

DOI: 10.24412/2077-8481-2026-3-63-73

УДК 621.791.754

Е. А. ФЕТИСОВА, канд. техн. наук

А. О. КОРОТЕЕВ, канд. техн. наук, доц.

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ ДУГОВОЙ СВАРКОЙ В ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ ЗАЩИТНОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЕ $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{SF}_6$

Аннотация

На основании металлографических исследований сварных соединений из высокопрочной износостойкой стали, выполненных дуговой сваркой в среде $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{SF}_6$, установлены зависимости характера формирования микроструктуры от количества вводимого в состав защитной газовой смеси галогенида SF_6 .

Ключевые слова:

металлографические исследования, дуговая сварка в среде защитных газов, модификация защитной газовой среды, гексафторид серы, микроструктура сварных соединений.

Для цитирования:

Фетисова, Е. А. Особенности формирования микроструктуры сварных соединений, выполненных дуговой сваркой в трехкомпонентной защитной газовой среде $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{SF}_6$ / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2026. – № 3 (92). – С. 63–73.

Введение

На сегодняшний день в Республике Беларусь динамично развивается промышленность, идет постоянная модернизация машиностроительных производств. Активно развивается тяжелое машиностроение. Совершенствование этих процессов напрямую связано с разработкой и внедрением в производство новых высокопрочных материалов. Это неизбежно требует пересмотра существующих технологий сварки, т. к. используемые материалы чрезвычайно чувствительны к термическому циклу сварки и составу защитной газовой среды.

Для создания инновационных сварных металлоконструкций все чаще применяют стали с комплексными системами легирования, обладающие высокими показателями прочности при сохранении значений пластичности и относительного удлинения на высоком уровне. При сварке это позволяет снизить уровень

внутренних напряжений в околошовной зоне, что является немаловажным при выполнении сварочных работ с материалами, склонными к образованию холодных трещин.

На сегодняшний день для производства широкое применение среди таких сталей находят низкоуглеродистые низколегированные высокопрочные стали, обладающие высоким уровнем механической прочности при достаточной пластичности и вязкости. Такие свойства обеспечиваются за счет комплексного легирования (микролегирования) в небольших количествах хромом, никелем, марганцем и кремнием с контролируемой температурой прокатки. В совокупности это позволяет сформировать требуемую микроструктуру и комплекс механических характеристик.

Вместе с тем высокая чувствительность таких сталей к термическому циклу сварки, способствующему изменению структурно-фазового состава, а следовательно, и изменению свойств

различных зон сварного соединения, требует детального подхода к выбору технологии их сварки, особенно в части подбора сварочных материалов и параметров режима.

Одним из наиболее информативных методов определения зависимостей свойств различных участков сварного соединения от характера структурно-фазовых превращений, вызванных термическим циклом сварки, являются металлографические исследования, позволяющие изучить макро- и микроструктуру соединений. Этот комплексный метод разрушающего контроля позволяет оценить качество сварного соединения, а также выявить внутренние дефекты, которые невозможно обнаружить другими способами. Кроме того, металлографические исследования играют важную роль при аттестации технологических процессов сварки, при входном контроле материалов и расследовании причин разрушения конструкций.

Ранее нами была разработана перспективная технология дуговой сварки высокопрочных сталей, заключающаяся в модификации традиционной защитной атмосферы Ar (82 %) + CO_2 (18 %) газобразным галогенидным соединением SF_6 , которая позволяет снижать чувствительность наплавленного металла к водородной хрупкости посредством связывания водорода в атмосфере дуги в нерастворимые и ограниченно растворимые в жидком металле химические соединения HF , повышая тем самым эксплуатационный срок службы сварных металлоконструкций [1–3].

Известно, что газовая среда при дуговой сварке выполняет несколько функций, основными из которых являются:

- вытеснение воздуха из зоны сварки;
- воздействие на протекание химических и физико-металлургических процессов, способствующих изменению ха-

рактера плавления присадочной сварочной проволоки, переноса электродного металла и формированию комплекса требуемых эксплуатационных характеристик наплавленного металла.

Изменение состава защитной газовой среды путем введения в нее активных компонентов позволяет изменить условия протекания сварочных процессов в высокотемпературной дуговой области.

