



## ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОТВЕРДОСТИ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ S700MC ПРИ MIG-СВАРКЕ

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*

Работа посвящена экспериментальному исследованию распределения микротвердости в стыковых сварных соединениях высокопрочной низколегированной стали MAGSTRONG S700MC толщиной 3 и 6 мм, выполненных полуавтоматической MIG-сваркой в среде аргона. Актуальность обусловлена широким внедрением данной стали в машиностроение при недостатке систематизированных данных о влиянии термического цикла сварки на локальные механические свойства соединений различной толщины. Проведен сравнительный анализ микротвердости в характерных зонах сварного соединения, включая основной металл, зону термического влияния, зону сплавления и металл шва, с применением статистической обработки результатов. Измерения проводили методом Виккерса при нагрузке 100 г. Для каждой толщины изготовлено по 5 образцов, выполнена статистическая обработка с оценкой средних значений и доверительных интервалов. Установлено, что микротвердость основного металла соответствует нормативным требованиям, предъявляемым к данному классу прочности. Во всех исследованных образцах зафиксировано разупрочнение в зоне термического влияния, при этом минимальные значения твердости наблюдаются в зоне сплавления, что подтверждает структурную неоднородность соединения. Выявлена зависимость твердости металла шва от толщины проката: для образцов меньшей толщины характерны более высокие значения и меньший разброс показателей, что связано с различными скоростями охлаждения и условиями структурообразования при сварке. Полученные результаты позволяют обосновать необходимость учета зоны разупрочнения при проектировании несущих сварных узлов и могут быть использованы для верификации расчетных моделей, а также для оптимизации режимов дуговой сварки стали S700MC при изготовлении ответственных металлоконструкций.

**Ключевые слова:** микротвердость, высокопрочная сталь S700MC, сварное соединение, зона термического влияния, металл шва, разупрочнение, полуавтоматическая сварка в среде аргона, скорость охлаждения, распределение свойств, статистическая обработка

## STUDY OF MICROHARDNESS DISTRIBUTION IN WELDED JOINTS OF HIGH-STRENGTH STEEL S700MC UNDER MIG WELDING

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 Stoletov”, Vladimir, Russian Federation,  
e-mail: d.belov@laser33.ru*

This paper presents an experimental study of the microhardness distribution in butt-welded joints of high-strength low-alloy steel MAGSTRONG S700MC, with thicknesses of 3 mm and 6 mm, produced by semi-automatic MIG welding in an argon atmosphere. The relevance of this work stems from the increasing use of this steel in engineering structures and the lack of systematic data on the influence of the welding thermal cycle on the local mechanical properties of joints of varying thicknesses. A comparative analysis of microhardness was conducted in the characteristic zones of the welded joint, including the base metal, the heat-affected zone (HAZ), the fusion zone, and the weld metal, employing statistical processing of the results. Measurements were performed using the Vickers method under a load of 100 g. Five samples were prepared for each thickness, and statistical processing was carried out, including the evaluation of mean values and confidence intervals. It was established that the microhardness of the base metal meets the standard requirements for this strength class. Softening within the heat-affected zone was recorded in all investigated samples, with the minimum hardness values observed in the fusion zone, confirming the structural heterogeneity of the joint. A dependence of the weld metal hardness on the sheet thickness was revealed: samples of smaller thickness are characterized by higher values and a smaller scatter of indicators. This is associated with different cooling rates and structure formation conditions during welding. The obtained results substantiate the necessity of accounting for the softening zone in the design of load-bearing welded units. They can also be used for the verification of computational models and for optimizing arc welding parameters for S700MC steel in the manufacture of critical metal structures.

**Keywords:** microhardness, high-strength steel S700MC, welded joint, heat-affected zone, weld metal, softening, gas metal arc welding, cooling rate, property distribution, statistical processing

### Введение

Высокопрочные низколегированные стали, например MAGSTRONG S700MC, находят все более широкое применение в несущих конструкциях машиностроения и технике. Интерес к данным материалам обусловлен сочетанием высокой прочности (предел текучести не менее 700 МПа), хорошей свариваемости благодаря низкому содержанию углерода и относительно невысокой стоимости, достигаемой за счет микролегирования [1].

Однако термический цикл сварки неизбежно приводит к формированию структурной и механической неоднородности в соединении. Выделяют три основные зоны: основной металл (ОМ), зону термического влияния (ЗТВ) и металл шва [2]. В ЗТВ, нагретой до различных температур, могут протекать как процессы разупрочнения (отпуск, сфероидизация карбидов), так и упрочнения (образование мартенсита), что критически влияет на эксплуатационные свойства конструкции [3]. Проблема структурной неоднородности для высокопрочных сталей определяет исходные свойства, которые достигнуты за счет формирования дисперсных структур [4].

