



Оценка проплавляющей способности оксидных флюсов при сварке A-TIG углеродистых и низколегированных сталей

Антонина Карлина^{1, a,*}, Виктор Кондратьев^{2, 3, b}, Виталий Гладких^{1, c}, Галина Витькина^{3, d},
 Роман Кононенко^{4, e}

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

² Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук, ул. Фаворского, стр. 1А, г. Иркутск, 664033, Россия

³ Череповецкий государственный университет, пр. Луначарского, 5, г. Череповец, 162600, Россия

⁴ Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, г. Иркутск, 664074, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0003-3287-3298>, karlinat@mail.com; ^b <https://orcid.org/0000-0002-7437-2291>, imz@mail.ru;

^c <https://orcid.org/0000-0003-1953-1584>, gladkikh_87@mail.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0002-1076-2709>, 20procents@mail.ru;

^e <https://orcid.org/0009-0001-5900-065X>, istu_politech@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.791

История статьи:

Поступила: 14 сентября 2025

Рецензирование: 07 октября 2025

Принята к печати: 23 октября 2025

Доступно онлайн: 15 декабря 2025

Ключевые слова:

Сварка

Активирующие флюсы

Глубина проплавления

Толщина покрытия

АННОТАЦИЯ

Введение. Сварка вольфрамовым электродом в среде инертного газа (TIG) получила широкое распространение благодаря таким преимуществам, как хороший защитный эффект, стабильная дуга, лёгкая регулировка тепловложения, уменьшение разбрзывания металла и привлекательный внешний вид сварного шва. Однако относительно неглубокое проплавление и низкая эффективность ограничивают её применение. Для повышения эффективности сварки и расширения сферы её применения отечественные и зарубежные учёные провели значительные исследования, направленные на повышение плотности энергии традиционной дуги TIG. К ним относятся активирующая дуговая сварка TIG (A-TIG) с использованием флюса, наносимого на поверхность сварочного стыка. Дальнейшее обсуждение механизма повышения плотности энергии дуги при сварке A-TIG позволит нам предложить новые идеи и методы для высокоеффективной технологии производства сварочных процессов TIG. **Цель настоящей работы:** оценка технологического потенциала метода применения оксидных активирующих флюсов TiO_2 и SiO_2 для повышения эффективности проплавления и качества сварочного процесса углеродистых и низколегированных сталей. **Методы и материалы исследований.** В работе проводили сравнительные испытания сварки A-TIG пластин толщиной 3,5 и 8 мм (300×300 мм), изготовленных из нелегированной (углеродистой) стали Ст3, а также низколегированной стали 09Г2С. Сварочные испытания включали в себя применение однокомпонентных флюсов в виде оксидов (TiO_2 , SiO_2). Все экспериментальные сварные швы выполнялись в одинаковых условиях, без использования присадочного металла (сварка TIG), током в диапазоне 10...200 А со скоростью сварки 150 мм/мин. Напряжение дуги ограничивалось в диапазоне от 10,4 до 12,8 В; погонная энергия – в диапазоне от 0,499 до 0,614 кДж/мм. Все сварные швы подвергались визуальному контролю состояния поверхности и макроструктурным исследованиям для определения их размеров. **Результаты и обсуждения.** В большинстве испытаний наблюдалось существенное различие в форме дуги по сравнению с традиционными процессами TIG и A-TIG. Результаты испытаний сварки A-TIG нелегированных и низколегированных сталей показали, что глубина проплавления незначительно увеличивалась в стальях, характеризующихся более высокой степенью раскисления и металлургической чистотой. Очевидно, что не каждый активатор отвечал за увеличение глубины проплавления, однако использование оксидов TiO_2 и SiO_2 оказалось, несомненно, благоприятным. Предложен механизм сжатия дуги для сварки A-TIG стали с различными типами исследованных флюсов. Сужение дуги происходит из-за образования отрицательных ионов во внешней области дуги или из-за флюса на поверхности. Таким образом, сужение дуги повышает плотность тока и интенсивность тепла в корне анода. Это увеличивает силу и давление магнитного сжатия, и таким образом возникает сильный конвекционный поток вниз. Использование оксидов кремния и титана (TiO_2 и SiO_2) приводит к увеличению глубины проплавления при сварке A-TIG, независимо от типа и марки стали. Степень увеличения глубины проплавления ограничивалась диапазоном от 40 до 200 %.

Для цитирования: Оценка проплавляющей способности оксидных флюсов при сварке A-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.

Введение

Сварка является предпочтительным методом соединения стали различных марок, позволяющим создавать прочные непрерывные соединения с превосходной коррозионной стойкостью по сравнению с болтовыми соединениями или заклепками. Сварка TIG (Tunsten Inert Gas), или

*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

GTA (Gas Tungsten Arc), получила широкое распространение благодаря своей точности и превосходному качеству сварного шва. В ней используется электрическая дуга и инертный газ (например, аргон), защищающий сварочную ванну от загрязнений. Этот метод очень эффективен для тонких или хрупких материалов, он обеспечивает малую деформацию, превосходный контроль и полированную поверхность, что делает его подходящим для применений в деталях машин и механизмов, требующих как прочности, так и точности.

Несмотря на свои преимущества, сварка TIG имеет ограничения, особенно по глубине проплавления. Обычно при сварке TIG нержавеющих сталей в среде аргона полное проплавление ограничивается швами толщиной не более 3 мм и относительно низкой скоростью сварки. Хотя скорость сварки может быть существенно увеличена (до 160 %) при использовании гелия или водорода в качестве защитного газа, но глубина проплавления шва увеличивается лишь незначительно (на 1...2 мм) [1–3]. Возможность улучшения проплавления выбором защитной смеси дополнительно ограничивается необходимостью использования инертных или слабо восстанавливющих газов, что ограничивает выбор в основном смесями аргона и гелия.

Как уже было сказано выше, один проход стыковых соединений с прямоугольными кромками обеспечивает проплавление около 3 мм, это приводит к необходимости повторных проходов для более толстых материалов, что увеличивает время и стоимость сварки. Дополнительные проходы выделяют еще больше тепла, расширяя зону термического влияния (ЗТВ) и потенциально изменяя как металлургические, так и микроструктурные характеристики сварного шва. Более толстые компоненты требуют более широких корневых зазоров и большего количества присадочного материала, что увеличивает расход материала и время сварки [1–3].

Подготовка кромок для сварки TIG, особенно для материалов большой толщины, является трудоёмкой и занимает много времени. Стандарт ISO 9692-1:2013 предписывает скос или разделку кромок для уменьшения толщины шва в корне, обеспечивая тем самым достаточное проплавление. Однако эта процедура увеличивает

трудоемкость, продолжительность сварки и общие расходы [1–5].

Для устранения этих ограничений была разработана технология активирующей сварки TIG (A-TIG), предполагающая нанесение тонкого слоя активирующего флюса (обычно оксидов или галогенидов в сочетании с растворителями, такими как ацетон или этанол) на основной материал перед сваркой [1, 2]. Метод сварки A-TIG (A-GTAW) с активирующим флюсом впервые был применен в Институте электросварки им. Е. О. Патона, Украина, в конце 1950-х – начале 1960-х годов [1–3]. Первоначально метод A-TIG использовался при сварке титана, затем – при сварке мартенситных высокопрочных сталей ($Re \approx 1500$ МПа) и, наконец, при сварке нержавеющих сталей [3–10].

Свободно горящая аргоновая дуга сжимается в плазменную дугу посредством механического, термического и магнитного сжатия. Плотность энергии плазменной дуги на 1–2 порядка выше, чем у обычной свободно горящей дуги, что делает плазменную дуговую сварку (PAW) одним из трёх методов сварки с высокой плотностью энергии. Механизм сжатия дуги открывает новый метод повышения плотности энергии дуги TIG. На этой основе разработано множество методов повышения плотности энергии дуги TIG. К ним относятся активирующая дуговая сварка TIG (A-TIG), двухэлектродная сварка TIG (T-TIG), сварка TIG в замочную скважину (K-TIG), высокочастотная импульсная сварка TIG (H-TIG), гибридная дуговая сварка TIG с ультразвуком (U-TIG), сварка TIG с контролем магнитного поля (M-TIG) и сварка полой вольфрамовой дугой с центральным отрицательным давлением.

В последние годы исследователи [3–19] уделяли большое внимание технологии сварки A-TIG различных металлов и сплавов. Было опубликовано много исследовательских статей отечественных и зарубежных авторов о сварке стали методом TIG с различными активирующими флюсами и их комбинациями [8–25].

Многие авторы [8–16] исследовали влияние пяти различных оксидных флюсов – MnO_2 , TiO_2 , MoO_3 , SiO_2 и Al_2O_3 – на изменение размеров сварного шва, микроструктурное поведение и изменение твердости при сварке TIG нержавеющей стали толщиной 6...8 мм. Все флюсы, за исключением Al_2O_3 , приводят к увеличению

проплавления из-за комбинированного эффекта, обратного эффекта Марангони и сужения дуги, тем самым уменьшая угловую деформацию сварных соединений. Кроме того, флюс SiO_2 облегчал проплавление корневого прохода. Трудность растворения оксида алюминия приводит к отсутствию сужения дуги, поэтому в случае Al_2O_3 наблюдается неглубокий сварной шов. Другое исследование было проведено в [16] на нержавеющей стали с флюсами SiO_2 , TiO_2 , Cr_2O_3 и CaO . В данной работе отмечено, что флюс SiO_2 оказывает наиболее значительное влияние на проплавление, и предложен механизм сжатия дуги для более глубокого проплавления.

Авторы работ [16–22] проанализировали микроструктуру, механические свойства и коррозионную стойкость сварных соединений A-TIG, что выявило механизм улучшения микроструктуры сварных соединений A-TIG.