После проведения ряда теоретических и экспериментальных исследований [4–6] было установлено, что присутствие гексафторида серы SF_6 в составе защитной среды $Ar + CO_2$ способствует интенсификации металлургических процессов при дуговой сварке, а также существенно влияет на структурно-фазовое состояние сварного соединения. Целью работы было установление закономерностей формирования микроструктуры сварных соединений, полученных дуговой сваркой в трехкомпонентной защитной газовой среде $Ar + CO_2 + SF_6$ от количества вводимого галогенидного модификатора.

Основная часть

Для проведения металлографических исследований были получены контрольные сварные соединения из стали Magstrong H500 с применением высокопрочной сварочной проволоки ESAB OK Aristorod 69. Химический состав и механические свойства используемых в работе сварочных материалов представлены в табл. 1–4. Вырезка образцов осуществлялась гидроабразивным методом на установке HEAD2015BA HD5X-AC 38030Z с целью исключения влияния температурного фактора на структурное состояние исследуемой части сварного соединения. Затем образцы подвергались шлифовке и последующей их полировке. Полный цикл получения исследуемого образца проводился на специализированном оборудовании.

Табл. 1. Химический состав стали Magstrong H500

Массовая доля содержания химического элемента, %														
C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Al	Ti	Nb	N	B
0,30	0,20	0,85	0,005	0,012	0,50	3,20	0,35	0,40	0,035	0,05	0,01	0,01	0,008	0,005

Табл. 2. Механические свойства стали Magstrong H500

Предел текучести, МПа	Временное сопротивление разрыву, МПа	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость, Дж/см ²	Твердость HV
			KCV ⁻⁴⁰	
1200	1500	≥ 10	30	475...505

Табл. 3. Химический состав сварочной проволоки ESAB OK Aristorod 69 (СТБ ISO 16834–2010: G 69 4 M21 Mn3Ni1CrMo)

Содержание элемента, %							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0,089	0,53	1,54	0,01	0,01	0,26	1,23	0,24

Табл. 4. Механические характеристики наплавленного металла проволокой ESAB OK Aristorod 69 (СТБ ISO 16834–2010: G 69 4 M21 Mn3Ni1CrMo)

Предел текучести, МПа	Временное сопротивление разрыву, МПа	Относительное удлинение, %	Энергия удара, Дж	
			20 °C	–40 °C
730	800	19	100	73

Для запрессовки подготовленных образцов в полимерные формы использовался программируемый автоматический пресс Metkon ECOPRESS 100. Для получения качественной запрессовки образцов им придавали форму требуемых размеров. Для этого выполняли резку образцов на специализированном отрезном станке Metkon METACUT 302, который оборудован системой подачи смазочно-охлаждаемой жидкости для предотвращения нагрева поверхности подготавливаемого образца в процессе резки. Применение автоматического

шлифовально-полировального станка Metkon FORCIPOL 102 позволило завершить этап подготовки образцов для исследований, который заключался в шлифовании и полировании их поверхностей. Для получения требуемого качества поверхностей использовали абразивные диски, полировальное сукно и алмазную суспензию DIAPAT-M на водной основе с монокристаллическими алмазами.

Для качественного структурного анализа при проведении металлографических исследований в работе произво-

дили травление полученных шлифов согласно СТБ ЕН 1321–2004.

Существует несколько способов травления:

- травление погружением в реактив;
- травление протиркой контролируемого сечения реактивом;
- электролитическое травление.

При проведении металлографических испытаний в данной работе применяли способ травления шлифов погружением в реактив с контролем выдержки в контакте с ним.

При выборе реактива для травления необходимо знать материал, который будет подвергаться исследованию. Наибольшее распространение для выявления структуры сталей, в том числе после термической обработки, находит 5-процентный спиртовой раствор азотной кислоты HNO_3 (реактив Ржешотарского).

Микрометаллографические исследования сварных соединений производились на микроскопе МИ-1, входящем в состав поста микроконтроля МК-1.

Зона термического влияния и

линия сплавления в сварных соединениях являются самыми уязвимыми местами, которые подвержены образованию различного рода дефектов: трещин, несплавлений, разупрочнению и др. Кроме того, основной металл в этих местах в процессе сварки подвергается не полному расплавлению, но из-за высокотемпературного нагрева изменяет свою структуру и механические свойства.

