

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ СТАЛИ 09Г2С

Белов Д. С. ORCID ID 0009-0003-6250-540X,

Валгин М. Д. ORCID ID 0009-0004-5713-7312

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых», Владимир, Российская Федерация,
e-mail: d.belov@laser33.ru*

В статье представлены результаты сравнительного анализа механических свойств и структурных характеристик сварных соединений из низколегированной стали 09Г2С толщиной 10 мм, широко применяемой в различных отраслях промышленности. Исследованы образцы стыковых и тавровых соединений, выполненные двумя способами: лазерной сваркой волоконным лазером мощностью 5 кВт и роботизированной полуавтоматической дуговой сваркой в среде защитного газа (MAG) проволокой СВ-08Г2С. Научная новизна работы заключается в установлении прямой корреляции между технологией сварки, формируемой макро- и микроструктурой соединения, и его статической прочностью. Установлено, что лазерная сварка обеспечивает полное проплавление, узкую зону термического влияния (1–2 мм) и разрушение исключительно по основному металлу при среднем пределе прочности 531,5 МПа, что свидетельствует о превышении прочности сварного шва над основным металлом и позволяет классифицировать соединения по высшей категории качества «В» по ГОСТ Р ИСО 5817-2009. MAG-сварка характеризуется неполным проваром, широкой зоной термического влияния и значительным разбросом прочностных характеристик (от 334 до 556 МПа). Полученные результаты обосновывают технологическую целесообразность применения лазерной сварки вместо традиционных дуговых процессов при изготовлении ответственных конструкций, обеспечивая повышение их эксплуатационной надежности.

Ключевые слова: лазерная сварка, полуавтоматическая сварка, сталь 09Г2С, физико-механические испытания, предел прочности, зона термического влияния

COMPARATIVE ANALYSIS OF MECHANICAL PROPERTIES OF WELDED JOINTS IN 09G2S STEEL

Belov D. S. ORCID ID 0009-0003-6250-540X,

Valgin M. D. ORCID ID 0009-0004-5713-7312

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletovs”,
Vladimir, Russian Federation, e-mail: d.belov@laser33.ru*

This paper presents the results of a comparative analysis of the mechanical properties and structural characteristics of welded joints in 10 mm thick low-alloy 09G2S steel, which is widely used in various industrial applications. Butt and T-joint samples produced by two methods were investigated: laser welding using a 5 kW fiber laser and robotic semi-automatic gas metal arc welding (MAG) with SV-08G2S welding wire. The scientific novelty of this work lies in establishing a direct correlation between the welding technology, the resulting macro- and microstructure of the joint, and its static strength. It was found that laser welding ensures complete penetration, a narrow heat-affected zone (1–2 mm), and fracture exclusively through the base metal, with an average tensile strength of 531.5 MPa. This indicates that the strength of the weld metal exceeds that of the base metal, allowing the joints to be classified under the highest quality category “B” according to GOST R ISO 5817-2009. In contrast, MAG welding is characterized by incomplete penetration, a wide heat-affected zone, and a significant scatter in strength properties (ranging from 334 to 556 MPa). The obtained results substantiate the technological feasibility of using laser welding instead of traditional arc processes in the manufacture of critical structures, thereby enhancing their operational reliability.

Keywords: laser welding, semi-automatic welding, 09G2S steel, physical and mechanical tests, tensile strength, heat-affected zone (HAZ)

Введение

Сварные конструкции из низколегированных сталей, таких как 09Г2С, являются основой для машиностроения, где к соединениям предъявляются требования высокой статической и динамической прочности [1, 2]. Традиционной технологией для таких материалов остается дуговая сварка плавлением с использованием электрода в среде активных га-

зов (MAG), в том числе ее автоматизированные и роботизированные варианты [3]. Однако данный метод имеет ограничения, связанные со значительным тепловложением, что приводит к обширным зонам термического влияния (ЗТВ), повышенным остаточным напряжениям и деформациям конструкции [4, 5]. Кроме того, качество и геометрия шва сильно зависят от квали-

фикации оператора и требуют последующей механической обработки шва для обеспечения требуемых параметров [6].