В работах [5–9, 18–22] провели разработку и оптимизацию состава композитного активатора на основе наночастиц, что дополнительно прояснило связь между активатором и формированием и качеством сварного шва. Во многих работах [4–16] показано, что большинство активаторов могут значительно сжимать дугу и увеличивать глубину проплавления, а также уменьшать ширину сварного шва.

Согласно исследованиям [17–22], не все так однозначно по вопросу, что течение за счет эффекта Марангони расплавленной ванны служит основной причиной увеличения проплавления, но при этом сжатие дуги не является неизбежным явлением A-TIG. Некоторые активаторы могут сжимать дугу, в то время как другие не влияют на состояние дуги. Однако сжатие дуги неизбежно приведёт к увеличению плотности энергии дуги.

Влияние активирующих флюсов Cr_2O_3 , TiO_2 , SiO_2 , Fe_2O_3 , NaF и AlF_3 по отдельности и в виде бинарных флюсов типа $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ исследовалось во многих статьях [5–29], где в качестве критерия оценки выступала глубина проплавления. При этом отмечается в одних случаях положительное влияние активирующих флюсов (особенно оксидов) на глубину проплавления (увеличение на 40–50 %) [15–25], а в других случаях, наоборот, незначительное влияние [4, 5, 30–38]. Такое положение связано с тем, что в большинстве работ [15–39] рассмотрены различные условия веде-

ния сварочного процесса (сила тока, напряжение на дуге, скорость сварки, толщина покрытия, тип связующего вещества при приготовлении флюса, дисперсность частиц флюса и др.). Все эти факторы, как отмечают авторы [1, 2], будут влиять на проплавляющую способность сварочной дуги и, как следствие, на оценку эффективности и применения активирующего флюса.

Цель работы – провести оценку проплавляющей способности при сварке A-TIG с использованием оксидных флюсов TiO_2 и SiO_2 на углеродистых и низколегированных сталях. Для достижения данной цели в процессе исследования решались следующие **задачи**:

- определение технологических параметров процесса сварки A-TIG с использованием оксидных флюсов TiO_2 и SiO_2 (сила тока, толщина покрытия, скорость сварки), влияющих на проплавляющую способность;
- проведение металлографических исследований сварных швов при сварке A-TIG с использованием оксидных флюсов TiO_2 и SiO_2 ;
- проведение визуализированных исследований процесса с фотофиксацией отдельных стадий процесса.

Методы и материалы исследований

Для проведения экспериментов использовали пластины из стали Ст3 размерами 5500×100 мм и толщиной 3, 5, 8, 10, 12, 25 мм, а также из низколегированной стали 09Г2С. Сварочные испытания включали в себя применение однокомпонентных флюсов в виде порошков оксидов (TiO_2 , SiO_2) фракцией 40, 80 мкм (производитель ООО «Реал-Дзержинск», РФ). Компоненты измельчали в керамической ступке и затем просеивали через лабораторное сито с размером ячеек 0,056 мм. Перед нанесением компонент смешивали с быстроиспаряющейся жидкостью (ацетоном) для получения густой взвеси. Приготовленный таким образом флюс наносили на поверхности пластин кистью. Этот способ нанесения активирующего флюса в настоящее время используется во всех исследованиях, касающихся процесса A-TIG. Применялся также лак и скотч. Для достижения одинаковой толщины флюса и минимизации влияния этого фактора на результаты испытаний плотность пасты всегда была одинаковой. Толщиномером ТП-34 на ос-

нове вихревого преобразователя проводили контроль нанесения покрытия. Методология, принятая для экспериментальной работы, представлена на рис. 1.

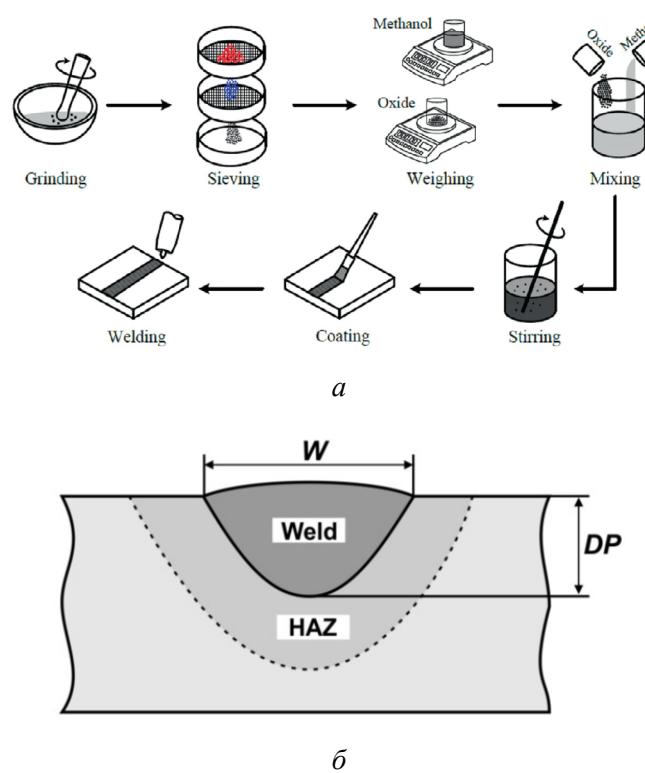


Рис. 1. Методология [29] приготовления активирующих флюсов:

параметры сварного шва (а); W – ширина шва; DP – глубина проплавления; HAZ – зона термического влияния; $Weld$ – сварной шов (б)

Fig. 1. Methodology [29] for the preparation of activating fluxes:

weld parameters (a); (W – weld width; DP – penetration depth; HAZ – heat-affected zone; $Weld$) (б)

Все экспериментальные сварные швы выполнялись в одинаковых условиях, без использования присадочного металла (сварка TIG), током в диапазоне 10...200 А со скоростью сварки 150 мм/мин. Напряжение дуги ограничивалось в диапазоне от 10,4 до 12,8 В; погонная энергия – в диапазоне от 0,499 до 0,614 кДж/мм. Эксперименты по сварке проводились с использованием сварочной установки TIG 250P AC/DC, состоящей из источника питания для сварки TIG, сварочного приспособления, горелки TIG и баллона с аргоном. Диапазон тока оборудования для сварки TIG составлял от 10 до 200 А, напряжение холостого хода – от 75 до 85 В, частота – 50/60 Гц, применялось принудительное воздушное охлаждение.

Расстояние между электродами, скорость сварки и сварочный ток являются наиболее влиятельными переменными, которые требуют оптимального управления для получения точных и повторяемых экспериментальных результатов. Сварочное приспособление было разработано собственными силами для надежного крепления горелки и заготовки и точного контроля скорости сварки и расстояния между электродами во время сварки. Приспособление удерживает опорную плиту для сварки и устанавливает желаемую скорость сварки в диапазоне от 40 до 200 мм/мин. Расход защитного аргона ограничивался в диапазоне от 10 до 15 л/мин. Использовался вольфрамовый электрод (диаметром 2,4 мм) с добавлением оксида тория (марки WT20 по EN ISO 6848). Все сварные швы подвергались визуальному контролю состояния поверхности и макроструктурным исследованием для определения их размеров. Образцы для микроструктурного исследования проплавляли реактивом. Ширину сварных швов измеряли через каждые 10 мм (между точками измерения) по всей длине сварных швов. Для статистической обработки результатов проводили по три эксперимента на каждый режим обработки, затем выполняли усреднение результатов.

Образцы для макроструктурных исследований отбирались из центральной части сварного шва. Процесс горения дуги фиксировался цифровой зеркальной камерой -á SONY 350 и высокоскоростной камерой PCO.1200c по методике, изложенной в работе [15]. Для измерения тока и напряжения использовался цифровой осциллограф Tektronix TDC-1012B.

Результаты исследований

Результаты макроструктурных испытаний сварных швов, выполненных на отдельных марках сталей с использованием различных активирующих флюсов (TiO_2 , SiO_2), представлены на рис. 2–4, а результаты измерений глубины проплавления и ширины шва – в таблице.

Макроскопические изображения геометрии сварного шва при 50-кратном увеличении показаны на рис. 2 с калиброванными измерениями глубины проплавления и ширины шва. Глубина проплавления, ширина валика сварного шва и их соотношение являются тремя метриками, опи-