Исследуемые в данной работе сварные соединения выполнены из высокопрочной термомеханически упрочненной стали, обладающей повышенной чувствительностью к термическому циклу. Свариваемость такой стали характеризуется склонностью к образованию области с повышенными значениями твердости вблизи линии сплавления и зоны разупрочнения материала.

Поэтому основа проведения металлографических исследований заключалась в оценке микроструктуры сварного соединения именно зоны его термического влияния и вблизи линии сплавления (рис. 1).



Рис. 1. Области исследования микроструктуры сварного соединения: 1 – зона термического влияния и линия сплавления; 2 – зона основного металла

Ранее нами установлено, что введение гексафторида серы SF_6 в традиционную защитную газовую атмосферу

Ar (82 %) + CO_2 (18 %) влияет на характер ввода тепла в основной металл, что подтверждается результатами исследо-

вания глубины его проплавления, а также способствует изменению химического состава наплавленного металла [7, 8]. Эти факторы могут вызывать изменения характера протекания структурных превращений в высокотемпературных областях сварного соединения. Поэтому исследования влияния гексафторида серы на формирование микроструктуры сварных соединений при дуговой сварке представляют большой интерес.

Исследования проводились на образцах сварных соединений, которые были получены дуговой сваркой в следующих защитных газовых средах:

- традиционная защитная газовая среда $\text{Ar} (82 \%) + \text{CO}_2 (18 \%)$;
- защитная газовая среда $\text{Ar} (82 \%) + \text{CO}_2 (18 \%) + \text{SF}_6 (0,25 \%)$;
- защитная газовая среда $\text{Ar} (82 \%) + \text{CO}_2 (18 \%) + \text{SF}_6 (0,5 \%)$;
- защитная газовая среда $\text{Ar} (82 \%) + \text{CO}_2 (18 \%) + \text{SF}_6 (1,0 \%)$.

Введение компонентов в состав защитной газовой среды осуществлялось по объемной доле.

По полученным результатам исследования микроструктуры сварного соединения установлено, что использование технологии дуговой сварки с традиционной защитной газовой средой $\text{Ar} (82 \%) + \text{CO}_2 (18 \%)$ характеризуется формированием в основном металле вблизи линии сплавления крупной закалочной структуры (рис. 2, d1,4; e1). Такая структура, как правило, имеет высокую твердость и пластинчатую форму, что связано с характером ее образования, которая обусловлена термическим циклом сварки. При анализе микроструктуры отмечено, что длина таких пластинчатых участков может составлять 100 мкм и более. На рис. 2, a2; b3 отчетливо наблюдается формирование участков, имеющих бейнитную структуру.

При анализе микроструктуры образца сварного соединения, полученного в защитной газовой среде

$\text{Ar} (82 \%) + \text{CO}_2 (18 \%) + \text{SF}_6 (0,25 \%)$ выявлено измельчение крупной игольчатой структуры вблизи линии сплавления основного и наплавленного металла. Также в этой зоне наблюдается преобладание бейнита (рис. 3, c; d1; e1). Структура зоны термического влияния также характеризуется наличием бейнитных участков (см. рис. 3, a; b2).

На рис. 4 представлен образец сварного соединения, выполненного с введением 0,5 % SF_6 в защитную смесь $\text{Ar} (82 \%) + \text{CO}_2 (18 \%)$. Вблизи линии сплавления выявлено еще большее измельчение микроструктуры с явным, исключительно бейнитным формированием (см. рис. 4, c; d1; e1). Анализируя в данном случае структуру зоны термического влияния, можно говорить о схожей картине, которая характеризуется измельчением структуры и присутствием крупных участков бейнита, что четко прослеживается на рис. 4, a; b2.

Дальнейшее увеличение объемной доли гексафторида серы в составе защитной газовой среды $\text{Ar} (82 \%) + \text{CO}_2 (18 \%)$ до 1,0 % способствует появлению укрупненных бейнитных участков в микроструктуре сварного соединения вблизи линии сплавления основного и наплавленного металла (рис. 5, c1; d; e). На рис. 5, a2, b представлена микроструктура зоны термического влияния.

Из полученных результатов следует, что количество гексафторида серы, присутствующего в традиционной защитной газовой смеси $\text{Ar} (82 \%) + \text{CO}_2 (18 \%)$, определяет особенности формирования микроструктуры сварного соединения.

