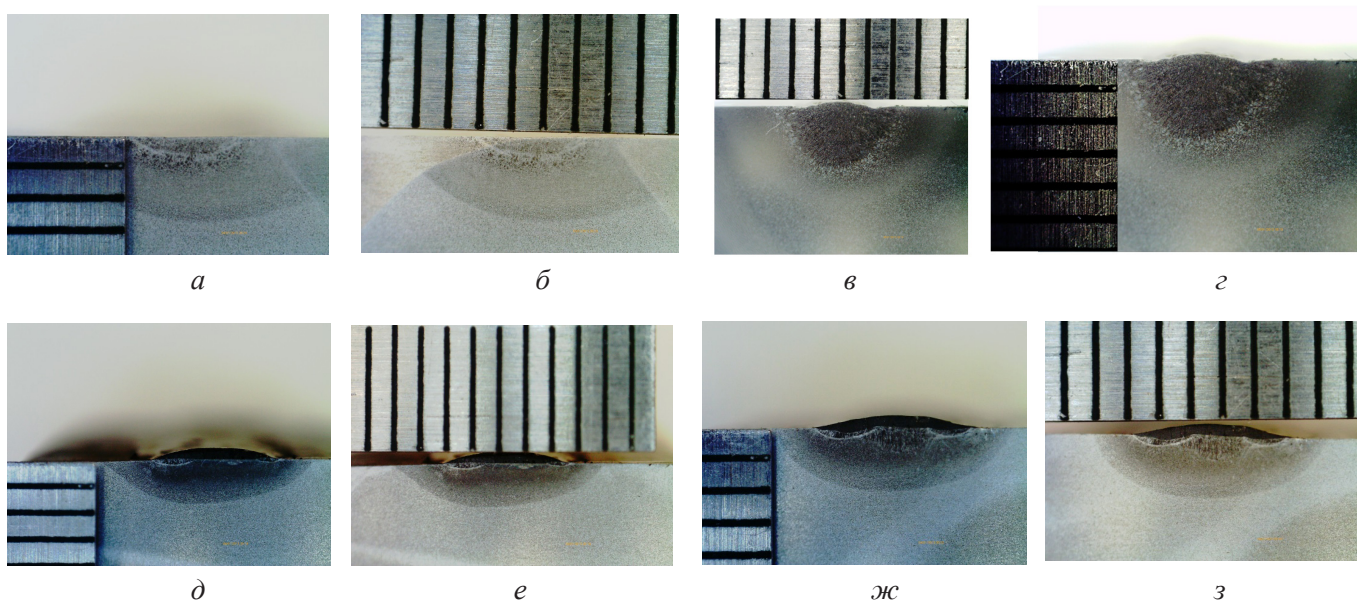
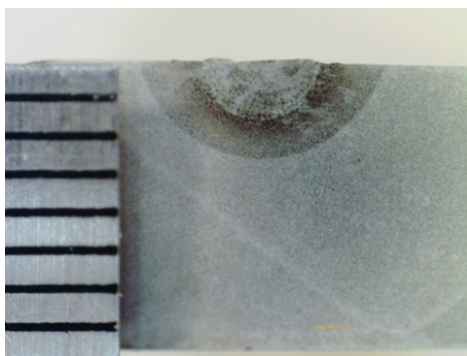


Рис. 2. Поперечные разрезы зоны сварного шва после обработки FB-TIG:

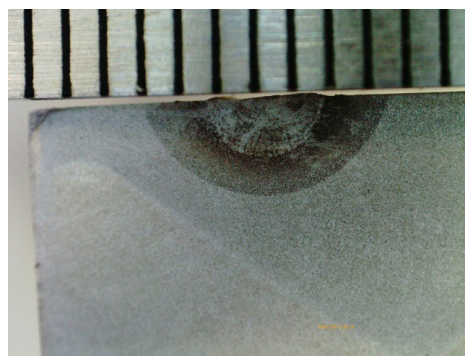
a – параметр ширины (без флюса с оплавлением поверхности, глубина проплавления (сила тока 100 А)); *б* – параметр глубины проплавления (без флюса с оплавлением поверхности, ширина (сила тока 100 А)); *в* – оксид кремния – ширина шва (сила тока 100 А); *г* – оксид кремния – глубина проплавления (сила тока 100 А); *д* – оксид железа – глубина проплавления (сила тока 120 А); *е* – оксид железа – ширина шва (сила тока 120 А); *ж* – оксид железа – глубина проплавления (сила тока 150 А); *з* – оксид железа – ширина шва (сила тока 150 А)

Fig. 2. Cross-sections of the weld zone after FB-TIG processing:

a – width parameter (without flux, with surface melting, penetration depth at 100 A); *б* – penetration depth parameter (without flux, with surface melting, width at 100 A); *в* – silicon oxide – weld width at 100 A; *г* – silicon oxide – penetration depth at 100 A; *д* – iron oxide – penetration depth at 120 A; *е* – iron oxide – weld width at 120 A; *ж* – iron oxide – penetration depth at 150 A; *з* – iron oxide – weld width at 150 A



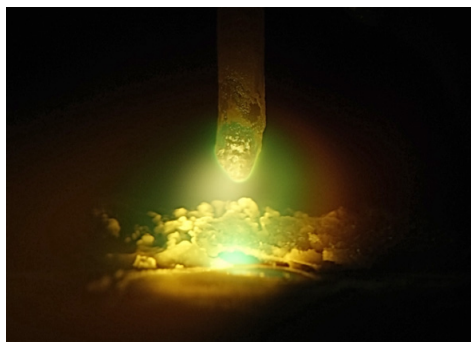
а



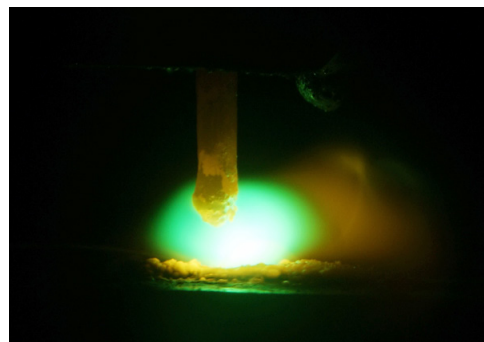
б

Рис. 3. Поперечное сечение образцов после обработки FB-TIG (сила тока 100 А):
а – пыль газоочистки FeSi – глубина проплавления; б – пыль газоочистки FeSi – ширина

Fig. 3. Cross-section of samples after FB-TIG treatment (current 100 A):
а – FeSi gas cleaning dust – penetration depth; б – FeSi gas cleaning dust – width



а



б

Рис. 4. Фотографии процесса взаимодействия столба сварочной дуги и частиц флюса при сварке с активированным флюсом SiO₂:

а – А-TIG; б – FB-TIG (сила тока 100 А)

Fig. 4. Photographs of the interaction process between the welding arc column and flux particles during welding with activated SiO₂ flux:

а – А-TIG; б – FB-TIG (current 100 А)

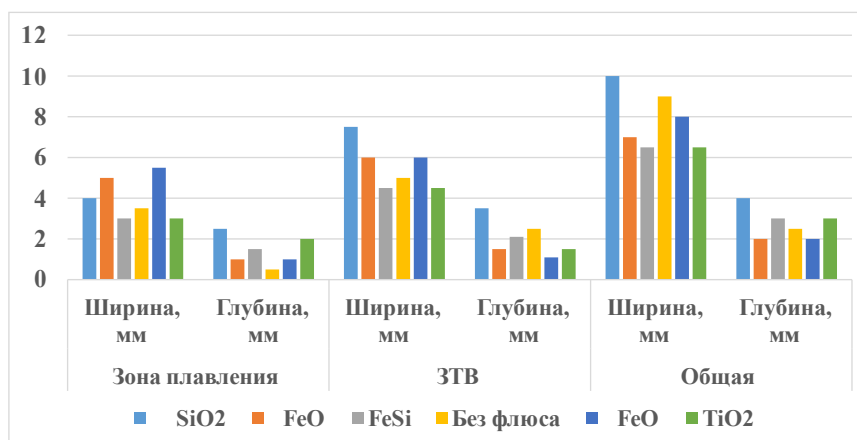


Рис. 5. Изменение ширины и глубины при сварке FB-TIG в зоне плавления, зоне термического влияния и общая глубина

Fig. 5. Variation of width and depth in FB-TIG welding in the fusion zone (FZ), heat-affected zone (HAZ), and total depth

Таблица 4

Table 4

Изменение ширины и глубины при сварке FB-TIG**Variation of width and depth during FB-TIG welding**