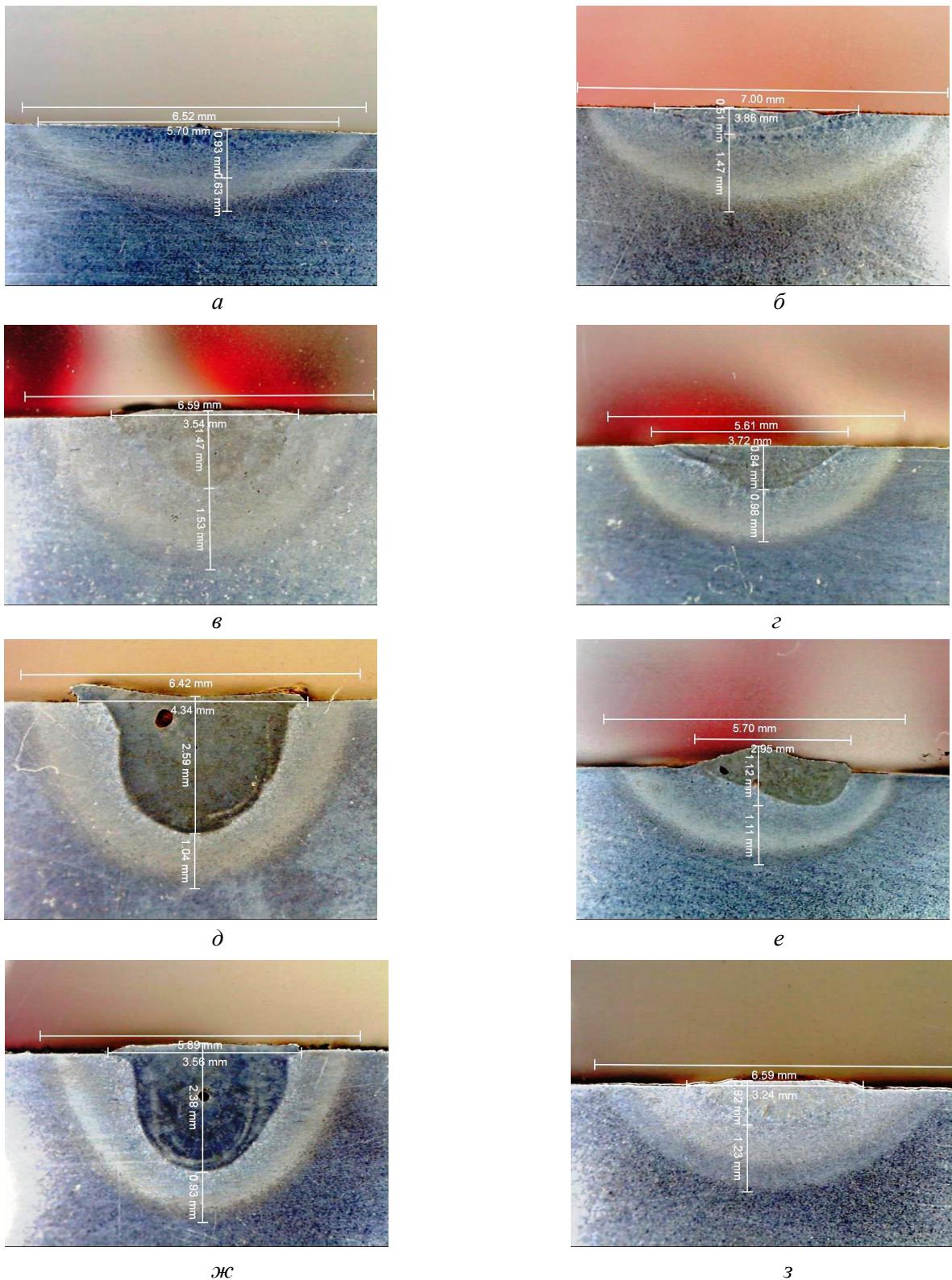


Рис. 2. Поперечные шлифы стали:

a – без флюса и без оплавления поверхности (сила тока 100 А); б – без флюса и с оплавлением поверхности (сила тока 120 А); в – оксид кремния (сила тока 120 А); г – оксид титана (сила тока 120 А); д – оксид кремния (сила тока 150 А); е – оксид титана (сила тока 150 А); жс – оксид кремния (сила тока 160 А); з – оксид титана (сила тока 160 А)

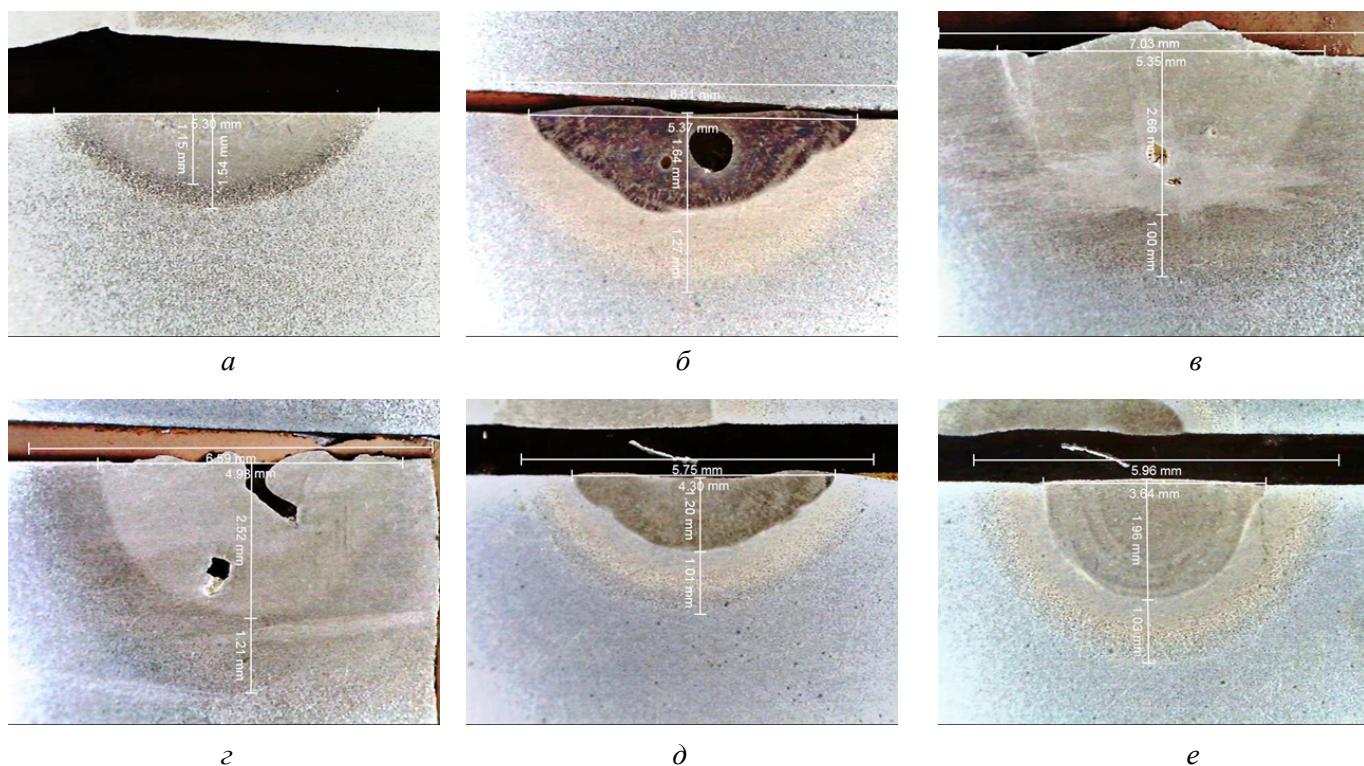
Fig. 2. Cross sections of steel:

a – without flux and without surface melting (current 100 A); б – without flux and with surface melting (current 120 A); в – silicon oxide (current 120 A); г – titanium oxide (current 120 A); д – silicon oxide (current 150 A); е – titanium oxide (current 150 A); жс – silicon oxide (current 160 A); з – titanium oxide (current 160 A)

Влияние состава активирующих флюсов различной дисперсности на ширину и глубину проплавления

The influence of the composition of activating fluxes of different particle size on the width and depth of penetration

Сила тока, А / Current, A	Флюс, нанесенный на сталь Ст3 / Flux applied to St3 steel	Глубина проплавления, мм / Depth of penetration, mm	Ширина проплавления, мм / Penetration width, mm
100	Без флюса	1,15	5,3
100	SiO ₂ 0,04 (двусторонний проводящий скотч и лак)	1,64	5,37
100	SiO ₂ 0,08 (лак)	2,66	5,35
100	SiO ₂ 0,04 (лак)	2,52	4,98
100	SiO ₂ 0,08 (двусторонний проводящий скотч и лак)	1,2	4,3
100	Аэросил (лак)	1,96	1,96



Rис. 3. Поперечные шлифы (сила тока 100А):

а – без флюса; б – SiO₂ 0,04 (двусторонний проводящий скотч, связующий лак); в – SiO₂ 0,08 (связующий лак); г – SiO₂ 0,04 (связующий лак); д – SiO₂ 0,08 (двусторонний проводящий скотч, связующий лак); е – аэросил (связующий лак)

Fig. 3. Cross sections (current 100A):

а – without flux; б – SiO₂ 0.04 (double-sided conductive tape, bonding varnish); в – SiO₂ 0.08 (bonding varnish); г – SiO₂ 0.04 (bonding varnish); д – SiO₂ 0.08 (double-sided conductive tape, bonding varnish); е – Aerosil (bonding varnish)

сывающими геометрические характеристики сварных швов.

Геометрические характеристики сварных швов А-TIG, полученных при выбранных сочетаниях тока, скорости и флюса, показаны

в таблице и на рис. 2, 3. Глубина проплавления и ширина валика металла шва при сварке А-TIG значительно отличались от параметров нанесения флюса и связующего. Разные сочетания флюса и способа нанесения приводят к различ-

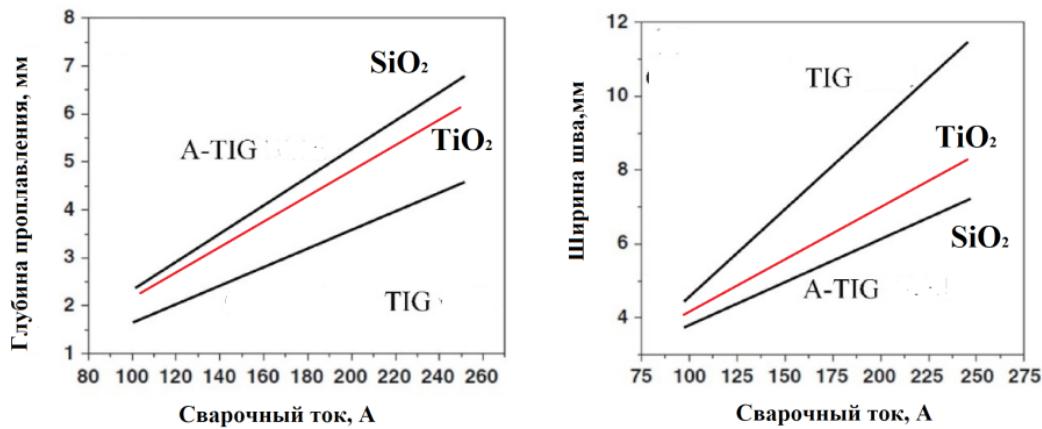


Рис. 4. Изменение геометрических размеров зоны плавления на пластине сталь 3 толщиной 20 мм (глубины проплавления и ширины сварного шва) при изменении тока при сварке TIG и A-TIG

Fig. 4. Change in the geometric dimensions of the melting zone on a steel St3 plate, 20 mm thick (penetration depth and weld width) with changing current during TIG and A-TIG welding

ным изменениям глубины проплавления и ширины валика по сравнению с другими параметрами сварки. Эффект увеличения глубины проплавления для одного значения сварочного тока хорошо виден, когда в процессе сварки используется активирующий флюс (см. таблицу, рис. 2–4).