Кроме того, из проведенных ранее нами работ [8, 9] следует, что модифицирование защитной атмосферы газом SF_6 приводит к тому, что в процессе высокотемпературной диссоциации гексафторид серы образует продукты реакции, в состав которых входят активные компоненты, способные изменять химический состав наплавленного

металла и воздействовать на характер протекания диффузионных процессов при кристаллизации сварочной ванны,

а также на формирование конечной структуры металла.

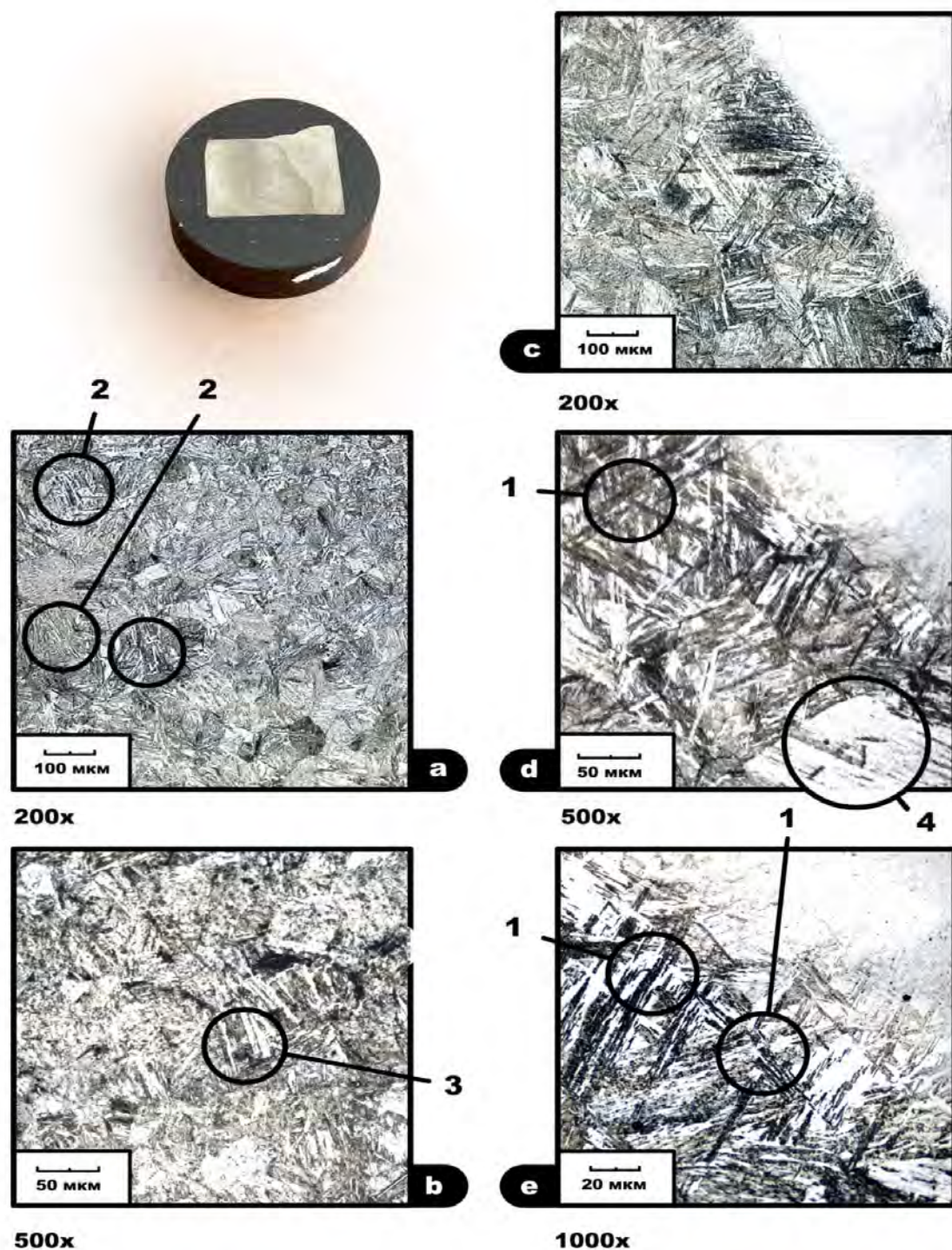


Рис. 2. Результаты микрометаллографического анализа сварного соединения: защитная газовая среда Ar (82 %) + CO_2 (18 %); а, б – зона термического влияния; с, д, е – линия сплавления