Лазерная сварка, как концентрированный источник энергии с высокой плотностью мощности (10^6 – 10^8 Вт/см²), представляет собой перспективную альтернативу традиционным методам сварки [7–9]. Ее основные преимущества: глубокое проплавление при малой ширине шва, высокая скорость процесса, минимальная ЗТВ и, как следствие, сниженные тепловые деформации [10]. Для ответственных конструкций ключевым является вопрос обеспечения механических свойств сварного соединения, не уступающих свойствам основного металла [11].

Вопрос сравнительной оценки прочности соединений, выполненных лазерной и традиционной дуговой сваркой на толстолистовой стали 09Г2С, остается актуальным, особенно в контексте обоснования перехода на новые технологии в условиях серийного производства [12, 13].

Цель исследования – сравнительное исследование механических свойств и характера разрушения сварных соединений из низколегированной стали 09Г2С толщиной 10 мм, выполненных с использованием двух технологий: высокоэнергетической лазерной сварки и автоматизированной дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитного газа (MAG).

Для достижения поставленной цели проведены экспериментальные исследования, включающие изготовление серии лабораторных образцов стыковых и тавровых соединений; определение статической прочности соединений методом испытаний на одноосное растяжение с фиксацией разрушающей нагрузки и анализом локализации разрушения; а также детальный металлографический анализ для установления корреляции между технологией сварки, формируемой макро- и микроструктурой, и итоговыми прочностными характеристиками.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования выступали пластины из стали марки 09Г2С толщиной 10 мм. Химический состав и механические свойства материала соответствуют ГОСТ 19281-89. Для испытаний были изготовлены две серии образцов: стыковые соединения и тавровые соединения.

1. Оборудование и параметры сварки

Лазерная сварка выполнялась на роботизированном комплексе с волоконным лазером (IPG Photonics) номинальной мощностью 5 кВт. Скорость сварки поддерживалась в диапазоне 8–15 мм/с. В качестве защитного газа использовалась смесь аргона и углекислого газа [14].

Полуавтоматическая сварка (MAG) выполнялась на роботизированном комплексе с источником *LORCH SAPROM S 5 SPEED PULSE*. Сварка проводилась проволокой СВ-08Г2С диаметром 1,2 мм, аналогичной по составу основному металлу. Режимы сварки (сила тока 350 А, напряжение 30 В, скорость подачи проволоки 22 мм/с, расход газа 18 л/мин) подбирались в соответствии с требованиями к полному проплавлению.

2. Подготовка образцов для испытаний

Из сваренных пластин методом лазерной резки были изготовлены стандартные плоские образцы для испытаний на растяжение согласно ГОСТ 6996-66 «Сварные соединения. Методы определения механических свойств». Геометрия образцов приведена на рис. 1. Для каждого метода и типа соединения было изготовлено и испытано 10 образцов.

3. Методы испытаний и исследований

Физико-механические испытания на статическое растяжение до разрушения проводились на универсальных разрывных машинах УМ-10 и Р-20. Перед испытаниями для каждого образца с помощью штангенциркуля с точностью 0,01 мм замерялись фактические размеры рабочего сечения. В процессе испытания фиксировалась разрушающая сила (F_p , кН). Предел прочности ($\sigma_{всп}$, МПа) рассчитывался по формуле

$$\sigma_{всп} = F_p / (v \cdot \delta),$$

где v – ширина образца, мм; δ – толщина образца, мм.

Визуально определялось место разрушения: по основному металлу (ОМ) или по сварному шву (СШ).

Металлографические исследования проводились на инвертированном металлографическом микроскопе *Leica LM*. Изучались макро- и микроструктура шва, зоны термического влияния и основного металла. Оценка качества сварных соединений проводилась по ГОСТ Р ИСО 5817-2009. Для лазерной сварки данный стандарт использован по аналогии, так как специализированный нормативный документ для лучевых методов в рамках данной работы не использовался.