В ходе проведенных экспериментов установлено, что при сварке A-TIG максимальная глубина проплавления достигается при высоких сварочных токах, но для обычного TIG увеличение проплавления ограничено, как показано на рис. 4.

Повышение тока также приводит к большей ширине сварного шва (рис. 4). Толщина покрытия оказывает сильное влияние на глубину проплавления, поскольку слой флюса увеличивает глубину проплавления шва. Глубина проплав-

ления зависит от сварочного тока, оптимальная толщина слоя флюса всё же важна для получения качественного сварного шва. На рис. 5 показана кривая зависимости проплавления от толщины покрытия, а на рис. 6 – от химического состава стали.

На рис. 7–10 представлены фотографии процесса плавления различных составов активирующих флюсов на поверхности стали 3 при сварке TIG и A-TIG. Процесс сварки без флюса визуализирован на рис. 7. Видно диффузионное горение сварочной дуги без анодных и катодных факелов. Столб дуги имеет колоколообразную форму.

На рис. 8 показан процесс сварки с нанесенным флюсом SiO₂ фракции 0,08 мм с использо-

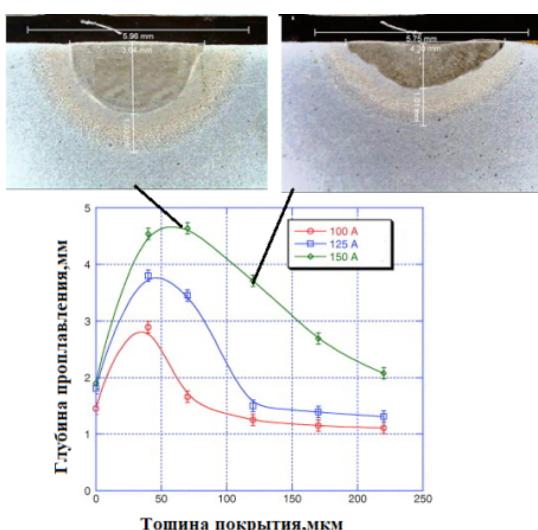
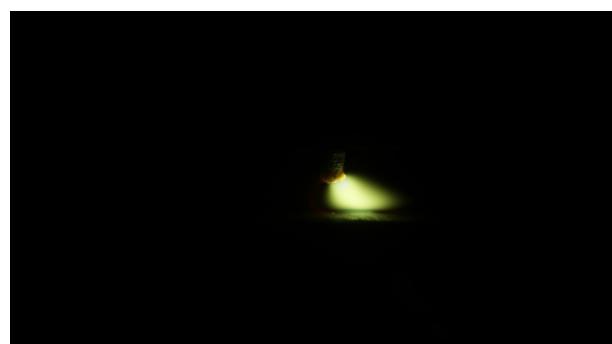
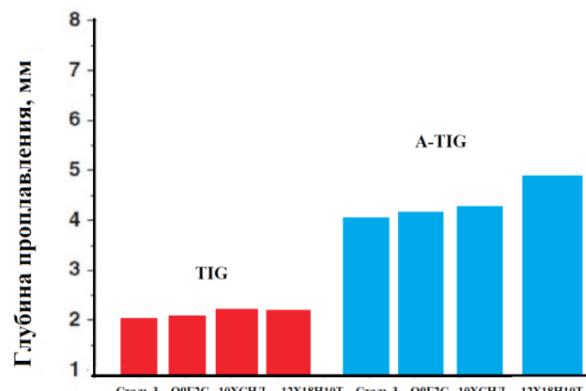


Рис. 5. Влияние изменения толщины покрытия на глубину проплавления

Fig. 5. Effect of changing coating thickness on penetration depth

Рис. 6. Зависимость глубины проплавления от химического состава стали (толщина пластины 10 мм, сила тока 200 А)

Fig. 6. Dependence of penetration depth on chemical composition of steel (plate thickness 10 mm, current 200 A)

*a**б**в**г*

*Рис. 7. Процесс сварки стали 3 без флюса:
а, б, в, г – стадии перемещения сварочной дуги по образцу*

*Fig. 7. The process of welding steel-3 without flux:
a, b, v, g – stages of movement of the welding arc along the sample*

ванием связующего ацетона. Видно интенсивное плавление активирующего флюса и дуговой столб искривляется, появляется мощный анодный факел, направленный в сторону катода. Электрическая дуга перешла в контракционный режим привязки с образованием анодного пятна.

Время нагрева поверхности с нанесенным активирующим флюсом по сравнению с нагревом поверхности без активирующего флюса увеличилось, что приводит к искривлению столба дуги и отставанию анодного пятна от оси столба. Это вызывает удлинение дугового промежут-

ка и, как следствие, повышение напряжения на дуге, что сопровождается увеличением эффективной тепловой мощности ($P = UI$). Та же ситуация представлена на рис. 9. Здесь изображены фотографии процесса плавления активирующего флюса SiO_2 фракции 0,08 с использованием связующего лака.

На рис. 10 представлены фотографии процесса плавления активирующего флюса SiO_2 фракции 0,04 мм с использованием связующего лака. Так же как и для фракции 0,08, время нагрева поверхности с нанесенным активирую-

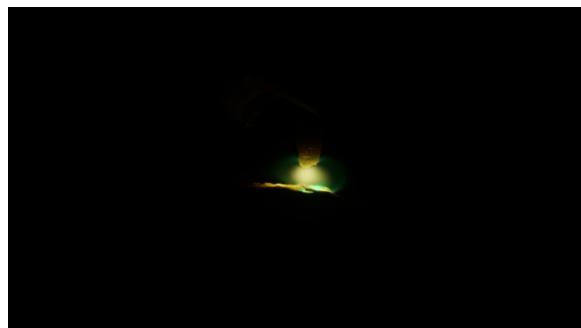
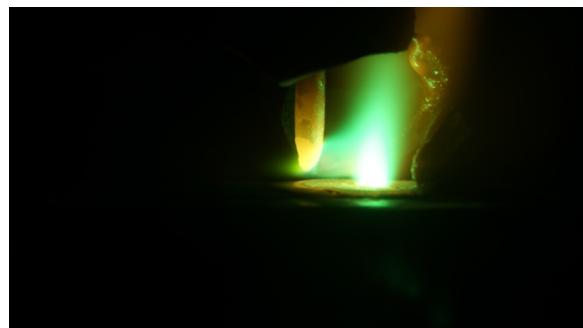
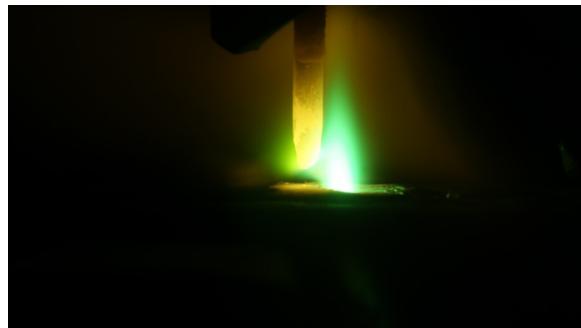
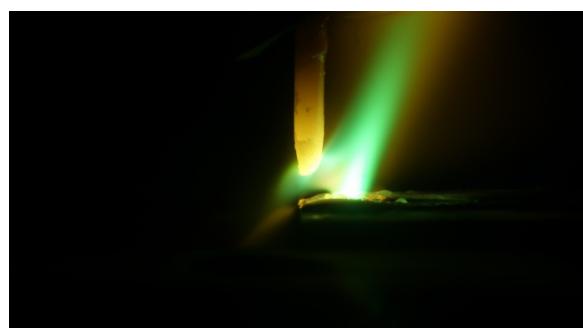
*a**b**c**d*

Рис. 8. Процесс сварки стали Ст3 с нанесенным флюсом SiO₂ фракции 0,08 мм с использованием связующего ацетона:

а, б, в, г – стадии перемещения сварочной дуги по образцу

Fig. 8. The process of welding steel St3 with applied flux SiO₂, particle size 0.08 mm, using acetone as a binder:

а, б, в, г – stages of movement of the welding arc along the sample

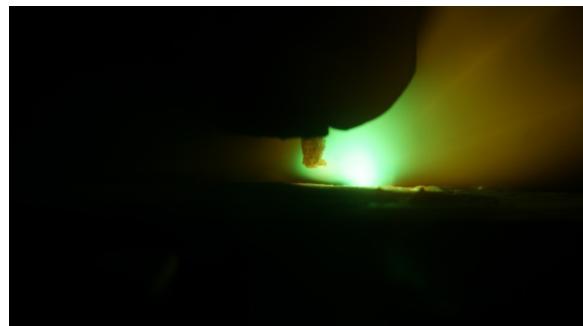
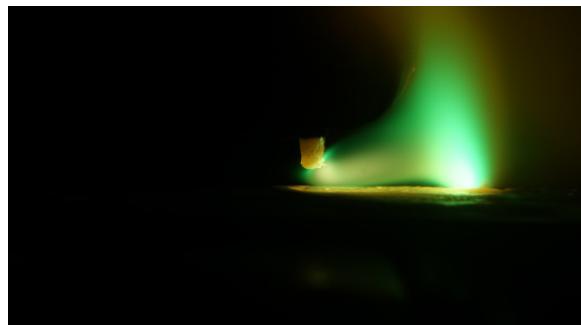
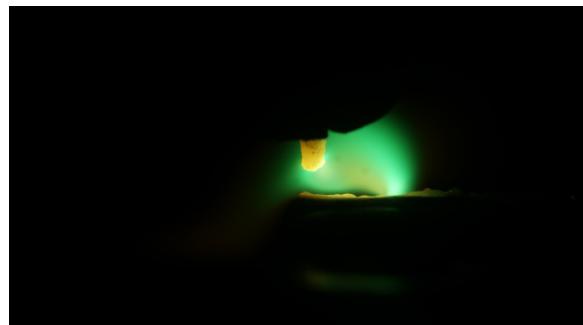
*a**b**c**d*