Сила тока, А / Current, A	Флюс, нанесенный на Сталь 3 (зазор в центре 2 мм) / Flux applied to Steel 3 (center gap of 2 mm)	Глубина проплавления, мм / Penetration depth (mm)	Ширина проплавления, мм / Penetration width (mm)
100	Без флюса	1,15	5,31
100	SiO ₂	2,64	5,37
100	FeO	0,32	4,98
120	FeO	0,90	5,31
100	TiO ₂	1,96	4,96
Сила тока, А / Current, A	Флюс, нанесенный на Сталь 3 (зазор в центре) / Flux applied to Steel 3 (center gap)	Глубина проплавления, мм / Penetration depth (mm)	Ширина проплавления, мм / Penetration width (mm)
100	SiO ₂ , зазор 4 мм / SiO ₂ , gap 4 (mm)	2,84	5,27
100	SiO ₂ , зазор 6 мм / SiO ₂ , gap 6 (mm)	2,44	5,67
100	SiO ₂ , зазор 8 мм / SiO ₂ , gap 8 (mm)	1,96	6,17

Таблица 5

Table 5

Изменение ширины и глубины при сварке FZ-TIG**Variation of width and depth during FZ-TIG welding**

Сила тока, А / Current, A	Флюс, нанесенный на Сталь 3 / Flux applied to Steel 3	Глубина проплавления, мм / Penetration depth (mm)	Ширина проплавления, мм / Penetration width (mm)
100	Без флюса / Without flux	1,15	5,31
100	SiO ₂	2,94	5,31
100	FeO	0,82	4,53
120	FeO	1,40	5,11
100	TiO ₂	2,76	5,00

макроструктуры и микрофотографии с образцами TIG, A-TIG, FB-TIG и FZ-TIG включают в себя различные зоны, а именно зону плавления (ЗП), основной металл и зону термического воздействия (ЗТВ), с различной морфологией зерен (рис. 6–8).

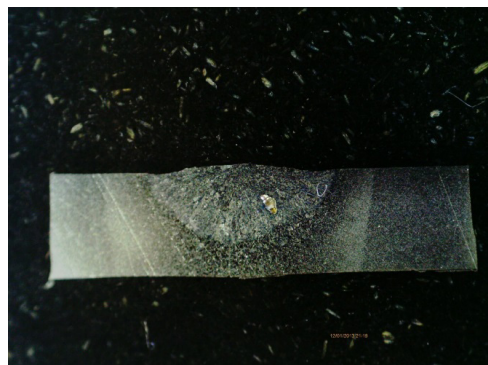
В табл. 6 представлены результаты сварки FB-TIG с различной толщиной флюсового покрытия, от 0,5 мм до 3 мм. Видно, что наибольшая толщина покрытия 3 мм не позволяет получить качественное оплавление при силе тока 100 А. При толщине покрытия 1 мм ширина



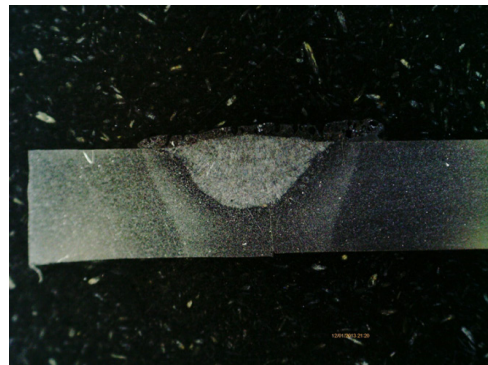
a



б



в



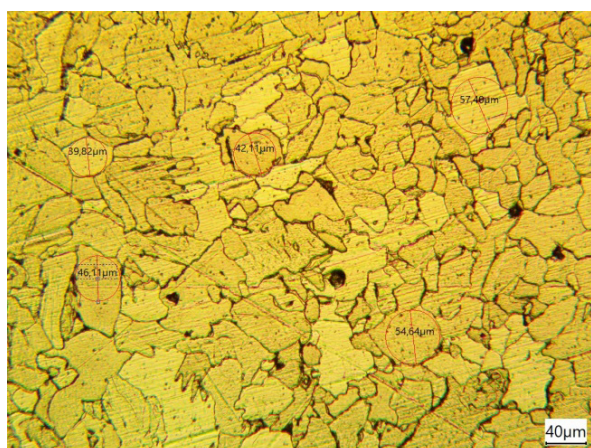
г

Рис. 6. Поперечные сечения сварного шва пластины толщиной 5 мм без подготовки кромок после сварки FB-TIG при силе тока 100 А:

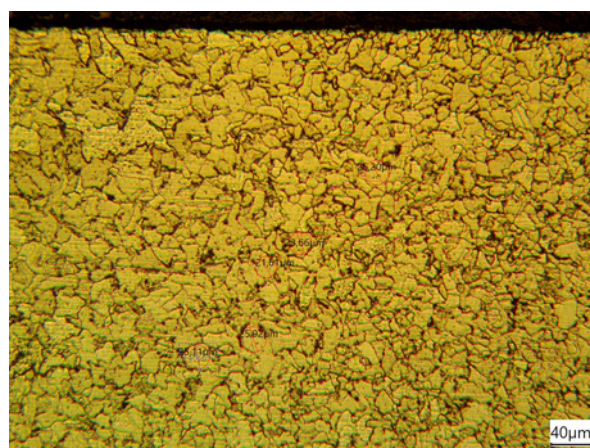
a – сварка без флюса; *б* – сварка с флюсом SiO_2 ; *в* – оксид железа; *г* – пыль газоочистки FeSi

Fig. 6. Transverse sections of a weld seam of a 5 mm plate without edge preparation after FB-TIG welding at 100 A:

a – welding without flux; *б* – welding with SiO_2 ; *в* – iron oxide; *г* – FeSi gas cleaning dust



a



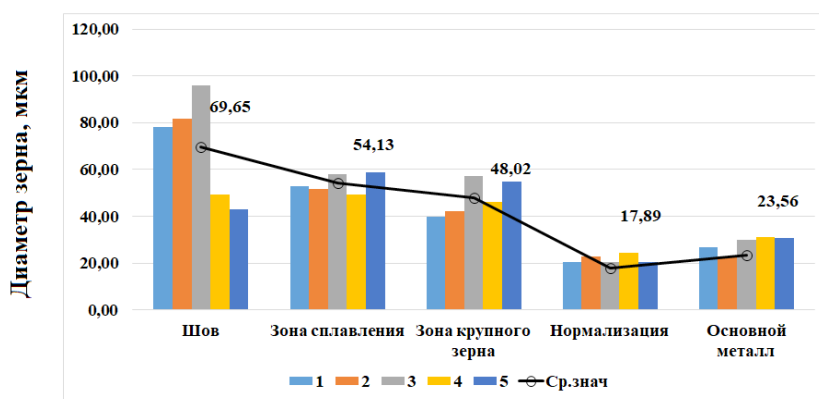
б

Рис. 7. Микроструктура в крупнозернистой зоне. Поперечные сечения сварного шва пластины толщиной 5 мм без подготовки кромки после сварки с флюсом SiO_2 :

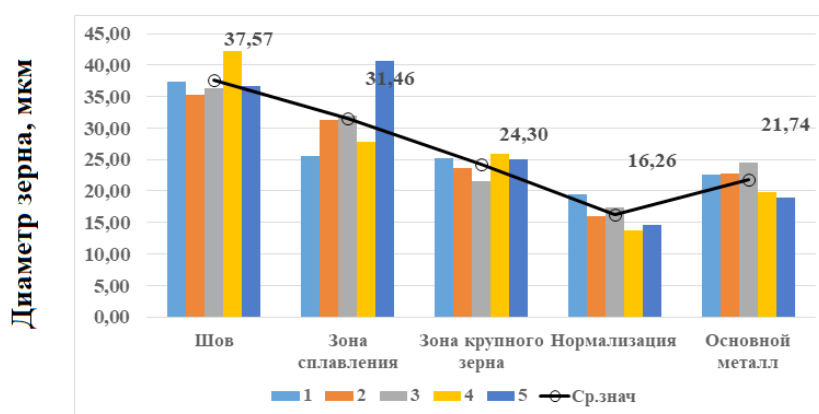
a – метод А-TIG; *б* – метод FB-TIG (сила тока 100 А)

Fig. 7. Microstructure in the coarse grain zone. Transverse sections of a weld seam of a 5 mm plate without edge preparation after welding with SiO_2 flux:

a – A-TIG method; *б* – FB-TIG method (current 100 A)



а



б

Рис. 8. Размеры зерен в поперечных сечениях сварного шва пластины толщиной 5 мм без подготовки кромки после сварки с флюсом SiO_2 :

а – метод А-TIG; б – метод FB-TIG (сила тока 100 А)

Fig. 8. Grain sizes of transverse sections of a weld seam of a 5 mm plate without edge preparation after welding with SiO_2 flux:

а – A-TIG method; б – FB-TIG method (current 100 A)