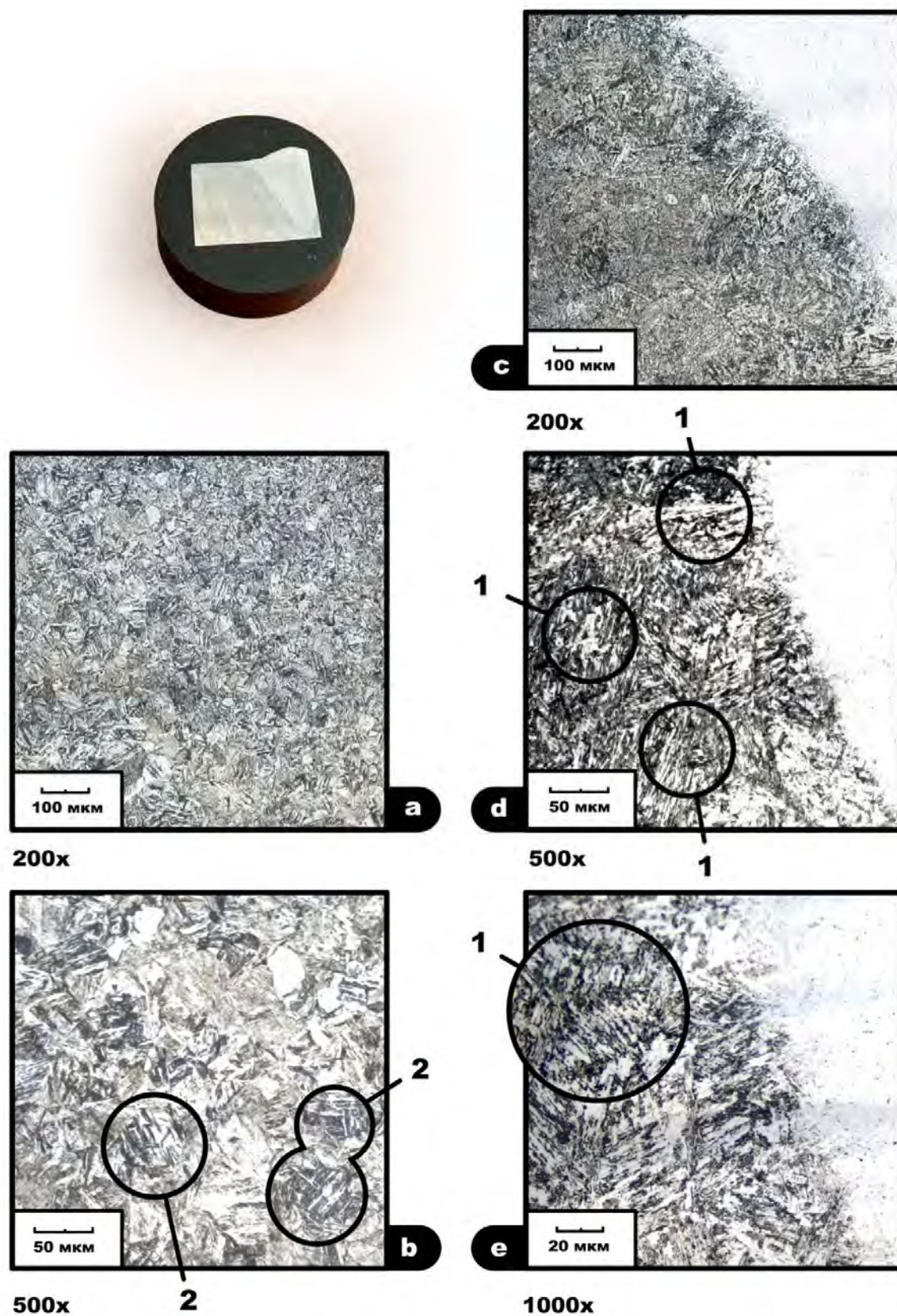


Рис. 3. Результаты микрометаллографического анализа сварного соединения: защитная газовая среда Ar (82 %) + CO₂ (18 %) + SF₆ (0,25 %); a, b – зона термического влияния; c, d, e – линия сплавления