Рис. 9. Процесс сварки стали 3 с нанесенным флюсом SiO₂ фракции 0,08 мм с использованием связующего лака:

а, б, в, г – стадии перемещения сварочной дуги по образцу

Fig. 9. The process of welding steel St3 with applied flux SiO₂ particle size 0.08 mm using a bonding varnish:

а, б, в, г – stages of moving the welding arc along the sample

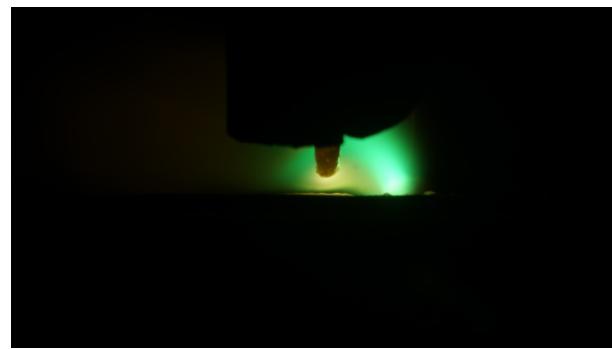
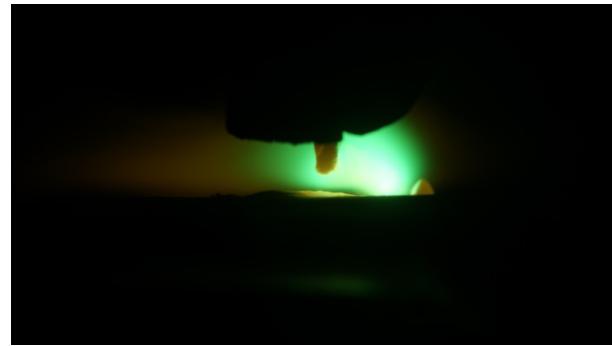
*a**b**c**d*

Рис. 10. Процесс сварки стали 3 с нанесенным флюсом TiO_2 фракции 0,04 мм с использованием связующего лака:

a, б, в, г – стадии перемещения сварочной дуги по образцу

Fig. 10. The process of welding steel St3 with applied flux with TiO_2 particle size of 0.04 mm using a bonding varnish:

a, б, в, г – stages of movement of the welding arc along the sample

щим флюсом по сравнению с нагревом поверхности без активирующего флюса увеличилось, что приводило к искривлению столба дуги и отставанию анодного пятна от оси столба, двигающегося со скоростью 3,3 мм/сек. В начальный момент зажигания дуги столб имеет стандартное пространственное положение, по прошествии 0,24 секунды начинается интенсивное плавление активирующего флюса и дуговой столб искривляется, появляется мощный анодный факел, направленный в сторону катода. Длина факела на 20–30 % больше, чем для фракции 0,08 мм. Отмеченные особенности плавления активирующих флюсов и поведения столба дуги на рис. 8–10 сохраняются и для других составов.

На рис. 11 представлены осциллограммы процесса горения дуги без флюса и с флюсом. Видно, что дуга, горящая по слою флюса, имеет более высокие значения напряжения из-за контракционного режима горения.

На рис. 12 показан процесс сварки образцов из стали 3 с флюсом TiO_2 , нанесенным слоем

1,5 мм с использованием связующего лака, на рис. 13 – из стали 3 с флюсом TiO_2 С слоем толщиной 0,5 мм.

Обсуждение результатов

Результаты экспериментов показывают, что глубина проплавления увеличилась практически во всех случаях, независимо от применения флюса. Сравнение влияния активирующих флюсов на глубину проплавления при сварке A-TIG низколегированных сталей и нержавеющей стали выявило аналогичное влияние оксидов TiO_2 , SiO_2 в отношении обеих групп сталей. Влияние оксидами, а точнее кислорода, поставляемого оксидами в сварочную ванну, хорошо объясняется конвекцией Марангони, что отмечено во многих научных публикациях [3–29].

Представлены изображения дуги, полученные в ходе некоторых испытаний. В большинстве испытаний не наблюдалось существенных различий в форме дуги по сравнению с традици-

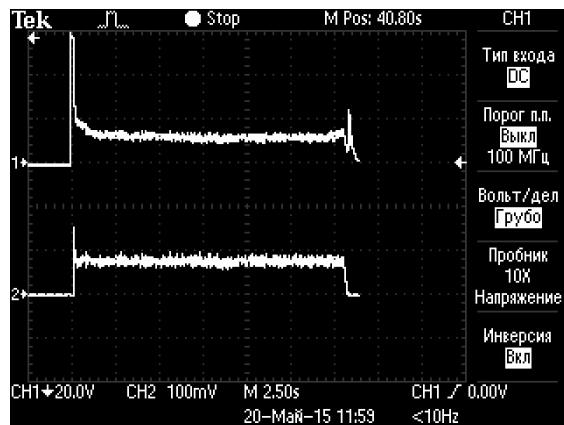
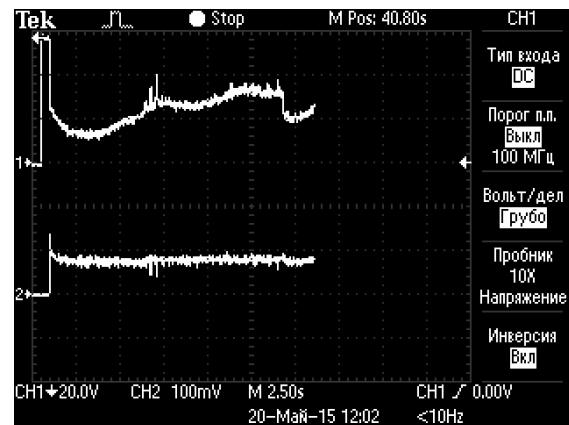
*a**b*

Рис. 11. Осциллограммы тока и напряжения сварочной дуги:

a – без флюса; *б* – с флюсом

Fig. 11. Oscillograms of current and voltage of the welding arc:

a – without flux; *б* – with flux

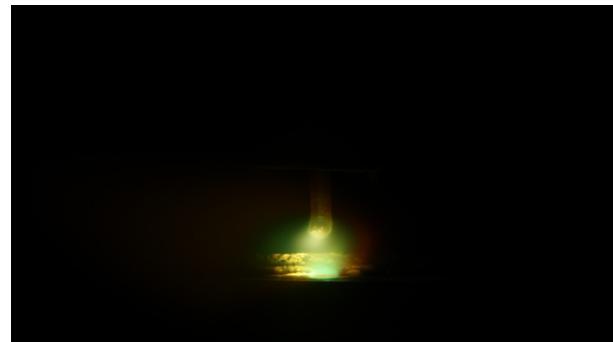
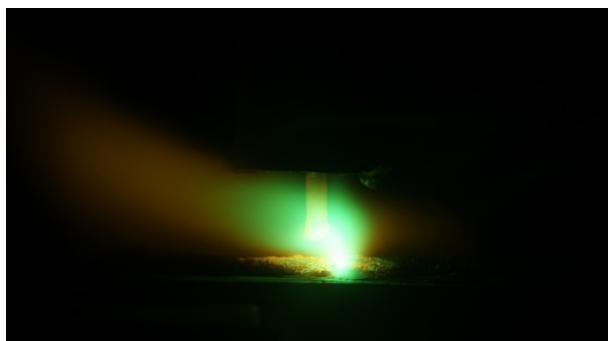
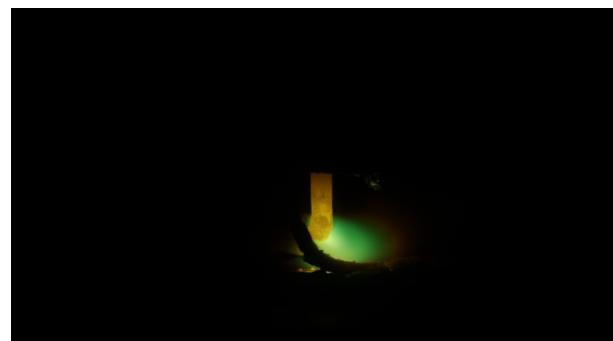
*a**b**b**c*

Рис. 12. Процесс сварки стали 3 с TiO_2 , нанесенным слоем 1,5 мм с использованием связующего лака:

a, б, в, г – стадии перемещения сварочной дуги по образцу

Fig. 12. The process of welding steel St3 with TiO_2 applied in a 1.5 mm layer using a bonding varnish:

a, б, в, г – stages of movement of the welding arc along the sample

онными процессами TIG и A-TIG. В некоторых испытаниях с использованием флюса SiO_2 электрическая дуга, по-видимому, имела тенденцию к отклонению в прямом направлении. Этот тип флюса также вызывал наиболее сильные изменения напряжения дуги – как минимум вдвое

больше значений, полученных с другими флюсами.