Таблица 6

Table 6

Изменение ширины и глубины при сварке FB-TIG

Changing the width and depth during FB-TIG welding

Сила тока, А / Current, A	Флюс, нанесенный на Сталь 3 (зазор в центре 2 мм) / Flux applied to Steel 3 (center gap of 2 mm)	Толщина покрытия, мм / Coating thickness (mm)	Глубина проплавления, мм / Penetration depth (mm)	Ширина проплавления, мм / Penetration width (mm)
100	SiO_2	0,5	1,75	5,31
100	SiO_2	1,0	2,64	5,47
100	SiO_2	2,0	2,32	4,98
100	SiO_2	3,0	Нет	Нет
120	SiO_2	3,0	2,58	5,40
140	SiO_2	3,0	2,70	6,12

сварного шва больше, чем при других вариантах. При толщине покрытия 1 мм наблюдается наибольшая глубина сварного шва 2,64 мм. Следующие по величине значения глубины сварного шва получены соответственно при толщине активного флюсового покрытия 3 мм, но уже при токе 140 А. Точная и оптимальная толщина активного флюсового покрытия SiO_2 для металла толщиной 3...5 мм находится в диапазоне 0,5...1 мм. Следовательно, увеличение или уменьшение указанной толщины активного флюсового покрытия оказывает существенное влияние на глубину и ширину сварного шва. Когда толщина активного флюсового покрытия превышает точное значение (более 1 мм), зажигание дуги затруднено, что приводит к меньшему проплавлению и ухудшению качества поверхности. Если толщина активного флюсового покрытия меньше точного значения, то существенного улучшения глубины сварного шва не наблюдается.

На рис. 9 представлены результаты образцов, обработанных по методу FZ-TIG (сила тока 100 А).

Разные значения напряжения были зафиксированы при сварке A-TIG и FB-TIG из-за различий в физических свойствах разных флюсов. Сварка FB-TIG, FZ-TIG дает самое высокое напряжение на дуге. Интенсивность нагрева в центре дуги возрастает с увеличением напряжения и экспоненциально уменьшается в радиальном направлении от центра, это приводит к сжатию столба дуги и повышению плотности теплового потока, что существенно влияет на проплавление (рис. 9). Сравнительная оценка разных методов дана на рис. 10.

Обсуждение результатов

Проведенные нами исследования позволили выделить некоторые новые особенности активирующих флюсов. Так, например, отметим результат (рис. 2) большой глубины проплавления при использовании оксида кремния. Флюс SiO_2 обладает самой высокой электроотрицательностью среди всех оксидных флюсов, и благодаря

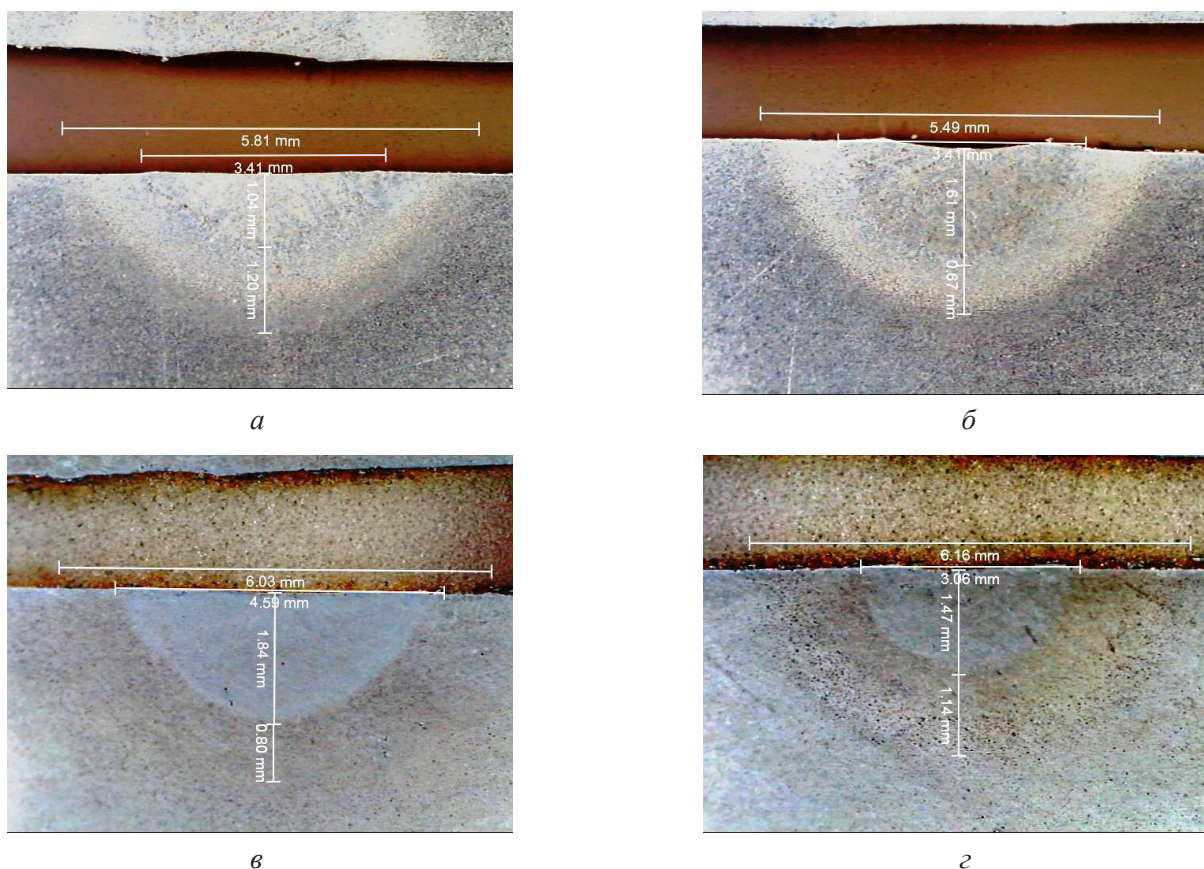


Рис. 9. Поперечные сечения образцов, обработанных методом FZ-TIG (сила тока 100 А):

а – оксид кремния; *б* – оксид титана; *в* – пыль газоочистки; *г* – оксид железа

Fig. 9. Cross-sections of samples processed by the FZ-TIG method (current 100 A):

a – silicon oxide; *б* – titanium oxide; *в* – gas cleaning dust; *г* – iron oxide

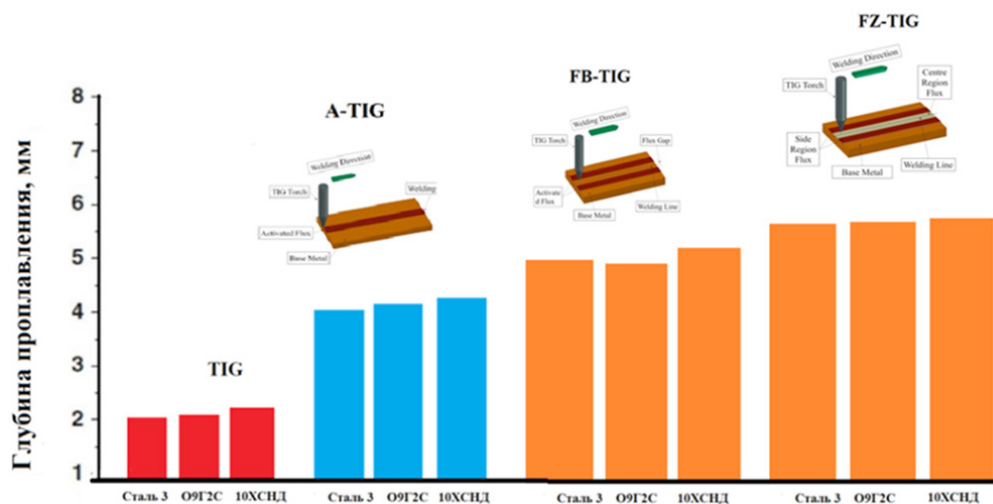


Рис. 10. Глубина проплавления в зависимости от химического состава стали (толщина пластины 10 мм, сила тока 200 А) для различных методов TIG-сварки с активированным флюсом

Fig. 10. Penetration depth as a function of steel chemical composition (plate thickness 10 mm, current 200 A) for various activated flux TIG welding methods

этому диссоциация оксидных флюсов притягивает больше электронов во внешней области дугового столба, чем в центре. Электроны собираются на внешней периферии дуги, что приводит к усилению дугового разряда и большому его сокращению. Кроме того, все металлические оксиды являются более основными и прочно связаны с кислородом, поэтому разложение основных оксидов затруднено, в то время как кислые соединения легко разлагаются, генерируется больше свободной энергии и достигается большая глубина проплавления.