Результаты исследования и их обсуждение

1. Результаты физико-механических испытаний

Результаты испытаний стыковых соединений представлены в табл. 1. Данные демонстрируют существенное различие в поведении образцов, сваренных разными методами.

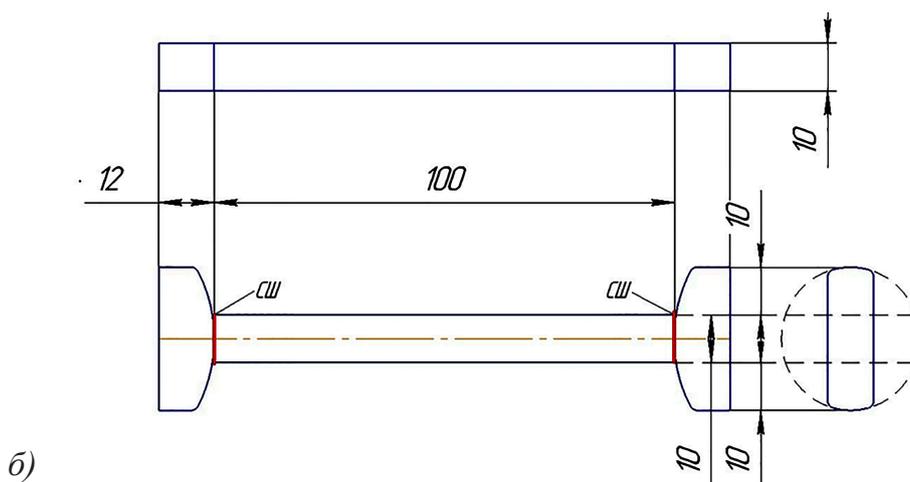
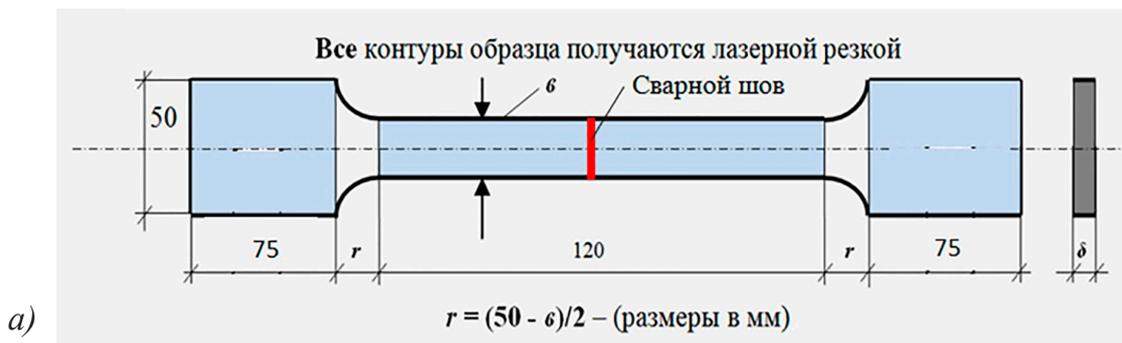


Рис. 1. Форма и размеры образцов для физико-механических испытаний:
 а – стыковое соединение; б – тавровое соединение
 (в – ширина рабочей части образца, δ – толщина)
 Примечание: составлена авторами на основе источника [12]

Таблица 1

Результаты физико-механических испытаний стыковых сварных соединений

| № п/п | Вид сварки | Предел прочности, $\sigma_{всш}$ (МПа) | Место разрушения |
|---------|--------------------|----------------------------------------|--------------------------|
| 1–10 | Лазерная сварка | 453,5–567,5 | ОМ |
| Среднее | Лазерная сварка | 531,5 | ОМ |
| 11–20 | Полуавтоматическая | 334,7–555,8 | ОМ (3 шт.) СШ (7 шт.) |
| Среднее | Полуавтоматическая | 460,6 | СШ (70 %) |

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Анализ данных, приведенных в табл. 1, показывает, что все образцы, изготовленные методом лазерной сварки, разрушились в основном металле, вне зоны сварного шва и ЗТВ. Среднее значение прочности этих образцов (531,5 МПа) соответствует уровню прочности основного металла стали 09Г2С ($\sigma_b \geq 490$ МПа).