Наблюдается, что толщина покрытия оказывает очень сильное влияние на проплавление сварного шва (рис. 5). Проплавление сварного шва сначала линейно увеличивается с толщиной

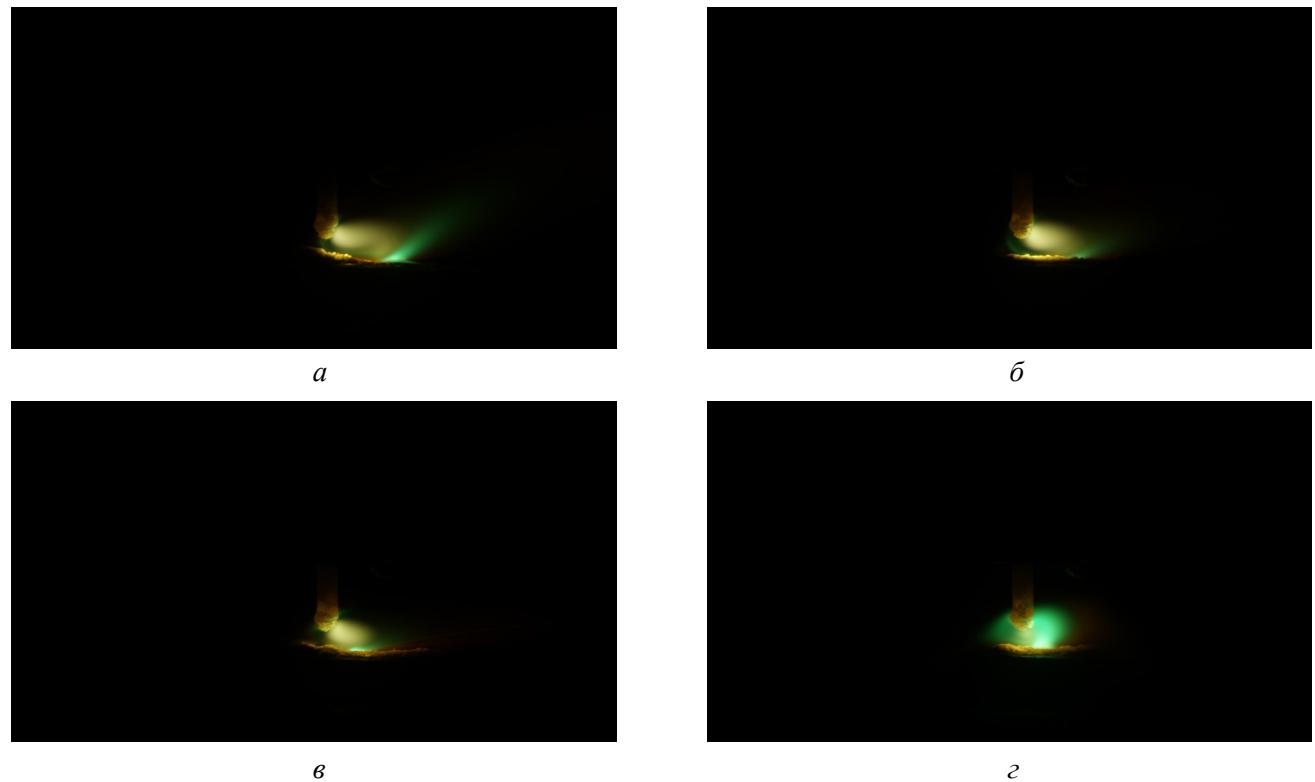


Рис. 13. Процесс сварки стали 3 с флюсом TiO_2C , нанесенным слоем 0,05 мм с использованием связующего лака:

a, б, в, г – стадии перемещения сварочной дуги по образцу

*Fig. 13. The process of welding steel St3 with TiO_2C flux applied in a 0.05 mm layer using a bonding varnish:
a, б, в, г – stages of movement of the welding arc along the sample*

покрытия до 50...70 мкм, а затем показывает тенденцию к снижению (рис. 5). Проплавление сварного шва TIG соответствует нулевой толщине покрытия и составляет от 1,4 до 1,9 мм для исследованных сварочных токов от 100 до 150 А. В зависимости от сварочного тока максимальное проплавление в A-TIG достигается для толщины покрытия от 40 до 70 мкм. Наблюдаемые максимальные значения проплавления сварного шва составляют 4,8, 3,9 и 2,9 мм соответственно для сварочных токов 150, 125 и 100 А. Оптимальная толщина, по-видимому, увеличивается с повышением сварочного тока. Например, максимальная глубина проникновения около 40 мкм достигается при 100 А, около 70 мкм – при 150 А. Таким образом, оптимизация толщины покрытия зависит от электрической мощности сварочной дуги.

При превышении оптимальной толщины покрытия проплавление значительно уменьшается. Это быстрое падение можно объяснить более высоким расходом энергии, необходимым для преодоления барьера флюса. Кремний

по сути непроводящий материал и обеспечивает высокое электрическое сопротивление дуге. Стабильная дуга устанавливается только после того, как флюс становится жидким или полностью удаляется путем испарения. Поскольку расход энергии на этот эффект увеличивается с толщиной покрытия, то доля падающей энергии, эффективно используемая для создания сварочной ванны, значительно снижается.

Кроме того, по мере увеличения толщины покрытия электрическая дуга неустойчива из-за нерасплавленного флюса, обеспечивающего более высокое электрическое сопротивление на продвигающейся стороне. Это вызывает изменение профиля дуги, которая затем растягивается назад к расплавленной ванне (рис. 7–9). Такой эффект замыкания становится все более важным с увеличением толщины покрытия для заданного тока или для заданной толщины при снижении сварочных токов. Даже при оптимальной толщине покрытия около 50 мкм (рис. 7–9) эффект замыкания наблюдается при сравнении кадров видео TIG и A-TIG. Эффект замыкания связан

с более высоким электрическим сопротивлением оксида кремния, которое уменьшается с ростом температуры, особенно когда кремний переходит в жидкую фазу. Поскольку плавление происходит при более высокой температуре на продвигающейся стороне, то дуга имеет тенденцию отставать от кончика продвигающегося электрода. Указанное замыкание дуги увеличивает эффективную длину и частично способствует повышению напряжения с покрытием, как сообщается далее в этой статье.

В процессе A-TIG наблюдается улучшение отношения глубины проплавления к ширине валика (DOP), достигаемое за счёт эффекта «механизмов сжатия дуги» и «обратной конвекции Марангони», также известной как конвекция, вызванная поверхностным натяжением, или термокапиллярная конвекция. При конвекции Марангони, когда активирующий флюс наносится на заготовку, он поставляет поверхностно-активный элемент кислорода в сварочную ванну. Это изменяет градиент поверхностного натяжения внутрь к центру; таким образом, содержание кислорода влияет на характер течения жидкости в сварочной ванне [5].

Связь поверхностного натяжения с температурой была рассмотрена в работах [6–21]. Было установлено, что при сварке стали с низким содержанием серы и кислорода поверхностное натяжение уменьшается с повышением температуры, вызывая общий отрицательный градиент поверхностного натяжения. Это приводит к радиально направленному наружу потоку в сварочной ванне. Данный факт подробно рассмотрен в работе [22]. Авторы считают, что концентрации поверхностно-активных элементов выше 50 ppm влияют на направление и величину термокапиллярных сил [22], что изменяет величину поверхностного натяжения в сварочной ванне с отрицательной на положительную [6–12].

Течение в сварочной ванне происходит от более низкого поверхностного натяжения (более холодная жидккая сварочная ванна) к более высокому поверхностному натяжению (более теплая жидккая сварочная ванна), в результате чего расплавленный металл на верхней поверхности течет к центру сварочной ванны, создавая внутренний поток [10–16]. Этот внутренний поток обеспечивает более глубокое проникновение и более узкий валик. Именно это изменение на-

правления градиента поверхностного натяжения объясняет изменение направления потока Марангони.

В механизме сжатия дуги электроотрицательность потока играет важную роль [6, 7]. Дуга, существующая на поверхности покрытой флюсом заготовки, при температуре столба дуги производит большое количество положительных ионов [4]. Можно сделать вывод, что электроны поглощаются парами вокруг сварочной ванны, что приводит к уменьшению количества заряженных частиц, присутствующих в дуге. Высокоэлектроотрицательный заряженный пар толкает столб дуги внутрь в радиальном направлении. Образующиеся ионы притягивают свободные электроны, присутствующие в столбе дуги, создавая сжатие дуги, и основной металл плавится, способствуя более глубокому проплавлению [5–22].

Электромагнитные силы Лоренца также увеличивают отношение глубины проплавления к ширине валика (DOP) в механизме A-TIG. С повышением сварочного тока величина сил Лоренца увеличивается. Чем меньше радиус этого пятна, тем выше сила Лоренца [18–20]. Большая сила Лоренца действует вертикально вниз в центре расплавленной сварочной ванны и увеличивает DOP. Электромагнитные силы Лоренца и силы Марангони управляют конвекцией сварочной ванны и увеличивают DOP. Сварочная ванна испытывает действие таких движущих сил, как сила выталкивания под действием силы тяжести, аэродинамическое напряжение сдвига и сила реакции от испарения на поверхности сварочной ванны. Все они эффективно улучшают провар в процессе A-TIG, но их роль минимальна по сравнению с действующей силой Марангони, и, следовательно, ими можно пренебречь при анализе на микровеличине.

В ходе проведенных исследований установлено, что геометрия сварного шва, безусловно, зависит от переменных параметров, которые важно точно контролировать для достижения наилучшего качества сварки. Некоторые из этих параметров, влияющих на процесс A-TIG, обсуждаются ниже.