Более глубокое проплавление, достигнутое при использовании оксидного поверхностно-активного вещества, вероятно, объясняется двумя возможными механизмами, а именно сужением столба дуги и эффектом Марангони. В целом, как показали наши предыдущие исследования [50], глубина проплавления в традиционном процессе TIG-сварки зависит от режима течения жидкости в сварочной ванне. Это, в свою очередь, сильно зависит от таких определяющих факторов, как электромагнитные и градиент поверхностного натяжения – на рис. 4 показано изменение формы столба дуги в процессе сварки A-TIG и FB-TIG. На фото визуализации A-TIG и FB-TIG видно, что когда дуга горит по слою флюса – она находится в непрерывном контакте с частицами флюса. В случае же метода FB-TIG она сжата боковыми стенками флюса, которые не являются

электропроводными. На рис. 5 показано изменение ширины и глубины проплавления сварного шва для различных флюсов. Флюсы SiO_2 и TiO_2 оказывают более сильное влияние на эти параметры сварного шва, чем другие. Авторы [6–8, 12–19] сообщили, что активированный флюс ионизируется во время сварки и сужает дугу, захватывая электроны во внешней и центральной области дуги. Впоследствии происходит увеличение плотности анодного тока, что приводит к возрастанию теплового потока в пятне и к более узкому и глубокому сварному шву.

Однако многие исследователи считают, что основной причиной увеличения глубины сварного шва является обратная/центростремительная конвекция Марангони. Добавление поверхностно-активного вещества приводит к увеличению градиента поверхностного натяжения в центральной части по сравнению с внешними краями, в результате чего расплавленный металл сварочной ванны течет к центру, что приводит к увеличению степени раскрытия шва.

Образец сварки TIG без флюса показал столбчатую структуру зерен в зоне сварного шва (рис. 7, а). Стоит отметить, что образцы, обработанные A-TIG и FZ-TIG, продемонстрировали длинные игольчатые зерна, в то время как образцы, обработанные FB-TIG-сваркой, показали ячеистые зерна в зоне сварного шва. Это важно, поскольку зона сварного шва при A-TIG и FZ-TIG

подвергается циклическому быстрому нагреву, так как сварочный шов покрыт флюсом, что приводит к высокой плотности тока и сильной конвекции Марангони. Однако наличие сужения дуги, создаваемого боковым потоком, но с ограниченной плотностью тока, почти идентичной TIG-сварке, приводит к умеренному нагреву зоны плавления с последующим медленным охлаждением, что позволяет зернам расти в ячеистой структуре.

В случае TIG-сварки при отсутствии подобных механизмов зона плавления проходит через цикл медленного нагрева и охлаждения, что приводит к образованию столбчатой структуры (рис. 7, а). Помимо зоны плавления, зона термического воздействия в основном состоит из очень мелкозернистой морфологии благодаря более быстрому охлаждению, вызванному тепловым потоком к холодному основному металлу. Микроструктурный анализ образцов выявил дефекты, такие как пористость различной степени выраженности в зоне сварного шва.

Автор [15] считает, что в процессе A-TIG-сварки кислород, выделяющийся при разложении оксидного флюса во время сварки, обычно растворяется в расплавленном металле, который может улетучиваться в окружающую среду после затвердевания. Можно утверждать, что количество пористости зависит от оксида, присутствующего во флюсе. Во многих случаях при сварке FB-TIG дуга не ограничивается только радиусом дуги, особенно когда боковой флюсовый слой обладает ограниченным электрическим сопротивлением. Это усиливает приток жидкости внутрь сварочной ванны, перенося активирующие частицы флюса в центральную область. Такой приток частиц внутрь способствует увеличению глубины проплавления, но одновременно оставляет после себя пустоты, образованные кислородом, разложившимся на флюсе, как описано ранее в этом разделе. Образцы, сваренные без флюса, также демонстрировали пористость и более крупные пустоты в зоне сварного шва. Следовательно, можно предположить, что существует несколько причин образования пористости во время TIG-сварки. Известно [6–8], что поглощение азота и кислорода в сварочной ванне обычно вызвано плохой защитой газом.

Из работ различных авторов [6–49] отметим, что феномен увеличения глубины проплавления

сварного шва с помощью активирующих флюсов достаточно сложен, поэтому полный анализ этого явления не был представлен, имеются только отдельные работы, где этот феномен пытаются исследовать в нескольких случаях, предлагая в качестве объяснения различные механизмы. К таким механизмам относятся механизм сужения дуги, механизм обратного эффекта Марангони [15], механизм электромагнитных сил [6–9], механизм плавучести и аэродинамических сил [6, 12, 21, 22].

Из экспериментальных результатов настоящего исследования стало ясно, что каждый флюс уникален по своим химическим, термическим и электрическим свойствам, что приводит к различным размерам сварного шва из-за одного или нескольких из указанных механизмов. На рис. 10 дана сравнительная оценка различных методов. Видно, что по сравнению с простой сваркой TIG при использовании сварки с активированным флюсом и разных методах нанесения глубина проплавления увеличивается. Геометрические размеры образцов «валик на пластине», выполненных из углеродистой и низколегированной стали, подтвердили эффект существенного увеличения глубины проплавления, что коррелирует с работами других авторов [6–19].

С одной стороны, на верхней поверхности образцов, сваренных методом A-TIG с использованием таких флюсов, как SiO_2 , TiO_2 и FeO , наблюдалось непрерывное линейное разбрызгивание. Такое чрезмерное разбрызгивание могло быть вызвано сильным сужением дуги, обусловленным более высокой пиковой температурой во время обработки.

В процессе сварки A-TIG движение электронов дуги затрудняется осажденным флюсом в центре шва на поверхности [6–8], поскольку большинство из них являются хорошими изоляторами электричества. Поскольку электроны двигаются по наименее сопротивляющемуся пути, т. е. по бокам, это приводит к блужданию дуги и, следовательно, к разбрызгиванию. Таким образом, сварка A-TIG создает больше неоднородностей на верхней поверхности образцов по сравнению со сваркой TIG, что объясняется неизбежным образованием разбрызгивания остаточным шлаком [6–8].

С одной стороны, в случае использования флюсов наблюдалось меньшее количество

брызг, что объясняется образованием шлакового слоя из флюса, нанесенного до сварки. С другой стороны, в случае сварки FB-TIG наблюдается обратная ситуация: центральная область остается не покрытой флюсом, а боковые области покрываются. Это приводит к лучшему контролю дуги и сужению ее в центре. Поэтому в образцах сварки FB-TIG наблюдалось сравнительно меньшее количество брызг. При сварке методом FZ-TIG на поверхности сварного шва наблюдалось значительное количество брызг, что объясняется сильным сужением дуги и силой дуги. При сварке методом FZ-TIG в центре шва нанесен флюс с высокой электропроводностью, что улучшает привязку столба дуги с точки зрения минимального электросопротивления. Боковые части, наоборот, имеют частицы флюса с низкой электропроводностью и могут подвергаться конвективному тепловому воздействию столба дуги.

В работах [6–8] сообщалось, что электроотрицательность компонентов флюса играет ключевую роль в характеристиках дуги и выделяемом при этом тепле. В процессе A-TIG- и FZ-TIG-сварки разрушение оксидного флюса приводит к разделению химического элемента и кислорода. Свойства оксида можно описать электроотрицательностью определенного химического элемента в сочетании с кислородом. Отрицательные ионы, образующиеся в результате агрегации электронов на краю дуги, могут привести к сужению дуги. Добавление активирующих флюсов с высокой температурой плавления в центр сварного шва вызывает там более высокое поверхностное натяжение [15]. Более высокое поверхностное натяжение в центре и более низкое по краям направляет поток расплавленного металла шва к центру, а не наружу, как в случае обычной TIG-сварки. Этот механизм обратного градиента поверхностного натяжения, приводящий к узкому и глубокому проплавлению, называется эффектом обратной конвекции Марангони, как хорошо объяснено в работе [15]. Следовательно, можно предположить, что существует более одного механизма, вызывающего увеличение проплавления шва.

Необходимо отметить, что прописанный выше механизм немного отличается при сварке FB-TIG, поскольку изменяется место нанесения флюса. При зажигании дуги, помимо цен-

тральной области, она также взаимодействует с частицами флюса, расположенными в боковых областях. Интенсивный нагрев от дуги диссоциирует частицы флюса, что приводит к испарению и дальнейшему образованию парового облака за пределами дугового столба. Взаимодействие между частицами парового облака и граничащими электронами с относительно меньшей энергией, чем в центральной области, препятствует дальнейшему расширению дуги. То есть при такой узкой дуге в наших экспериментах наблюдается более высокая глубина проплавления. Однако образцы, полученные по методу FZ-TIG, испытывали сочетание механизмов, обсуждавшихся ранее, поскольку это комбинированный подход, включающий характеристики сварки A-TIG и сварки FB-TIG. Следовательно, эти образцы демонстрировали более узкий сварочный шов с более высоким отношением глубины проплавления к ширине шва по сравнению с обоими вышеупомянутыми подходами.