В случае полуавтоматической сварки (рис. 2, а, б) только 3 из 10 образцов разрушились по основному металлу, при этом

один показал прочность на уровне 556 МПа. Остальные 7 образцов разрушились по сварному шву при значительно более низких значениях напряжения (от 335 до 503 МПа). Разброс значений предела прочности при МАG-сварке (от 334,7 до 555,8 МПа) более чем в 2 раза превышает разброс при лазерной сварке (от 453 до 567 МПа), что дополнительно подтверждает нестабильность дугового процесса и его чувствительность к условиям формирования шва.

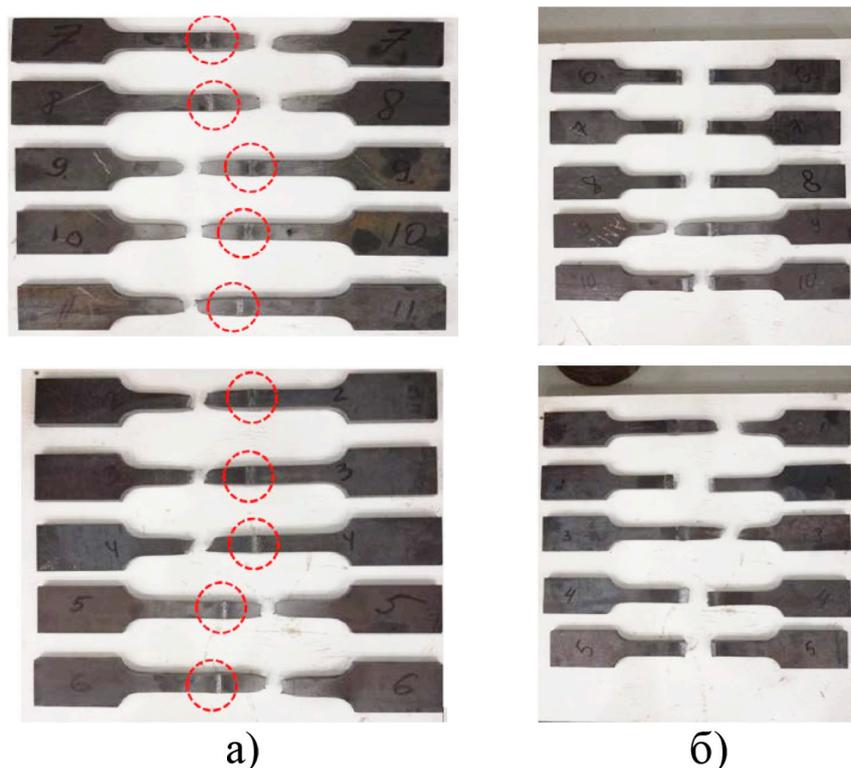


Рис. 2. Внешний вид образцов стыковых соединений после испытаний на растяжение: а – лазерная сварка (разрыв по ОМ); б – полуавтоматическая сварка (разрыв по СШ)
Примечание: составлена авторами по результатам данного исследования