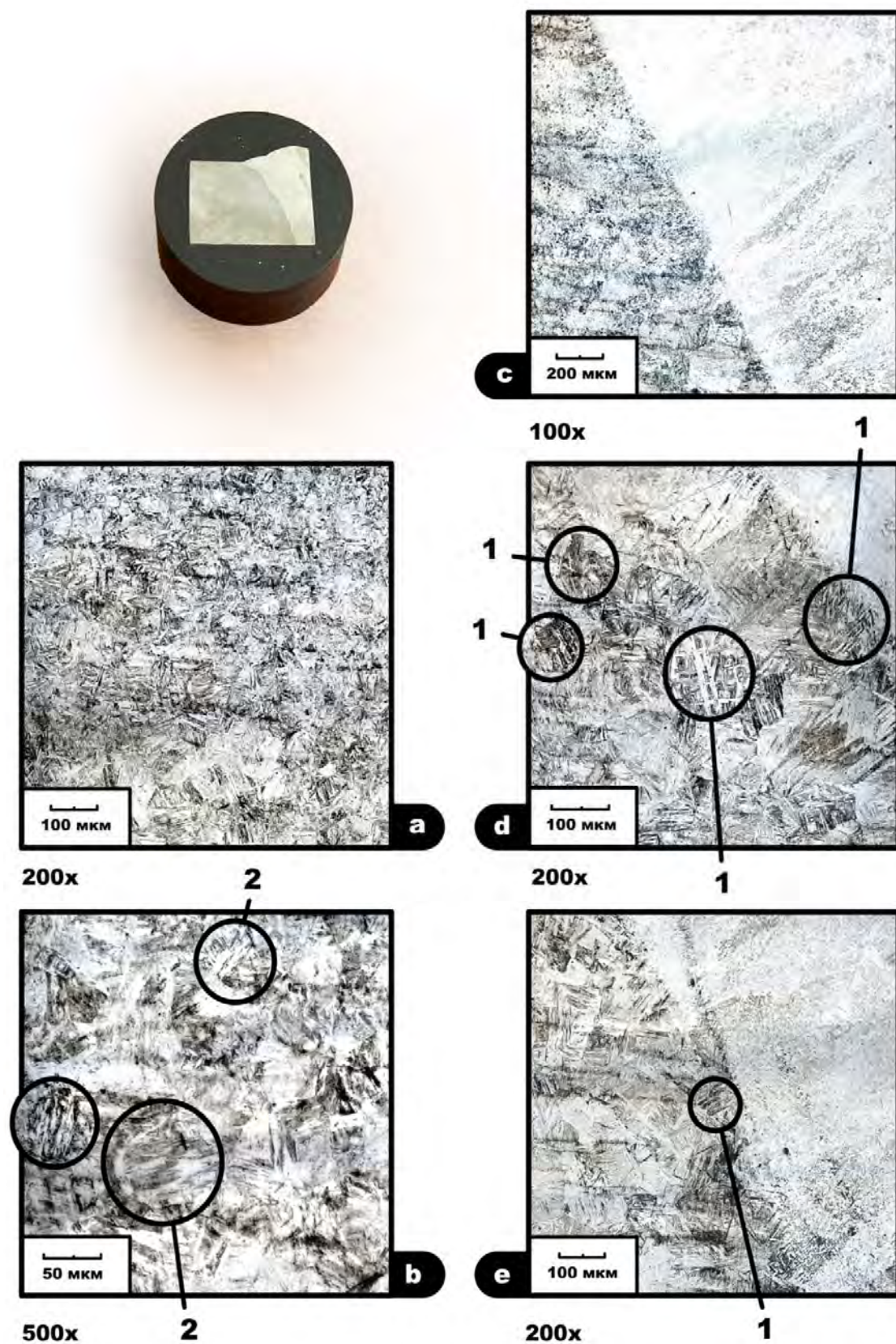


Рис. 4. Результаты микрометаллографического анализа сварного соединения: газовая защитная среда Ar (82 %) + CO₂ (18 %) + SF₆ (0,5 %); a, b – зона термического влияния; c, d, e – линия сплавления