При сварке по методу FB-TIG зазор между флюсами оказывает существенное влияние на увеличение глубины проплавления и уменьшение ширины сварного шва, как показано в табл. 4. В ходе экспериментов установлено, что по мере уменьшения зазора между флюсами глубина проплавления увеличивается, что приводит к большему отношению глубины к ширине по сравнению с обычным процессом TIG-сварки. Это наблюдение можно подтвердить тем фактом, что при TIG-сварке энергия, необходимая для расплавления основного металла, получается из кинетической энергии, передаваемой заряженным частицам (электронам или положительно заряженным ионам). Сопротивление кремнеземного флюсового покрытия значительно выше по сравнению с основным металлом, и это приводит к тому, что поток электронов направляется только вдоль области без флюсового покрытия, т. е. только внутри зазора между флюсами [15]. Это явление известно как эффект изоляции.

Глубина и форма сварочного шва существенно зависят от характера течения расплавленного металла и режима потока жидкости в зоне сварки. В целом для чистых металлов и сплавов поверхностное натяжение (σ) уменьшается с повышением температуры (T). Это означает, что центр сварочной ванны, который испытывает максимальное тепло от сварочной горелки, будет

иметь минимальное поверхностное натяжение по сравнению с внешними краями сварочного шва. При рассмотрении центра и краев сварочной ванны будет наблюдаться значительный градиент поверхностного натяжения. Это приводит к тому, что расплавленный металл течет из области с более низким поверхностным натяжением (центр сварочной ванны) в область с более высоким поверхностным натяжением (периферия сварочной ванны) [6–14]. По мере постепенного уменьшения зазора флюса концентрация поверхностно-активного элемента (кислорода) в расплавленной сварочной ванне будет увеличиваться, поскольку частицы диоксида кремния, прилегающие к сварочной ванне, будут плавиться из-за интенсивного нагрева во время сварки, а температурный коэффициент поверхностного натяжения изменяется с отрицательного на положительный. Это приводит к увеличению сил поверхностного натяжения σ с повышением температуры в середине расплавленной ванны, поскольку именно в этой области будет наблюдаться максимальная температура. Вследствие этого направление потока расплавленного металла меняется на противоположное (обычно это называется обратным течением Марангони или обратной конвекцией Марангони), что приводит к большему проплавлению сварочного шва и уменьшению его ширины [6–8]. Таким образом, сварочная ванна становится глубокой и узкой, а не широкой и мелкой.

В заключение отметим, что пространственное распределение плотности тока дуги и эффект взаимодействия тепловых, силовых и других физических величин оказывают существенное влияние на геометрические размеры и металлургическое качество сварного шва. В наших исследованиях плотность теплового потока дуги может быть охарактеризована распределением плотности тока. Эти два параметра мы регулировали активированными флюсами с различными методами нанесения на поверхность. Учитывая эти особенности процесса сварки, мы наметили дальнейшие исследования по оценке проплавляющей способности новых методов использования активирующих флюсов при сварке TIG.

Выводы

Основные результаты можно резюмировать следующим образом.

1. В ходе исследований новых методов FB-TIG и FZ-TIG показано, что флюсы SiO_2 и TiO_2 не только увеличивает глубину проплавления сварного шва, но и способствует улучшению контроля над сварочной ванной на поверхности. Комплексный флюс пыль газоочистки (состоит из оксидов: кремния 85,4 %, алюминия 10,46 %, железа 0,30 %, кальция 1,50 %, магния 1,24 %) повышает значения глубины проплавления, но уступает по эффективности простым флюсам SiO_2 и TiO_2 . Глубина проплавления при сварке FB-TIG увеличивается с повышением толщины флюсового покрытия до величины 1 мм, после чего остается постоянной в широком диапазоне силы сварочного тока.

2. Установлено различие в зоне термического влияния микроструктуры: при сварке A-TIG наблюдается более крупная зернистая структура (65...76 мкм), тогда как при сварке FB-TIG – более мелкая (35...45 мкм). Размер зерна в зоне сварного шва при сварке FB-TIG в два раза меньше, чем при сварке A-TIG.

3. При сварке металла толщиной 10 мм были получены следующие параметры для достижения максимальной глубины проплавления: сила сварочного тока 200 А, скорость 100 мм/мин и расход защитного газа 20 л/мин.

4. Визуализации FZ-TIG и FB-TIG показала качественную картину: когда дуга горит по слою электропроводного флюса, она находится в непрерывном плотном контакте с частицами флюса и дополнительно сжата боковыми стенками флюса, которые не являются электропроводными, вследствие этого плотность теплового потока выше. В случае же метода FB-TIG она сжата только боковыми стенками флюса, а по оси сварного шва нет, степень обжатия меньше.

Список литературы

1. Zhang Y.M., Jiang M., Lu W. Double electrodes improve GMAW heat input control // *Welding Journal*. – 2004. – Vol. 83 (11). – P. 39–41.
2. A review of double-electrode GMAW: Approaches, developments and variants / R. Xiang, J. Huang, X. Yu, H. Zhao, D. Fan // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2025. – Vol. 133. – P. 1160–1182. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.12.017.
3. Modenesi P.J. The chemistry of TIG weld bead formation // *Welding International*. – 2015. – Vol. 29 (10). – P. 771–782. – DOI: 10.1080/09507116.2014.932990.



4. Gurevich S.M., Zamkov V.N., Kushnirenko N.A. Improving the penetration of titanium alloys when they are welded by argon tungsten arc process // *Automatic Welding*. – 1965. – Vol. 18 (9). – P. 1–5.
5. Liu F., Liu Z., Zhang W. Arc characteristics and welding state in gas-focusing TIG // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2023. – Vol. 129. – P. 5335–5346. – DOI: 10.1007/s00170-023-12631-3.
6. Контракция дуги флюсом при сварке вольфрамовым электродом в аргоне / Б.Е. Патон, В.Н. Замков, В.П. Прилуцкий, П.В. Порицкий // *Автоматическая сварка*. – 2000. – № 1. – С. 3–9.
7. Савицкий М.М., Кушниренко Б.Н., Олейник О.Н. Особенности сварки сталей вольфрамовым электродом с активирующими флюсами // *Автоматическая сварка*. – 1999. – № 12. – С. 18–22.
8. Jayakrishnan S., Chakravarthy P. Flux bounded tungsten inert gas welding for enhanced weld performance – A review // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2017. – Vol. 28. – P. 116–130. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.05.023.
9. Bhanu V., Gupta A., Pandey C. Role of A-TIG process in joining of martensitic and austenitic steels for ultra-supercritical power plants-a state of the art review // *Nuclear Engineering and Technology*. – 2022. – Vol. 54 (8). – P. 2755–2770. – DOI: 10.1016/j.net.2022.03.003.
10. Pandya D., Badgujar A., Ghetiya N. A novel perception toward welding of stainless steel by activated TIG welding: a review // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2021. – Vol. 36 (8). – P. 877–903. – DOI: 10.1080/10426914.2020.1854467.
11. Fande A.W., Taiwade R.V., Raut L. Development of activated tungsten inert gas welding and its current status: A review // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2022. – Vol. 37 (8). – P. 841–876. – DOI: 10.1080/10426914.2022.2039695.
12. Effects of activating flux on arc phenomena in gas tungsten arc welding / M. Tanaka, T. Shimizu, T. Terasaki, M. Ushio, F. Koshiishi, C.-L. Yang // *Science and Technology of Welding and Joining*. – 2000. – Vol. 5 (6). – P. 397–402. – DOI: 10.1179/136217100101538461.
13. Бабкин А.С., Котов Н.С., Терехов В.В. Влияние активирующих флюсов на характеристики электрической дуги и качество швов при сварке аустенитных сталей // *Известия ТулГУ. Технические науки*. – 2022. – № 10. – С. 507–514. – DOI: 10.24412/2071-6168-2022-10-507-514.
14. Исследования продуктов переработки отходов кремния в качестве ультрадисперсных активирующих флюсов для дуговой сварки / Н.Н. Иванчик, А.Е. Балановский, В.В. Кондратьев, А.А. Тютрин // *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. – 2018. – № 11 (2). – С. 155–167. – DOI: 10.17516/1999-494X-0019.
15. Паршин С.Г. Наноструктурированные и активирующие материалы для дуговой сварки. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2020. – DOI: 10.18720/SPB-PU/2/si20-888.
16. Plasma arc welding: Process variants and its recent developments of sensing, controlling and modeling / Z.M. Liu, S.L. Cui, Z. Luo, C.Z. Zhang, Z.M. Wang, Y.C. Zhang // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2016. – Vol. 23. – P. 315–327. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2016.04.004.
17. Teker T., Özdemir N. Weldability and joining characteristics of AISI 430/AISI 1040 steels using keyhole plasma arc welding // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2012. – Vol. 63 (1). – P. 117–128. – DOI: 10.1007/s00170-011-3890-5.
18. Sahoo A., Tripathy S. Development in plasma arc welding process: a review // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – Vol. 41. – P. 363–368. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.09.562.
19. Arc behaviour and weld formation in gas focusing plasma arc welding / T. Li, X.M. Yang, L. Chen, Y. Zhang, Y. Cheng Lei, Y.J. Chun // *Science and Technology of Welding and Joining*. – 2020. – Vol. 25 (4). – P. 329–335. – DOI: 10.1080/13621718.2019.1702284.
20. Magnetic-enhanced keyhole TIG welding process / Z.M. Liu, S.Y. Chen, X. Yuan, A.Q. Zuo, T. Zhang, Z. Luo // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2018. – Vol. 99 (1). – P. 275–285. – DOI: 10.1007/s00170-018-2501-0.
21. Development of a novel GTAW process for joining ultra-thin metal sheets / N.H. Manh, H. Le Duy, M. Akihisa, V.T. Le, T.Q. Ngoc, B. Gandham // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2022. – Vol. 80. – P. 683–691. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.06.043.
22. Sire S. New perspectives in TIG welding of aluminium through flux application // *Proceedings of the 7th International Symposium*. – Kobe, Japan, 2001. – P. 113–118.
23. Huang Y., Fan D., Shao F. Alternative current flux zoned tungsten inert gas welding process for aluminium alloys // *Science and Technology of Welding and Joining*. – 2012. – Vol. 17 (2). – P. 122–127. – DOI: 10.1179/1362171811Y.00000000087.
24. Application of plasma surface quenching to reduce rail side wear / M.V. Konstantinova, A.E. Balanovskiy, V.E. Gozbenko, S.K. Kargapoltshev, A.I. Karlina, M.G. Shtayger, E.A. Guseva, B.O. Kuznetsov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 560 (1). – P. 012146. – DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012146.