Несмотря на обширную литературу по сварке сталей класса S700MC [5–7], существует недостаток систематизированных данных, необходимых для оценки влия-

ния масштабного фактора (толщины проката) на формирование градиента свойств при полуавтоматической сварке в среде аргона (MIG). Большинство работ либо фокусируются на конкретной толщине, либо исследуют специализированные методы сварки (лазерная, гибридная) [8, 9]. Интегральным показателем, коррелирующим с прочностными характеристиками, является микротвердость, распределение которой по сечению дает основание судить о качестве сварки и локализовать зоны возможного разрушения [10].

**Цель исследования** – экспериментальное определение и сравнительный анализ распределения микротвердости в сварных соединениях стали MAGSTRONG S700MC двух толщин (3 и 6 мм), выполненных полуавтоматической MIG-сваркой, для выявления влияния толщины на формирование локальных механических свойств с применением статистической оценки достоверности результатов.

### Материалы и методы исследования

В качестве основного металла использована сталь MAGSTRONG S700MC толщиной 3,0 и 6,0 мм. Сварка выполнена проволокой сплошного сечения Weld CF 79 (диаметр 1,2 мм) в среде технического аргона (99,98 %). Режимы сварки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры режима полуавтоматической сварки (MIG) в среде Ar

Толщина образца, мм	Сварочный ток, А	Напряжение, В	Скорость подачи проволоки, м/мин	Скорость сварки, м/мин	Расход защитного газа, л/мин
3	120	18–20	2,5	0,25–0,35	5
6	233	24–26	6,1	0,18–0,25	5

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

Изготовлено по 5 стыковых образцов для каждой толщины (типы I и III по ГОСТ 6996-66). Подготовка кромок – без разделки (3 мм) и с V-образной разделкой (6 мм). Сварка выполнялась на полуавтоматическом сварочном аппарате Lorch S SpeedPulse в жестко закрепленном состоянии. Микрошлифы вырезались методом электроэрозионной резки (станок DK 7725), заливались в эпоксидную смолу и подвергались шлифовке (от P60 до P2500) и алмазной полировке. Травление структу-

ры проводилось 5 % спиртовым раствором HNO<sub>3</sub> (время 10–15 с).

Измерения микротвердости по Виккерсу выполнены на микротвердомере ПМТ-3 (нагрузка 100 г, выдержка 15 с) в соответствии с ГОСТ 9450-76.

Схемы индентирования включали дорожки от основного металла через ЗТВ в шов с шагом 0,1 мм, для охвата всех характерных зон (рис. 1, 2).

Количество замеров на одном образце составляло 25–35.

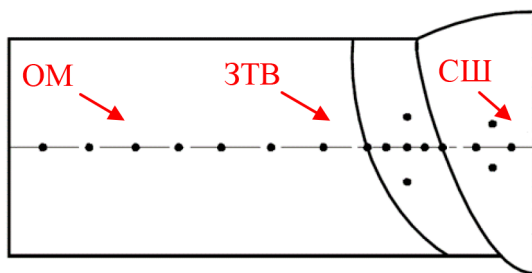


Рис. 1. Схема измерения образцов толщиной 3 мм:  
ОМ – основной металл; ЗТВ – зона термического влияния; СШ – сварной шов  
Примечание: составлен авторами на основе ГОСТ 6996-66

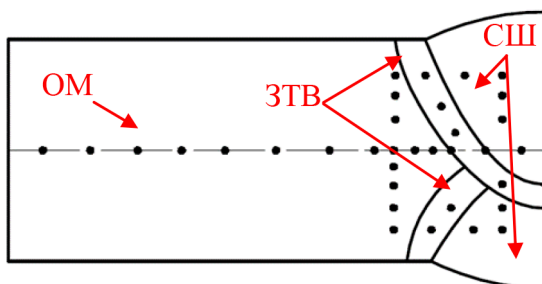


Рис. 2. Схема измерения образцов толщиной 6 мм:  
ОМ – основной металл; ЗТВ – зона термического влияния; СШ – сварной шов  
Примечание: составлен авторами на основе источника ГОСТ 6996-66