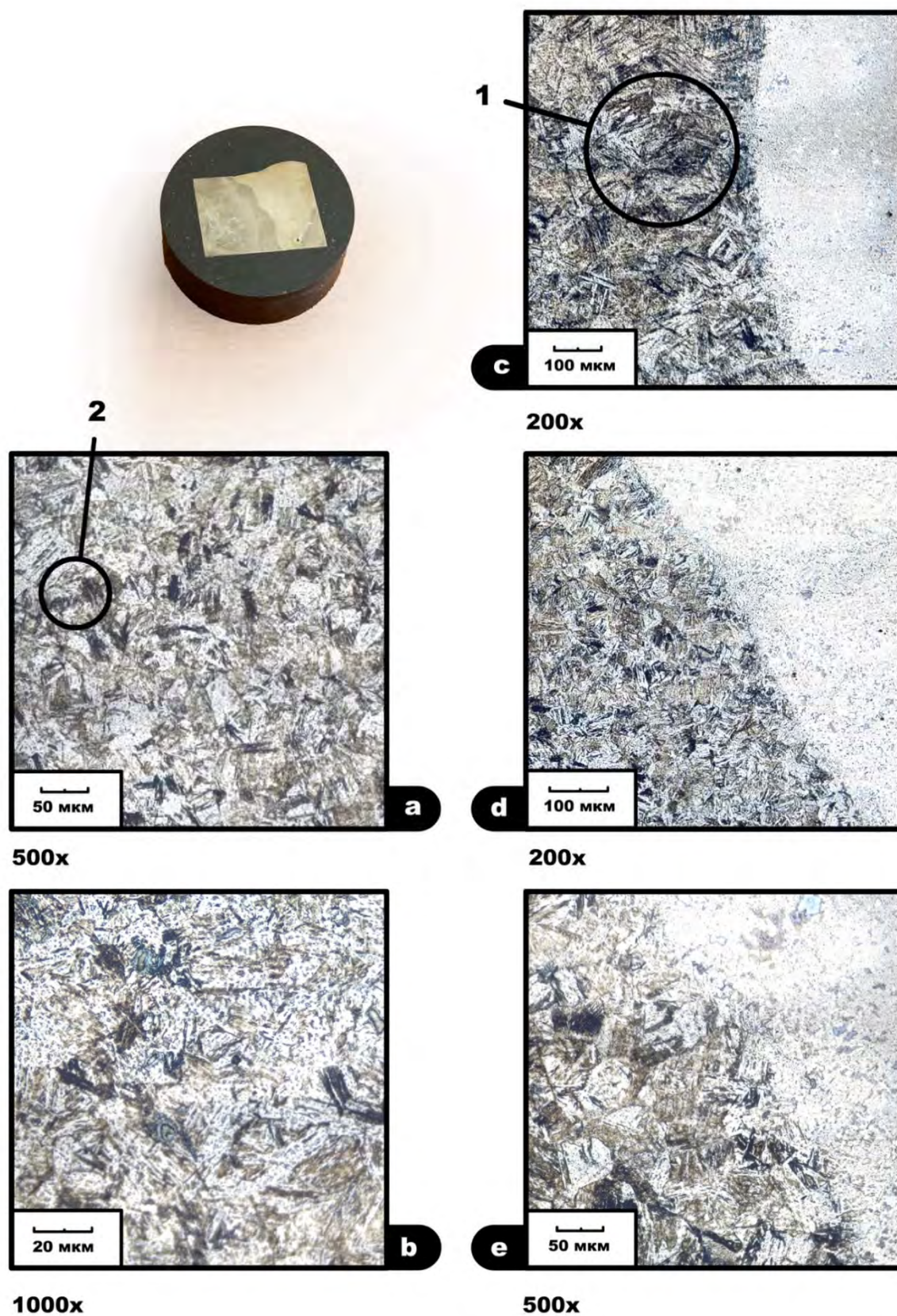


Рис. 5. Результаты микрометаллографического анализа сварного соединения: газовая защитная среда Ar (82 %) + CO₂ (18 %) + SF₆ (1,0 %); а, б – зона термического влияния; с, д, е – линия сплавления

Эти факты представляют собой отдельный вопрос, требующий дальнейших исследований, не входящих в рамки данной работы.