25. Augmentation of weld penetration by flux assisted TIG welding and its distinct variants for oxygen free copper / H. Rana, V. Badheka, P. Patel, V. Patel, W. Li, J. Andersson // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2021. – Vol. 10. – P. 138–151. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.12.009.
26. Experimental investigations on tensile strength of flux bounded TIG welds of AA2219-T87 aluminum alloy / A.V.S. Babu, P.K. Giridharan, P.R. Narayanan, S.V.S. Narayana Murty, V.M.J. Sharma // *Journal of Advanced Manufacturing Systems*. – 2014. – Vol. 13 (2). – P. 103–112. DOI: 10.1142/S0219686714500073.
27. Jayakrishnan S., Chakravarthy P., Muhammed Rijas A. Effect of flux gap and particle size on the depth of penetration in FBTIG welding of aluminium // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. – 2017. – Vol. 70 (5). – P. 1329–1335. – DOI: 10.1007/s12666-016-0929-1.
28. Processing and application of ultra disperse wastes of silicon production in construction / V.V. Kondratiev, A.I. Karlina, E.A. Guseva, M.V. Konstantinova, A.A. Kleshnin // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 463 (3). – P. 032068. – DOI: 10.1088/1757-899X/463/3/032068.
29. Flux zoned activating TIG welding of aluminum alloys / H. Yong, S. Feng, F. Ding, L. Tao // *Welding and Joining-Harbin*. – 2007. – Vol. 5. – P. 47–49.
30. Martyushev N.V., Skeebe V.Yu. The method of quantitative automatic metallographic analysis // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – Vol. 803 (1). – P. 012094. – DOI: 10.1088/1742-6596/803/1/012094.
31. Вopoнaй H.M., Лeбeдeвa O.B., Бoйкo B.П. Физические свойства сварочных шлаков на основе TiO_2 , образующихся при плавлении активированных проволок // *Автоматическая сварка*. – 1989. – № 3. – С. 19–23.
32. Zhang R.H., Pan J.L., Katayama S. The mechanism of penetration increase in A-TIG welding // *Frontiers of Materials Science*. – 2011. – Vol. 5. – P. 109–118. – DOI: 10.1007/s11706-011-0125-5.
33. Singh S.R., Khanna P. A-TIG (activated flux tungsten inert gas) welding: – A review // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – Vol. 44. – P. 808–820. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.712.
34. Research advances in high-energy TIG arc welding / H. Wu, Y. Chang, Q. Mei, D. Liu // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2019. – Vol. 104. – P. 391–410. – DOI: 10.1007/s00170-019-03918-5.
35. Balanovskiy A.E. Digital visualisation of the process of heating and melting of metal in arc discharge with a non-consumable electrode // *Welding International*. – 2017. – Vol. 31 (6). – P. 467–476. – DOI: 10.1080/09507116.2016.1268765.
36. Effect of nano TiO_2 flux on depth of penetration and mechanical properties of TIG-welded SA516 Grade 70 steel joints – An experimental investigation / R. Narayanan, K. Rameshkumar, A. Sumesh, B. Shankar, D.T. Thekkuden // *Metals*. – 2025. – Vol. 15 (4). – P. 399. – DOI: 10.3390/met15040399.
37. Tseng K.H., Lin P.Y. UNS S31603 stainless steel tungsten inert gas welds made with microparticle and nanoparticle oxides // *Materials*. – 2014. – Vol. 7 (6). – P. 4755–4772. – DOI: 10.3390/ma7064755.
38. Influence of welding regimes on structure and properties of steel 12KH18N10T weld metal in different spatial positions / R.A. Mamadaliev, P.V. Bakhmatov, N.V. Martyushev, V.Y. Skeebe, A.I. Karlina // *Metalurgist*. – 2022. – Vol. 65 (11–12). – P. 1255–1264. – DOI: 10.1007/s11015-022-01271-9.
39. Study of mechanical properties of C-Mn-Si composition metal after wire-arc additive manufacturing (WAAM) / A.E. Balanovskiy, N.A. Astafyeva, V.V. Kondratyev, A.I. Karlina // *CIS Iron and Steel Review*. – 2021. – Vol. 22. – P. 66–71. – DOI: 10.17580/cisisr.2021.02.12.
40. Study of wear of an alloyed layer with chromium carbide particles after plasma melting / A.I. Karlina, Y.I. Karlina, V.V. Kondratiev, R.V. Kononenko, A.D. Breki // *Crystals*. – 2023. – Vol. 13 (12). – P. 1696. – DOI: 10.3390/cryst13121696.
41. Comparative evaluation of austenite grain in high-strength rail steel during welding, thermal processing and plasma surface hardening / A.D. Kolosov, V.E. Gozbenko, M.G. Shtayger, S.K. Kargapol'tsev, A.E. Balanovskiy, A.I. Karlina, A.V. Sivtsov, S.A. Nebogin // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 560. – P. 012185. – DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012185.
42. Strengthening of metallurgical equipment parts by plasma surfacing in nitrogen atmosphere / N.N. Malushin, R.A. Gizatulin, N.V. Martyushev, D.V. Valuev, A.I. Karlina, A.P. Kovalev // *Metallurgist*. – 2022. – Vol. 65 (11–12). – P. 1468–1475. – DOI: 10.1007/s11015-022-01292-4.
43. Alloying and modification of iron-carbon melts with natural and man-made materials / O.I. Nokhrina, R.A. Gizatulin, M.A. Golodova, I.E. Proshunin, D.V. Valuev, N.V. Martyushev, A.I. Karlina // *Metallurgist*. – 2022. – Vol. 65 (11–12). – P. 1429–1448. – DOI: 10.1007/s11015-022-01289-z.
44. Change in the properties of rail steels during operation and reutilization of rails / K. Yelemessov, D. Baskanbayeva, N.V. Martyushev, V.Y. Skeebe, V.E. Gozbenko, A.I. Karlina // *Metals*. – 2023. – Vol. 13. – P. 1043. – DOI: 10.3390/met13061043.
45. Methods and technologies for ensuring the reliability of excitation of synchronous generators of small

hydroelectric power stations in Uzbekistan / B. Kenjaev, D. Paluanov, D. Mamatkulov, V. Romanova // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 216. – P. 01065. – DOI: 10.1051/e3sconf/202021601065.

46. Advanced approach to compensation of reactive power in isolated arctic electrical supply systems / N. Solonina, K. Suslov, Z. Solonina, V. Romanova // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2032 (1). – P. 012113. – DOI: 10.1088/1742-6596/2032/1/012113.

47. Romanova V., Khromov S., Suslov K. Multi-factor analysis of external effects influencing the operational reliability of asynchronous electric motors // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 216. – P. 01084. – DOI: 10.1051/e3sconf/202021601084.

48. Investigation of mechanical properties and characterization of a joint using nano flux powder for a-tig

welding / S.A. Afolalu, O.M. Ikumapayi, M.E. Emetere, S.O. Ongbali // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 44. – P. 2879–2883. – DOI: 10.1016/j.matpr.2021.01.091.

49. Afolalu S.A., Samuel O.D., Ikumapayi O.M. Development and characterization of nano-flux welding powder from calcined coconut shell ash admixture with FeO particles // Journal of Materials Research and Technology. – 2020. – Vol. 9 (4). – P. 9232–9241. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.06.067.