Во многих работах [5–26] отмечается, что разложение флюса зависит от скорости его реакции, которая, в свою очередь, зависит от удельной площади частиц. Поэтому экспери-

ментально установлено [5–22], что частицы флюса размером от 0,8 до 4 мкм улучшают проплавление. При использовании крупных частиц (25 мкм) этот эффект не наблюдается, поскольку они обладают слабой способностью к разложению. Более мелкие частицы флюса имеют большую удельную площадь по сравнению с более крупными, что приводит к лучшему разложению [12]. С увеличением толщины флюса увеличивается и тепло, необходимое для преодоления барьера флюса, что снижает глубину проплавления при данном значении тока. Хотя известно, что проплавление зависит от сварочного тока, оптимальная толщина слоя флюса всё же важна для получения качественного сварного шва [4–16].

Важно понимать, что перед нанесением слоя флюса его переводят в пастообразное состояние, смешивая порошкообразный флюс с подходящим растворителем, который должен испариться до начала процесса сварки. Из различных жидких носителей наиболее часто используются ацетон и спирт. Эксперименты показывают, что ацетон является растворителем, демонстрирующим наилучшие результаты, он обеспечивает максимальное проплавление [10–14]. В то же время во многих работах вопросу влияния типа растворителя не уделяется пристального влияния, что, возможно, влияет на полученные результаты.

Сварочный ток напрямую влияет на геометрические характеристики сварного шва, такие как площадь поперечного сечения, ширина и глубина шва. При сравнении сварки TIG и A-TIG наблюдается почти двукратная разница в глубине проплавления при увеличении тока. Для TIG с более высокими значениями тока прирост ширины шва очень незначителен, тогда как для A-TIG он значительно больше.

Увеличение скорости сварки приводит к снижению тепловложения на сварной шов и получению неглубокого шва. Глубина проплавления обратно пропорциональна скорости сварки при заданном сварочном токе.

Плотность энергии дуги напрямую зависит от длины дуги, что является критическим фактором при сварке A-TIG [3–9]. Как правило, для предотвращения рассеивания тепла дуги в окружающую среду предпочтительны более короткие дуги [1], чтобы максимальное тепло дуги равномерно передавалось на заготовку. Однако

для обеспечения стабильности дуги и минимизации повреждения электрода необходимо соблюдать значительное расстояние [5–12]. Для сварки нержавеющей стали методом A-TIG обычно используется длина дуги 2...4 мм [4–6].

При поддержании постоянными скорости подачи и сварочного тока и применении активирующего флюса наблюдается небольшое увеличение напряжения дуги. Известно, что флюс при разложении притягивает электроны, это приводит к сужению дуги и повышению напряжения. Слабое или сильное увеличение зависит главным образом от состава оксидного флюса. Эксперименты ясно показывают, что существует очевидная корреляция между измеренным напряжением дуги и результирующим сужением дуги, поэтому более высокие значения напряжения обеспечивают концентрированное сужение дуги. Это зафиксировано и в работах других авторов [16–29].

Эксперименты различных авторов [1–8] показывают, что глубина проплавления зависит от содержания кислорода во время сварки, поскольку оно способствует развитию конвекции Марангони. Содержание кислорода можно точно контролировать, используя подходящую конструкцию сопла и оптимизируя расход газа [1, 2].

Исследования различных авторов показывают [5–7], что добавление азота способствует увеличению тепловыделения, а также оказывает положительное влияние на геометрию и свойства сварного шва [22–29]. Так, например, глубина проплавления и площадь поперечного сечения сварного шва увеличиваются при добавлении азота в аргоновой среде [26–31]. Угловая деформация также минимизируется при добавлении азота, поскольку она напрямую связана с шириной сварного шва, а азот обеспечивает полное проплавление, что приводит к снижению угловой деформации [24–28]. Обнаружено, что твердость, прочность на разрыв и склонность к образованию горячих трещин резко возрастают при добавлении азота [27–29].

Известно [1–6], что защитный газ на основе водорода обладает высокой теплопроводностью при температурах, близких к диссоциации молекул водорода. Поэтому при добавлении водорода происходит существенное влияние на объем расплавленного материала в сварочной ванне

[26–29]. Было отмечено увеличение напряжения дуги, глубины проплавления, эффективности плавления, подвода тепла и площади поперечного сечения, в то время как оксиды, как правило, восстанавливаются при добавлении водорода [5–7, 10–16].

Выводы

Основные результаты можно резюмировать следующим образом.

1. Использование оксидов кремния и титана (TiO_2 и SiO_2) приводило к увеличению глубины проплавления при сварке A-TIG, независимо от типа и марки стали. Степень увеличения глубины проплавления ограничивалась диапазоном от 30 % до более 200 %.

2. Толщина покрытия является важным параметром при сварке A-TIG. Обычно рекомендуется не превышать 200 мкм без комментариев о том, как энергия сварки может повлиять на результаты проплавления по толщине. Это исследование показывает значительные колебания проплавления шва в диапазоне 0...200 мкм. Установлено, что оптимизированная толщина в процессе A-TIG варьируется от 40 до 70 мкм в зависимости от сварочного тока и дает повышение проплавления шва в два раза при заданном уровне тока.

3. Сварочный ток при использовании флюсов TiO_2 и SiO_2 напрямую влияет на геометрические характеристики сварного шва, такие как площадь поперечного сечения, ширина и глубина шва. При сравнении сварки TIG и A-TIG наблюдается почти двукратная разница в глубине проплавления при увеличении тока.

4. Влияние типа и марки стали на проплавляющую способность при использовании активирующих флюсов явно не выявлено. Затвердевшие небольшие изменения в глубине проплавления в сравнении с низколегированными и нержавеющими сталью.

Список литературы

1. 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.

2. Савицкий М.М., Кушниренко Б.Н., Олейник О.Н. Особенности сварки сталей вольфрамовым

электродом с активирующими флюсами // Автоматическая сварка. – 1999. – № 12. – С. 18–22.

3. Acharya S., Patra S., Das S. Predicting A-TIG weld bead geometry of 304 stainless steel using artificial neural networks // Discover Mechanical Engineering. – 2025. – Vol. 4 (1). – P. 12. – DOI: 10.1007/s44245-025-00096-5.

4. 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.

5. Mohsein Z.H., Abdulwahhab A.B., Abbas A.M. Study effect of active flux on mechanical properties of TIG welding process // Results in Engineering. – 2025. – Vol. 26. – P. 104681. – DOI: 10.1016/j.rineng.2025.104681.

6. Görgün E. Advancing welding quality through intelligent TIG welding: A hybrid deep learning approach for defect detection and quality monitoring // Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi. – 2025. – Vol. 16 (3). – P. 677–685. – DOI: 10.24012/dumf.1642978.

7. Morisada Y., Fujii H., Xukun N. Development of simplified active flux tungsten inert gas welding for deep penetration // Materials & Design. – 2014. – Vol. 54. – P. 526–530. – DOI: 10.1016/j.matdes.2013.08.081.

8. Dhandha K.H., Badheka V.J. Effect of activating fluxes on weld bead morphology of P91 steel bead-on-plate welds by flux assisted tungsten inert gas welding process // Journal of Manufacturing Processes. – 2015. – Vol. 17. – P. 48–57. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2014.10.004.

9. Nayee S.G., Badheka V.J. Effect of oxide-based fluxes on mechanical and metallurgical properties of dissimilar activating flux assisted-tungsten inert gas welds // Journal of Manufacturing Processes. – 2014. – Vol. 16 (1). – P. 137–143. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2013.11.001.

10. A review on welding techniques: properties, characterisations and engineering applications / C. Shravan, N. Radhika, N.H. Deepak Kumar, B. Sivasailam // Advances in Materials and Processing Technologies. – 2023. – Vol. 10. – P. 1126–1181. – DOI: 10.1080/2374068X.2023.2186638.

11. A critical review on advanced welding technologies to fabricate test blanket modules and irradiation damage behaviour of the welded joints in nuclear fusion applications / H. Mi, J. Ma, L. Feng, W. Guo, B. He // Journal of Manufacturing Processes. – 2025. – Vol. 141. – P. 829–864. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2025.03.025.

12. 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.

13. 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.
14. Бабкин А.С., Комов Н.С., Терехов В.В. Влияние активирующих флюсов на характеристики электрической дуги и качество швов при сварке austenитных сталей // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2022. – № 10. – С. 507–514. – DOI: 10.24412/2071-6168-2022-10-507-514.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. Kumar N., Pandey C., Kumar P. Dissimilar welding of Inconel alloys with austenitic stainless-steel: a review // *Journal of Pressure Vessel Technology*. – 2023. – Vol. 145 (1). – P. 011506. – DOI: 10.1115/1.4055329.
21. Martyushev N.V., Skeeba 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.
22. Comprehensive studies on conventional and novel weld cladding techniques and their variants for enhanced structural integrity: an overview / S. Kavishwar, V. Bhaiswar, S. Kochhar, A. Fande // *Welding International*. – 2024. – Vol. 38 (9). – P. 618–638. – DOI: 10.1080/09507116.2024.2402285.
23. Sharma P., Dwivedi D.K. A-TIG welding of dissimilar P92 steel and 304H austenitic stainless steel: Mechanisms, microstructure and mechanical properties // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2019. – Vol. 44. – P. 166–178. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.06.003.
24. Research on the possibility of lowering the manufacturing accuracy of cycloid transmission wheels with intermediate rolling elements and a free cage / E.A. Efremkov, N.V. Martyushev, V.Yu. Skeeba, M.V. Grechneva, A.V. Olisov, A.D. Ens // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12 (1). – P. 5. – DOI: 10.3390/app12010005.
25. Vidyarthi R.S., Dwivedi D.K., Vasudevan M. Influence of M-TIG and A-TIG welding process on microstructure and mechanical behavior of 409 ferritic stainless steel // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2017. – Vol. 26 (3). – P. 1391–1403. – DOI: 10.1007/s11665-017-2538-5.
26. 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.
27. 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.
28. 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 (1). – P. 391–410. – DOI: 10.1007/s00170-019-03918-5.
29. 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.
30. 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.Yu. Skeeba, A.I. Karlina // *Metallurgist*. – 2022. – Vol. 65 (11–12). – P. 1255–1264. – DOI: 10.1007/s11015-022-01271-9.
31. 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/cisir.2021.02.12.
32. Study of wear of an alloyed layer with chromium carbide particles after plasma melting / A.I. Karlina, Y.I. Karlina, V.V. Kondratyev, R.V. Kononenko, A.D. Breki // *Crystals*. – 2023. – Vol. 13 (12). – P. 1696. – DOI: 10.3390/crust13121696.
33. 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. Kargapolsev, 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.