Выводы

Преобразование состава защитной газовой среды Ar (82 %) + CO_2 (18 %) путем модифицирования ее галогенидным соединением SF_6 приводит к изменению характера ввода тепловой мощности дугового разряда в основной металл. Этому способствует действие продуктов высокотемпературной диссоциации гексафторида серы, которое приводит к сжатию столба дуги. Введение SF_6 в газовую защитную атмосферу благодаря своим свойствам изменяет специфику горения дуги, а также ее

теплофизические характеристики. Все это напрямую влияет на кинетику охлаждения металла сварного соединения, а также на продолжительность пребывания его отдельных зон в температурных интервалах, превышающих критические точки структурно-фазовых превращений.

Наблюдаемая тенденция к формированию мелкозернистой структуры и отсутствию крупных блоков закалочных структур вблизи линии сплавления и зоны термического влияния в сварных соединениях, полученных дуговой сваркой в защитной газовой среде с введением SF_6 , является благоприятной. Это способствует достижению близких показателей твердости в зоне термического влияния и снижению неоднородности свойств сварного соединения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фетисова, Е. А.** Применение газообразных галогенидных соединений в составе защитной газовой атмосферы при дуговой сварке / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, В. П. Куликов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев : Бел.-Рос. ун-т, 2019. – С. 165.
2. **Фетисова, Е. А.** Технология дуговой сварки с введением модифицирующих газовых компонентов в защитную атмосферу / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, А. А. Коротеева // Новые технологии и материалы, автоматизация производства: сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. – Брест : Брест. гос. техн. ун-т, 2022. – С. 175–178.
3. **Фетисова, Е. А.** Особенности дуговой сварки и наплавки с модификацией защитной газовой атмосферы галогенидными соединениями / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : материалы V Всерос. нац. науч. конф. молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 11–15 апр. 2022 г. : в 4 ч. – Комсомольск-на-Амуре : КнАГУ, 2022. – С. 89–90.
4. **Фетисова, Е. А.** Особенности металлургических процессов при дуговой сварке с модификацией защитной газовой атмосферы галогенидными соединениями / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, А. А. Коротеева // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 1 (74). – С. 87–96.
5. О потерях электродного металла при дуговой сварке с модификацией защитной газовой атмосферы газообразными галогенидными соединениями / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, А. А. Коротеева [и др.] // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 2 (79). – С. 97–106.
6. Особенности переноса электродного металла при дуговой сварке и наплавке с модификацией защитной газовой атмосферы галогенидным соединением SF_6 ($\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{SF}_6$) / А. О. Коротеев, Е. А. Фетисова, А. А. Коротеева [и др.] // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 1 (82). – С. 25–34.
7. Особенности проплавления основного металла при дуговой наплавке и сварке с модификацией защитной газовой среды галогенидом SF_6 ($\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{SF}_6$) / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, В. В. Пятакова [и др.] // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 2 (83). – С. 77–87.
8. **Фетисова, Е. А.** Влияние трехкомпонентной защитной газовой среды на форму и размеры шва при дуговой сварке / Е. А. Фетисова, А. А. Коротеева // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев : Бел.-Рос. ун-т, 2023. – С. 205.
9. **Коротеев, А. О.** Особенности перехода легирующих элементов через дуговой промежуток в условиях модификации защитной газовой среды $\text{Ar} + \text{CO}_2$ галогенидом SF_6 / А. О. Коротеев, Е. А. Фетисова // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 3 (84). – С. 14–25.

Статья сдана в редакцию 9 июня 2026 года

Контакты:

fetisova9891@gmail.com (Фетисова Екатерина Анатольевна);

karatseyeu.artur@gtmail.com (Коротеев Артур Олегович).

E. A. FIATSIKAVA, A. O. KARATSEYEU

FEATURES OF MICROSTRUCTURE FORMATION IN ARC WELDED JOINTS PERFORMED IN AN Ar + CO₂ + SF₆ THREE-COMPONENT SHIELDING GAS ATMOSPHERE

Abstract

Based on metallographic studies of arc-welded joints in high-strength, wear-resistant steel, the relationship between microstructure formation and the amount of SF₆ halide added to the Ar + CO₂ + SF₆ shielding gas mixture has been determined.

Keywords:

metallographic studies, gas-shielded arc welding, protective gas environment modification, sulfur hexafluoride, microstructure of welded joints.

For citation:

Fiatsikava, E. A. Features of microstructure formation in arc welded joints performed in an Ar + CO₂ + SF₆ three-component shielding gas atmosphere / E. A. Fiatsikava, A. O. Karatseyeu // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2026. – № 3 (92). – P. 63–73.