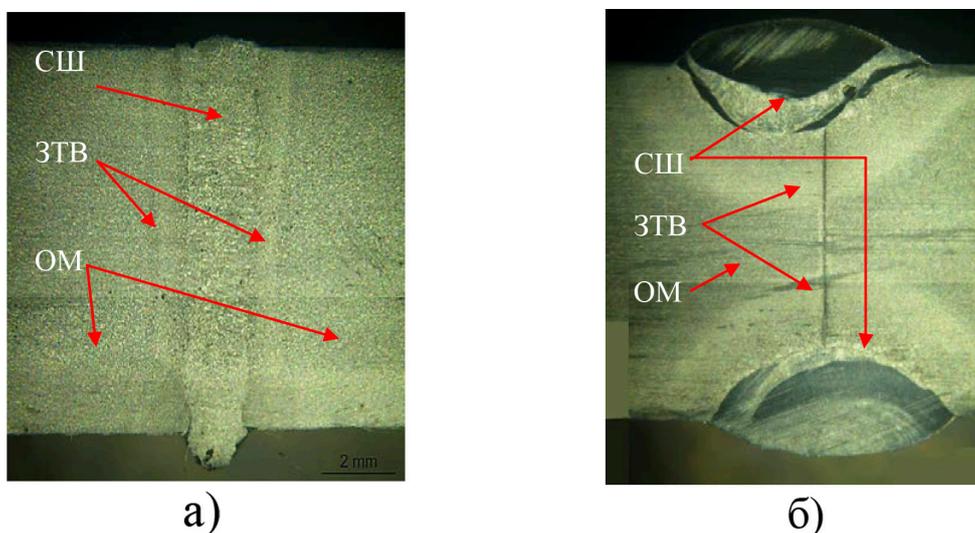


Рис. 3. Макрошлифы поперечных сечений сварных соединений:
а – лазерная сварка – сквозной провар, узкий «кинжальный» шов (ширина ~2 мм);
б – полуавтоматическая сварка – частичный провар (~4–5 мм), широкий шов (~6 мм) и обширная ЗТВ. СШ – сварной шов; ЗТВ – зона термического влияния; ОМ – основной металл
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Аналогичная тенденция наблюдается для тавровых соединений (табл. 2). Лазерная сварка обеспечила стабильно высокую прочность (550–584 МПа) с разрушением

по основному металлу. Полуавтоматическая сварка показала широкий разброс значений (295–547 МПа), только 1 из 4 образцов разрушился по основному металлу.

Таблица 2

Сводные результаты испытаний для тавровых соединений

| Вид сварки | Средний предел прочности, МПа | Преобладающее место разрушения |
|--------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Лазерная сварка | 572 | ОМ |
| Полуавтоматическая | 436 | СШ |

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования

2. Обсуждение результатов. Металлографический анализ

Выявленное превосходство лазерной сварки в прочности имеет прямую корреляцию с формируемой структурой соединения. Результаты металлографического анализа представлены на рис. 3, а, б.

Лазерная сварка обеспечила сквозное проплавление на всю толщину 10 мм за один проход. Шов имеет характерную «кинжальную» форму с шириной около 2 мм. Зона термического влияния (ЗТВ) минимальна и не превышает 1–2 мм (рис. 3, а). Микроструктура шва представлена мелким дендритным ферритно-перлитным зерном, что является оптимальным для прочности и ударной вязкости [15]. Отсутствие видимых дефектов (пор, трещин, непроваров) позволило классифицировать данные соединения по высшей категории качества «В» по ГОСТ Р ИСО 5817-2009.

При полуавтоматической сварке (рис. 3, б) наблюдается частичное проплавление (4–5 мм от поверхности) с формированием корневого и лицевого валиков. Общая ширина шва с ЗТВ достигает 10–15 мм. Широкая ЗТВ является следствием большего объема внесенного тепла. В микроструктуре ЗТВ наблюдаются участки с грубым зерном, что может служить локальным концентратором напряжений. В шве присутствуют единичные мелкие поры. Согласно классификации соединения соответствует категории «С».

Выводы

Таким образом, высокая прочность лазерных соединений напрямую обусловлена комплексом благоприятных структурных факторов. Обеспеченное технологией полное проплавление исключает наличие такого концентратора напряжений, как непровар. Минимальная ширина зоны термического влияния существенно сокращает объем металла с измененными и, как правило, ухудшенными механическими свойствами. Формирование благоприятной мелкозернистой структуры в самом шве является следствием высокой скорости охлаждения, характерной для концентрированного лазерного воздействия. Данные структурные

преимущества были подтверждены в ходе практической апробации технологии.