34. 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.

35. 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.

36. Change in the properties of rail steels during operation and reutilization of rails / K. Yelemessov, D. Baskanbayeva, N.V. Martyushev, V.Y. Skeeba, V.E. Gozbenko, A.I. Karlina // Metals. – 2023. – Vol. 13. – P. 1043. – DOI: 10.3390/met13061043.

37. Hybrid processing: the impact of mechanical and surface thermal treatment integration onto the machine parts quality / V.Yu. Skeeba, V.V. Ivancivsky, A.V. Kutyshkin, K.A. Parts // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 126 (1). – P. 012016. – DOI: 10.1088/1757-899x/126/1/012016.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 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 melting ability of oxide fluxes in A-TIG welding of carbon and low-alloy steels

Antonina Karlina^{1, a*}, **Viktor Kondratiev**^{2, 3, b}, **Vitaly Gladkikh**^{1, c}, **Galina Vitkina**^{3, d}, **Roman Kononenko**^{4, e}

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

² A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1A Favorsky str., Irkutsk, 664033, Russian Federation

³ Cherepovets State University, 5 Lunacharsky pr., Cherepovets, 162600, Russian Federation

⁴ Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontova str., Irkutsk, 664074, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0003-3287-3298>,  karlinat@mail.com; ^b  <https://orcid.org/0000-0002-7437-2291>,  imz@mail.ru;

^c  <https://orcid.org/0000-0003-1953-1584>,  gladkikh_87@mail.ru; ^d  <https://orcid.org/0000-0002-1076-2709>,  20procents@mail.ru;

^e  <https://orcid.org/0009-0001-5900-065X>,  istu_politeh@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 14 September 2025

Revised: 07 October 2025

Accepted: 23 October 2025

Available online: 15 December 2025

Keywords:

Welding
Activating fluxes
Penetration depth
Coating thickness

ABSTRACT

Introduction. Tungsten inert gas (*TIG*) welding has gained widespread popularity due to its advantages, including effective shielding, a stable arc, easy heat input adjustment, reduced metal spatter, and an attractive weld appearance. However, relatively shallow penetration and low efficiency limit its application. To improve welding efficiency and expand its scope of application, researchers both domestically and internationally have conducted significant studies aimed at increasing the energy density of the traditional *TIG* arc. This includes activating *TIG* (*A-TIG*) arc welding, which utilizes a flux applied to the weld surface. Further investigation of the mechanism for increasing arc energy density in *A-TIG* welding will allow us to propose new ideas and methods for highly efficient *TIG* welding technology. **The purpose** of this study is to evaluate the technological potential of using oxide activators TiO_2 and SiO_2 to improve penetration efficiency and weld quality of carbon and low-alloy steels. **Methods.** This work involved comparative *A-TIG* welding tests. The tests included the use of 3.5 mm and 8 mm thick plates (300 mm × 300 mm) made of unalloyed (carbon) steel *Si3* and low-alloy steel 0.09 *C-2Mn-Si*. Welding tests included the use of single-component fluxes in the form of oxides (TiO_2 , SiO_2). All experimental welds were performed under the same conditions, without the use of filler metal (*TIG* welding), with a current in the range of 10–200 A and a welding speed of 150 mm/min. Arc voltage was maintained in the range of 10.4 V to 12.8 V; heat input was in the range of 0.499 kJ/mm to 0.614 kJ/mm. All welds were subjected to visual inspection of the surface condition and macrostructural studies to determine their dimensions. **Results and discussion.** Most tests observed significant differences in arc shape compared to traditional *TIG* and *A-TIG* processes. Results of *A-TIG* welding tests on unalloyed and low-alloy steels showed that penetration depth increased slightly in steels characterized by a higher degree of deoxidation and metallurgical purity. Evidently, not every activator was responsible for the increased penetration depth, but the use of TiO_2 and SiO_2 oxides was undoubtedly beneficial. An arc constriction mechanism is proposed, which is widely applicable to *A-TIG* welding of steel with various types of fluxes studied. Arc constriction occurs due to the formation of negative ions in the outer region of the arc or due to the flux coating on the surface. Thus, arc constriction increases the current density and heat intensity at the root of the anode. This increases the force and pressure of magnetic constriction, resulting in a strong downward convection flow. The use of silicon and titanium oxides (TiO_2 and SiO_2) increases penetration depth during *A-TIG* welding, regardless of steel type and grade. The degree of penetration increase was limited to a range of 40% to 200%.

For citation: Karlina A.I., Kondratiev V.V., Gladkikh V., Vitkina G., Kononenko R.V. 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. (In Russian).

References

1. 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]. *Avtomatischekaya svarka* = Automatic Welding, 2000, no. 1, pp. 3–9.

* Corresponding author

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

2. Savitsky M.M., Kushnirenko 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]. *Avtomatuskaya svarka = Automatic Welding*, 1999, no. 12, pp. 18–22.
3. Acharya S., Patra S., Das S. Predicting A-TIG weld bead geometry of 304 stainless steel using artificial neural networks. *Discover Mechanical Engineering*, 2025, vol. 4 (1), p. 12. DOI: 10.1007/s44245-025-00096-5.
4. 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.
5. Mohsein Z.H., Abdulwahhab A.B., Abbas A.M. Study effect of active flux on mechanical properties of TIG welding process. *Results in Engineering*, 2025, vol. 26, p. 104681. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.104681.
6. Görgün E. Advancing welding quality through intelligent TIG welding: A hybrid deep learning approach for defect detection and quality monitoring. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 2025, vol. 16 (3), pp. 677–685. DOI: 10.24012/dumf.1642978.
7. Morisada Y., Fujii H., Xukun N. Development of simplified active flux tungsten inert gas welding for deep penetration. *Materials & Design*, 2014, vol. 54, pp. 526–530. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.08.081.
8. Dhandha K.H., Badheka V.J. Effect of activating fluxes on weld bead morphology of P91 steel bead-on-plate welds by flux assisted tungsten inert gas welding process. *Journal of Manufacturing Processes*, 2015, vol. 17, pp. 48–57. DOI: 10.1016/j.jmapro.2014.10.004.
9. Nayee S.G., Badheka V.J. Effect of oxide-based fluxes on mechanical and metallurgical properties of dissimilar activating flux assisted-tungsten inert gas welds. *Journal of Manufacturing Processes*, 2014, vol. 16 (1), pp. 137–143. DOI: 10.1016/j.jmapro.2013.11.001.
10. Shravan C., Radhika N., Deepak Kumar N.H., Sivasailam B. A review on welding techniques: properties, characterisations and engineering applications. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2023, vol. 10, pp. 1126–1181. DOI: 10.1080/2374068X.2023.2186638.
11. Mi H., Ma J., Feng L., Guo W., He B. A critical review on advanced welding technologies to fabricate test blanket modules and irradiation damage behaviour of the welded joints in nuclear fusion applications. *Journal of Manufacturing Processes*, 2025, vol. 141, pp. 829–864. DOI: 10.1016/j.jmapro.2025.03.025.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. Kumar N., Pandey C., Kumar P. Dissimilar welding of Inconel alloys with austenitic stainless-steel: a review. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2023, vol. 145 (1), p. 011506. DOI: 10.1115/1.4055329.

21. Martyushev N.V., Skeeba 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.
22. Kavishwar S., Bhaiswar V., Kochhar S., Fande A. Comprehensive studies on conventional and novel weld cladding techniques and their variants for enhanced structural integrity: an overview. *Welding International*, 2024, vol. 38 (9), pp. 618–638. DOI: 10.1080/09507116.2024.2402285.
23. Sharma P., Dwivedi D.K. A-TIG welding of dissimilar P92 steel and 304H austenitic stainless steel: Mechanisms, microstructure and mechanical properties. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, vol. 44, pp. 166–178. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.06.003.
24. Efremenkov E.A., Martyushev N.V., Skeeba V.Yu., Grechneva M.V., Olisov A.V., Ens A.D. Research on the possibility of lowering the manufacturing accuracy of cycloid transmission wheels with intermediate rolling elements and a free cage. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12 (1), p. 5. DOI: 10.3390/app12010005.
25. Vidyarthi R.S., Dwivedi D.K., Vasudevan M. Influence of M-TIG and A-TIG welding process on microstructure and mechanical behavior of 409 ferritic stainless steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2017, vol. 26 (3), pp. 1391–1403. DOI: 10.1007/s11665-017-2538-5.
26. 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.
27. 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.
28. 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 (1), pp. 391–410. DOI: 10.1007/s00170-019-03918-5.
29. 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.
30. Mamadaliev R.A., Bakhmatov P.V., Martyushev N.V., Skeeba V.Yu., 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.
31. 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/cisir.2021.02.12.
32. 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.
33. Kolosov A.D., Gozbenko V.E., Shtayger M.G., Kargapoltev 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.
34. 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.
35. 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.
36. Yelemessov K., Baskanbayeva D., Martyushev N.V., Skeeba 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.
37. Skeeba V.Yu., Ivancivsky V.V., Kutyshkin A.V., Parts K.A. Hybrid processing: the impact of mechanical and surface thermal treatment integration onto the machine parts quality. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 126 (1), p. 012016. DOI: 10.1088/1757-899x/126/1/012016.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.