50. Оценка проплавляющей способности оксидных флюсов при сварке А-TIG углеродистых и низколегированных сталей / А.И. Карлина, В.В. Кондратьев, В.А. Гладких, Г.Ю. Витькина, Р.В. Кононенко // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 4. – С. 96–115. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.4-96-115.

Конфликт интересов

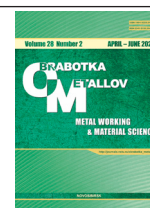
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2026 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



Evaluation of the penetrating ability of oxide fluxes in welding carbon and low-alloy steels using novel A-TIG methods

Antonina Karlina^{1, 2, a, *}, Vitaliy Gladkikh^{1, b}, Georgiy Kurdyumov^{2, c},
 Roman Kononenko^{3, d}, Viktor Kondratiev^{2, 4, e}

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26 Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

² Cherepovets State University, 5 Lunacharsky pr., Cherepovets, 162600, Russian Federation

³ Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontova str., Irkutsk, 664074, Russian Federation

⁴ A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, 1A Favorskiy St., Irkutsk, 664033, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0003-3287-3298>, karlinat@mail.com; ^b <https://orcid.org/0000-0003-1953-1584>, gladkikh_87@mail.ru;

^c <https://orcid.org/0009-0000-8373-1412>, gekurdiymov@chsu.ru; ^d <https://orcid.org/0009-0001-5900-065X>, istu_politech@mail.ru;

^e <https://orcid.org/0000-0002-7437-2291>, imz@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 18 January 2026

Revised: 14 March 2026

Accepted: 21 March 2026

Available online: 15 June 2026

Keywords:

Welding

Activating fluxes

Penetration depth

Coating thickness

ABSTRACT

Introduction. The purpose of this study is to evaluate the technological potential of using oxide activating fluxes in the novel *FB-TIG* and *FZ-TIG* methods to improve penetration efficiency and weld quality in carbon and low-alloy steels. This paper attempts to analyze and review the published literature concerning various hypotheses that explain the high penetration achieved using activating fluxes. **Materials and Methods.** Low-alloy steel samples with thicknesses ranging from 3 to 10 mm were used in this study. Fine flux powders were pre-dispersed in acetone. The flux was carefully applied with a brush to the upper surface of the plate over half of its length. The other half of the plate was left without flux to perform conventional *TIG* welding for comparison. Bead-on-plate welds were made without the addition of any filler material. Several parallel weld passes were deposited with sufficient spacing to avoid thermal interference. The arc current was varied in the range of 80–250 A, while the welding speed was kept constant at 100 mm/min. The welding voltage was set to 15–16 V. Heat input was calculated using the standard expression, assuming a heat transfer efficiency of 0.8. High-purity, industrial-grade argon was used as the shielding gas at a flow rate of 20 L/min. A standard optical microscope was used for metallographic examination, and a camera was used to record the welding process. **Results and Discussion.** The studies have shown that penetration depth primarily depends on such welding parameters as arc length (mm), welding current (A), and travel speed (mm/s). The depth-to-width (*D/W*) ratio is high for the *FB-TIG* method; moreover, surface appearance and slag detachability are improved. The influence of the acidic or alkaline nature of the flux on weld geometry and surface appearance is analyzed. Acid fluxes provide a smoother weld surface than alkaline oxide fluxes. Welding with activated *FB-TIG* and *FZ-TIG* using *SiO₂* flux increases the penetration depth and the depth-to-width ratio by factors of 1.5–1.7, respectively, compared to conventional *A-TIG* welding.

For citation: Karlina A.I., Gladkikh V., Kurdyumov G., Kononenko R.V., Kondratiev V.V. Evaluation of the penetrating ability of oxide fluxes in welding carbon and low-alloy steels using novel A-TIG methods. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2026, vol. 28, no. 2, pp. 49–71. DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.2-49-71. (In Russian).

References

1. Zhang Y.M., Jiang M., Lu W. Double electrodes improve GMAW heat input control. *Welding Journal*, 2004, vol. 83 (11), pp. 39–41.
2. Xiang R., Huang J., Yu X., Zhao H., Fan D. A review of double-electrode GMAW: Approaches, developments and variants. *Journal of Manufacturing Processes*, 2025, vol. 133, pp. 1160–1182. DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.12.017.

* Corresponding author

Karlina Antonina I., Ph.D. (Engineering), Research Associate
 National Research Moscow State Construction University,
 26 Yaroslavskoe shosse,
 129337, Moscow, Russian Federation
 Tel: +7 950 120-19-50, e-mail: karlinat@mail.ru



3. Modenesi P.J. The chemistry of TIG weld bead formation. *Welding International*, 2015, vol. 29 (10), pp. 771–782. DOI: 10.1080/09507116.2014.932990.
4. Gurevich S.M., Zamkov V.N., Kushnirenko N.A. Improving the penetration of titanium alloys when they are welded by argon tungsten arc process. *Automatic Welding*, 1965, vol. 18 (9), pp. 1–5.
5. Liu F., Liu Z., Zhang W. Arc characteristics and welding state in gas-focusing TIG. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, vol. 129, pp. 5335–5346. DOI: 10.1007/s00170-023-12631-3.
6. Paton B.E., Zamkov V.N., Prilutsky V.P., Poritsky P.V. Kontraktsiya dugi flyusom pri svarke vol'framovym elektrodom v argone [Arc contraction by flux during tungsten electrode welding in argon]. *Avtomaticheskaya svarka = Automatic Welding*, 2000, no. 1, pp. 3–9.
7. Savitsky M.M., Kushnirepko B.N., Oleynik O.N. Osobennosti svarki stalei vol'framovym elektrodom s aktiviruyushchimi flyusami [Features of welding steels with a tungsten electrode with activating fluxes]. *Avtomaticheskaya svarka = Automatic Welding*, 1999, no. 12, pp. 18–22.
8. Jayakrishnan S., Chakravarthy P. Flux bounded tungsten inert gas welding for enhanced weld performance – A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, vol. 28, pp. 116–130. DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.05.023.
9. Bhanu V., Gupta A., Pandey C. Role of A-TIG process in joining of martensitic and austenitic steels for ultra-supercritical power plants-a state of the art review. *Nuclear Engineering and Technology*, 2022, vol. 54 (8), pp. 2755–2770. DOI: 10.1016/j.net.2022.03.003.
10. Pandya D., Badgujar A., Ghetiya N. A novel perception toward welding of stainless steel by activated TIG welding: a review. *Materials and Manufacturing Processes*, 2021, vol. 36 (8), pp. 877–903. DOI: 10.1080/10426914.2020.1854467.
11. Fande A.W., Taiwade R.V., Raut L. Development of activated tungsten inert gas welding and its current status: A review. *Materials and Manufacturing Processes*, 2022, vol. 37 (8), pp. 841–876. DOI: 10.1080/10426914.2022.2039695.
12. Tanaka M., Shimizu T., Terasaki T., Ushio M., Koshiishi F., Yang C.-L. Effects of activating flux on arc phenomena in gas tungsten arc welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2000, vol. 5 (6), pp. 397–402. DOI: 10.1179/136217100101538461.
13. Babkin A.S., Kotov N.S., Terekhov V.V. Vliyanie aktiviruyushchikh flyusov na kharakteristiki elektricheskoi dugi i kachestvo shvov pri svarke austenitnykh stalei [The influence of activating fluxes on the characteristics of the electric arc and the quality of seams in welding austenitic steels]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki = Bulletin of Tula State University. Technical Sciences*, 2022, no. 10, pp. 507–514. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-10-507-514.
14. Ivanchik N.N., Balanovsky A.E., Kondratyev V.V., Tyutrin A.A. Issledovaniya produktov pererabotki otkhodov kremniya v kachestve ul'tradispersnykh aktiviruyushchikh flyusov dlya dugovoi svarki [Research of silicon waste processing products as ultradispersed activating fluxes for arc welding]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii = Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*, 2018, no. 11 (2), pp. 155–167. DOI: 10.17516/1999-494X-0019.
15. Parshin S.G. *Nanostrukturirovannye i aktiviruyushchie materialy dlya dugovoi svarki* [Nanostructured and activating materials for arc welding]. St. Petersburg, Polytechnic University Publ., 2020. DOI: 10.18720/SPBPU/2/si20-888.
16. Liu Z.M., Cui S., Luo Z., Zhang C., Wang Z., Zhang Y. Plasma arc welding: Process variants and its recent developments of sensing, controlling and modeling. *Journal of Manufacturing Processes*, 2016, vol. 23, pp. 315–327. DOI: 10.1016/j.jmapro.2016.04.004.
17. Teker T., Özdemir N. Weldability and joining characteristics of AISI 430/AISI 1040 steels using keyhole plasma arc welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, vol. 63 (1), pp. 117–128. DOI: 10.1007/s00170-011-3890-5.
18. Sahoo A., Tripathy S. Development in plasma arc welding process: a review. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 41, pp. 363–368. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.09.562.
19. Li T., Yang X.M., Chen L., Zhang Y., Cheng Lei Y., Chun Y.J. Arc behaviour and weld formation in gas focusing plasma arc welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2020, vol. 25 (4), pp. 329–335. DOI: 10.1080/13621718.2019.1702284.
20. Liu Z., Chen S., Yuan X., Zuo A., Zhang T., Luo Z. Magnetic-enhanced keyhole TIG welding process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 99 (1), pp. 275–285. DOI: 10.1007/s00170-018-2501-0.