1. Проведенный сравнительный анализ сварных соединений из стали 09Г2С, выполненных с помощью волоконного лазера, по показателю статической прочности соединений, полученными роботизированной полуавтоматической *MAG*-сваркой. Средний предел прочности лазерных стыковых соединений составил 531,5 МПа против 460,6 МПа у *MAG*-сварки.

2. Установлен принципиально различный характер разрушения: 10 из 10 образцов лазерной сварки разрушились по основному металлу, что свидетельствует о прочности сварного шва, превышающей прочность основного металла. Для *MAG*-сварки 7 образцов разрушились по сварному шву и 3 образца – по основному металлу, что указывает на меньшую прочность сварного соединения и нестабильность прочности шва.

3. Металлографический анализ выявил прямую связь между механическими свойствами и структурой: лазерная сварка формирует соединение с полным проплавлением, узкой ЗТВ (1–2 мм) и мелкозернистой структурой, отвечающее высшей категории качества «В» по ГОСТ Р ИСО 5817-2009.

4. Полученные результаты позволяют рекомендовать лазерную сварку в качестве эффективной альтернативы традиционным дуговым методам для серийного производства ответственных сварных конструкций из низколегированной стали 09Г2С толщиной до 10 мм.

Список литературы

1. Сараев Ю. Н., Сидоров М. М. Тенденции и пути развития сварки и родственных технологий в России // Наука и техника в Якутии. 2023. № 1. С. 54–57. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tendentsii-i-puti-razvitiya-svarki-i-rodstvennyh-tehnologiy-v-rossii> (дата обращения: 10.10.2025). DOI: 10.24412/1728-516X-2023-1-54-57.

2. Карлина Ю. И., Кононенко Р. В., Иванчивский В. В., Попов М. А., Дерюгин Ф. Ф., Бянкин В. Е. Обзор современных требований к сварке трубных высокопрочных низколегированных сталей // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. 2023. № 4 (25). С. 36–60. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-sovremennyh-trebovaniy-k-svarke-trubnyh-vysokoprochnyh-nizkolegированных-staley> (дата обращения: 18.10.2025). DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-36-60.

3. Сараев Ю. Н., Гладковский С. В., Лепихин С. В., Двойников Д. А., Каманцев И. С., Веселова В. Е. Влияние технологии сварки на структуру, механические свойства и характеристики трещиностойкости сварных соединений из стали 09Г2С // *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. 2017. № 5. С. 23–42. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35119071> (дата обращения: 25.01.2026). DOI: 10.17804/2410-9908.2017.5.023-042.
4. Maksymova S. V., Zvolinskyy I. V., Yurkiv V. V., Minakov S. Residual stresses in thin-sheet galvanized steel joints after arc welding and plasma brazing // *The Paton welding journal*. 2020. № 9. P. 31–35. DOI: 10.37434/tpwj2020.09.05.
5. Сараев Ю. Н., Голиков Н. И., Дмитриев В. В., Санников И. И., Безбородов В. П., Григорьева А. А. Исследование влияния адаптивной импульсно-дуговой сварки на механические свойства и остаточные напряжения сварных соединений стали марки 09г2с // *Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты*. 2013. № 3 (60). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-adaptivnoy-impulsno-dugovoy-svarki-na-mehaniicheskie-svoystva-i-ostatochnye-napryazheniya-svartnyh-soedineniy> (дата обращения: 27.01.2026).
6. Сорокин В. Н., Стеклов О. И., Ганусов К. А., Деркач Д. В. Компетентность и квалификация сварщика в системе обеспечения качества сварочного производства // *Территория Нефтегаз*. 2014. № 8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompetentnost-i-kvalifikatsiya-svartschika-v-sisteme-obespecheniya-kachestva-svarochnogo-proizvodstva> (дата обращения: 27.01.2026).
7. Сейдгазов Р. Д., Мирзаде Ф. Х. Физическое обоснование схемы дискретизации при моделировании глубокого проплавления металлов в лазерных и родственных технологиях // *Математическое моделирование*. 2024. № 5 (36). С. 41–54. URL: https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?ws-how=paper&jrnid=mm&paperid=4563&option_lang=rus&ysclid=mm0b0rk0uo759397022 (дата обращения: 26.01.2026). DOI: 10.20948/mm-2024-05-04.
8. Туричин Г. А., Цибульский И. А., Кузнецов М. В., Ахметов А. Д., Величко О. В. Лазерно-дуговая сварка в различных пространственных положениях // *Глобальная энергия*. 2013. № 4–1 (183). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/lazerno-dugovaya-svarka-v-razlichnyh-prostranstvennyh-polozheniyah> (дата обращения: 27.01.2026).
9. Klimpel A. Review and analysis of modern laser beam welding processes // *Materials*. 2024. T. 17. Vol. 18. С. 4657. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/17/18/4657> (дата обращения: 27.01.2026). DOI: 10.3390/ma17184657.
10. Li S., Liu H., Zhang H., Pan X., Sing S. L. Research on thermal efficiency and weld forming coefficient prediction of ultra-high strength steel welded joint under different energy inputs // *Journal of Materials Research and Technology*. March–April 2024. Vol. 29. С. 4102–4109. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S223878542400379X> (дата обращения: 05.01.2026). DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.02.086.
11. Кузнецов М. В., Ларин М. В., Кузнецова Д. А., Попович А. А. Оценка остаточных деформаций сварного соединения, образованного при различных способах сварки // *Фотоника*. 2025. Т. 19. № 3. С. 192–209. EDN: BGUGNM. URL: <https://journals.eco-vector.com/1993-7296/articleview/682906> (дата обращения: 27.01.2026). DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2025.19.3.192.209.
12. Позняков В. Д., Шеягин В. Д., Жданов С. Л., Бернацкий А. В., Сиора А. В. Сравнительная оценка свойств сварных соединений высокопрочной стали NA-XTRA-70, полученных дуговой, лазерной и гибридной лазерно-дуговой сваркой // *Автоматическая сварка*. 2016. № 5–6. С. 124–126. URL: <https://bik.sfu-kras.ru/elib/view?id=PRSV-avsv/2016/5/6-702312> (дата обращения: 27.01.2026).
13. Ялыгин С. А., Ермаков Б. С., Столяров А. В., Койнов Е. Г., Швецов О. В., Шапошников Н. О., Токарев В. О., Голиков Н. И. Влияние послесварочной термической обработки на эксплуатационные свойства стали 09Г2С, применяемой для изготовления буроопускных свай // *ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти*. 2024. № 9 (1). С. 173–182. DOI: 10.51890/2587-7399-2024-9-1-173-182 (дата обращения: 25.01.2026).
14. Колубаев А. В., Сизова О. В., Колубаев Е. А., Заикина А. А., Воронцов А. В., Денисова Ю. А., Рубцов В. Е. Особенности структуры сварного шва при лазерной сварке конструкционной стали 09г2с // *Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты*. 2018. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-struktury-svartnogo-shva-pri-lazernoy-svark-konstruktsionnoy-stali-09g2s> (дата обращения: 25.01.2026).
15. Горунов А. И., Нюхляев О. А., Гильмутдинов А. Х. Лазерная сварка труб из стали 09Г2С // *Вестник ЮГУ*. 2024. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/lazernaya-svarka-trub-iz-stali-09g2s> (дата обращения: 25.01.2026).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2024-0004, госзадание ВЛГУ).

Financing: The research was carried out within the state assignment in the field of scientific activity of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme FZUN-2024-0004, state assignment of the VISU).