21. Manh N.H., Le Duy H., Akihisa M., Le V.T., Ngoc T.Q., Gandham B. Development of a novel GTAW process for joining ultra-thin metal sheets. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, vol. 80, pp. 683–691. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.06.043.
22. Sire S. New perspectives in TIG welding of aluminium through flux application. *Proceedings of the 7th International Symposium*, Kobe, Japan, 2001, pp. 113–118.
23. Huang Y., Fan D., Shao F. Alternative current flux zoned tungsten inert gas welding process for aluminium alloys. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2012, vol. 17 (2), pp. 122–127. DOI: 10.1179/1362171811Y.0000000087.
24. Konstantinova M.V., Balanovskiy A.E., Gozbenko V.E., Kargapol'tsev S.K., Karlina A.I., Shtayger M.G., Guseva E.A., Kuznetsov B.O. Application of plasma surface quenching to reduce rail side wear. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 560 (1), p. 012146. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012146.
25. Rana H., Badheka V., Patel P., Patel V., Li W., Andersson J. Augmentation of weld penetration by flux assisted TIG welding and its distinct variants for oxygen free copper. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, vol. 10, pp. 138–151. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.12.009.
26. Babu A.S., Giridharan P.K., Narayanan P.R., Narayana Murty S.V.S., Sharma V.M.J. Experimental investigations on tensile strength of flux bounded TIG welds of AA2219-T87 aluminum alloy. *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, 2014, vol. 13 (2), pp. 103–112. DOI: 10.1142/S0219686714500073.
27. Jayakrishnan S., Chakravarthy P., Muhammed Rijas A. Effect of flux gap and particle size on the depth of penetration in FBTIG welding of aluminium. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2017, vol. 70 (5), pp. 1329–1335. DOI: 10.1007/s12666-016-0929-1.
28. Kondratiev V.V., Karlina A.I., Guseva E.A., Konstantinova M.V., Kleshnin A.A. Processing and application of ultra disperse wastes of silicon production in construction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 463 (3), p. 032068. DOI: 10.1088/1757-899X/463/3/032068.
29. Yong H., Feng S., Ding F., Tao L. Flux zoned activating TIG welding of aluminum alloys. *Welding and Joining-Harbin*, 2007, vol. 5, pp. 47–49. (In Chinese).
30. Martyushev N.V., Skeebe V.Yu. The method of quantitative automatic metallographic analysis. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 803 (1), p. 012094. DOI: 10.1088/1742-6596/803/1/012094.
31. Voropai N.M., Lebedeva O.V., Boyko V.P. Fizicheskie svoystva svarochnykh shlakov na osnove TiO₂, obrazuyushchikhsya pri plavlenii aktivirovannykh provolok [Physical properties of welding slags based on TiO₂, formed during melting of activated wires]. *Avtomaticheskaya svarka = Automatic Welding*, 1989, no. 3, pp. 19–23.
32. Zhang R.H., Pan J.L., Katayama S. The mechanism of penetration increase in A-TIG welding. *Frontiers of Materials Science*, 2011, vol. 5, pp. 109–118. DOI: 10.1007/s11706-011-0125-5.
33. Singh S.R., Khanna P. A-TIG (activated flux tungsten inert gas) welding: – A review. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 44, pp. 808–820. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.712.
34. Wu H., Chang Y., Mei Q., Liu D. Research advances in high-energy TIG arc welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 104, pp. 391–410. DOI: 10.1007/s00170-019-03918-5.
35. Balanovskiy A.E. Digital visualisation of the process of heating and melting of metal in arc discharge with a non-consumable electrode. *Welding International*, 2017, vol. 31 (6), pp. 467–476. DOI: 10.1080/09507116.2016.1268765.
36. Narayanan R., Rameshkumar K., Sumesh A., Shankar B., Thekkuden D.T. Effect of Nano TiO₂ flux on depth of penetration and mechanical properties of TIG-welded SA516 Grade 70 steel joints – An experimental investigation. *Metals*, 2025, vol. 15 (4), p. 399. DOI: 10.3390/met15040399.
37. Tseng K.H., Lin P.Y. UNS S31603 stainless steel tungsten inert gas welds made with microparticle and nanoparticle oxides. *Materials*, 2014, vol. 7 (6), pp. 4755–4772. DOI: 10.3390/ma7064755.
38. Mamadaliev R.A., Bakhmatov P.V., Martyushev N.V., Skeebe V.Y., Karlina A.I. Influence of welding regimes on structure and properties of steel 12KH18N10T weld metal in different spatial positions. *Metallurgist*, 2022, vol. 65 (11–12), pp. 1255–1264. DOI: 10.1007/s11015-022-01271-9.
39. Balanovskiy A.E., Astafyeva N.A., Kondratyev V.V., Karlina A.I. Study of mechanical properties of C-Mn-Si composition metal after wire-arc additive manufacturing (WAAM). *CIS Iron and Steel Review*, 2021, vol. 22, pp. 66–71. DOI: 10.17580/cisr.2021.02.12.
40. Karlina A.I., Karlina Y.I., Kondratiev V.V., Kononenko R.V., Breki A.D. Study of wear of an alloyed layer with chromium carbide particles after plasma melting. *Crystals*, 2023, vol. 13 (12), p. 1696. DOI: 10.3390/cryst13121696.
41. Kolosov A.D., Gozbenko V.E., Shtayger M.G., Kargapol'tsev S.K., Balanovskiy A.E., Karlina A.I., Sivtsov A.V., Nebogin S.A. Comparative evaluation of austenite grain in high-strength rail steel during welding,



thermal processing and plasma surface hardening. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 560, p. 012185. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012185.

42. Malushin N.N., Gizatulin R.A., Martyushev N.V., Valuev D.V., Karlina A.I., Kovalev A.P. Strengthening of metallurgical equipment parts by plasma surfacing in nitrogen atmosphere. *Metallurgist*, 2022, vol. 65 (11–12), pp. 1468–1475. DOI: 10.1007/s11015-022-01292-4.

43. Nokhrina O.I., Gizatulin R.A., Golodova M.A., Proshunin I.E., Valuev D.V., Martyushev N.V., Karlina A.I. Alloying and modification of iron-carbon melts with natural and man-made materials. *Metallurgist*, 2022, vol. 65 (11–12), pp. 1429–1448. DOI: 10.1007/s11015-022-01289-z.

44. Yelemessov K., Baskanbayeva D., Martyushev N.V., Skeebe V.Y., Gozbenko V.E., Karlina A.I. Change in the properties of rail steels during operation and reutilization of rails. *Metals*, 2023, vol. 13, p. 1043. DOI: 10.3390/met13061043.

45. Kenjaev B., Paluanov D., Mamatkulov D., Romanova V. Methods and technologies for ensuring the reliability of excitation of synchronous generators of small hydroelectric power stations in Uzbekistan. *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 216, p. 01065. DOI: 10.1051/e3sconf/202021601065.

46. Solonina N., Suslov K., Solonina Z., Romanova V. Advanced approach to compensation of reactive power in isolated arctic electrical supply systems. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2032 (1), p. 012113. DOI: 10.1088/1742-6596/2032/1/012113.

47. Romanova V., Khromov S., Suslov K. Multi-factor analysis of external effects influencing the operational reliability of asynchronous electric motors. *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 216, p. 01084. DOI: 10.1051/e3sconf/202021601084.

48. Afolalu S.A., Ikumapayi O.M., Emetere M.E., Ongbali S.O. Investigation of mechanical properties and characterization of a joint using nano flux powder for a-tig welding. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 44, pp. 2879–2883. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.01.091.

49. Afolalu S.A., Samuel O.D., Ikumapayi O.M. Development and characterization of nano-flux welding powder from calcined coconut shell admixture with FeO particles. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, vol. 9 (4), pp. 9232–9241. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.06.067.

50. Karlina A.I., Kondratiev V.V., Gladkikh V., Vitkina G., Kononenko R.V. Otsenka proplavlyayushchei sposobnosti oksidnykh flyusov pri svarke A-TIG uglerodistykh i nizkolegirovannykh staley [Evaluation of the melting ability of oxide fluxes in A-TIG welding of carbon and low-alloy steels]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 4, pp. 96–115. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.4-96-115.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2026 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).