#### Статистическая обработка результатов

Для оценки достоверности полученных результатов проводилась статистическая

обработка данных измерений микротвердости. Для каждой исследуемой зоны (основной металл, ЗТВ, зона сплавления, металл шва) для образцов толщиной 3 и 6 мм рассчитывали среднее арифметическое значение ( $\bar{x}$ ), среднее квадратическое отклонение ( $s$ ) и стандартную ошибку среднего (SE). Доверительный интервал для средних значений определяли при доверительной вероятности 95 % с использованием t-критерия Стьюдента. Количество измерений в каждой серии составляло  $n = 5$ . Границы доверительного интервала рассчитывали по формуле

$$ДИ = \bar{x} \pm t_{0,05;n-1} \times \frac{s}{\sqrt{n}},$$

где  $t_{0,05;n-1}$  – коэффициент Стьюдента (для  $n = 5$  и доверительной вероятности 95 %  $t_{0,05;4} = 2,776$ ).

#### Результаты исследования и их обсуждение

Анализ микроструктуры травленных шлифов подтвердил наличие четкой границы раздела между металлом шва, зоной сплавления и ЗТВ. В ЗТВ наблюдается структурная неоднородность: участки крупного зерна вблизи линии сплавления и более мелкодисперсные структуры на периферии.

Результаты измерений микротвердости систематизированы в табл. 2 и 3. Для удобства анализа приведены средние арифметические значения по каждой зоне для серии образцов.

Таблица 2

#### Результаты испытаний образцов толщиной 3 мм

Показатель	Твердость основного металла, HV	Твердость зоны теплового воздействия, HV	Твердость зоны сплавления, HV	Твердость сварного шва, HV
1	272,5	267,0	265,7	275,0
2	265,0	224,6	217,4	270,2
3	269,7	246,0	251,4	266,1
4	272,6	243,4	247,1	273,3
5	259,2	240,5	241,6	274,0
Ср. знач.	267,8	244,3	244,6	271,7
S	5,2	14,2	16,1	3,2
ДИ 95 %	267,8 ± 6,4	244,3 ± 17,6	244,6 ± 20,0	271,7 ± 4,0

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования. В первых пяти строках указаны номера образцов, s – среднеквадратичное отклонение; ДИ 95 % – доверительный интервал для доверительной вероятности 0,95  $t_{0,05;4} = 2,776$

Таблица 3

Результаты испытаний образцов толщиной 6 мм

Показатель	Твердость основного металла, HV	Твердость зоны теплового воздействия, HV	Твердость зоны сплавления, HV	Твердость сварного шва, HV
1	261,0	224,6	217,4	243,1
2	262,7	249,9	254,8	258,7
3	272,7	260,6	264,4	269,3
4	270,6	254,1	259,7	270,0
5	267,5	245,7	252,2	270,1
Ср. знач.	266,9	246,9	249,7	262,2
S	4,9	12,4	16,5	10,6
ДИ 95 %	266,9 ±6,1	246,9 ± 15,4	249,7 ± 20,5	262,2 ± 13,1

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования. В первых пяти строках указаны номера образцов, s – среднеквадратичное отклонение; ДИ 95 % – доверительный интервал для доверительной вероятности  $0,95 t_{0,05;4} = 2,776$

Во всех образцах зафиксировано снижение твердости в ЗТВ. Средние значения твердости ЗТВ составляют 244,3 HV для толщины 3 мм и 246,9 HV для толщины 6 мм, что на 8–10 % ниже, чем в основном металле (267,8 и 266,9 HV соответственно). Стандартное отклонение в ЗТВ выше (14,2–12,4 HV), чем в ОМ (около 5 HV), что отражает структурную неоднородность этой зоны. Минимальные единичные замеры (216–217 HV) наблюдались в зоне сплавления и соответствуют наибольшей степени разупрочнения (до 15–17 %).

Наибольший интерес представляет сравнение твердости металла шва. Для образцов толщиной 3 мм средняя твердость шва составила 271,7 HV (95 % довери-

тельный интервал: 267,7–275,7 HV), тогда как для образцов 6 мм – 262,2 HV (95 % ДИ: 249,0–275,4 HV). Разница средних значений составляет 9,5 HV. При этом наблюдается более высокое стандартное отклонение для шва толщиной 6 мм (10,6 HV) по сравнению с 3 мм (3,3 HV). Это указывает на большую нестабильность структуры металла шва при сварке более толстого проката, что, вероятно, связано с особенностями теплоотвода и формирования сварочной ванны при увеличенном объеме наплавленного металла. Несмотря на перекрытие доверительных интервалов, различие в средних значениях и характере распределения является статистически и физически значимым.

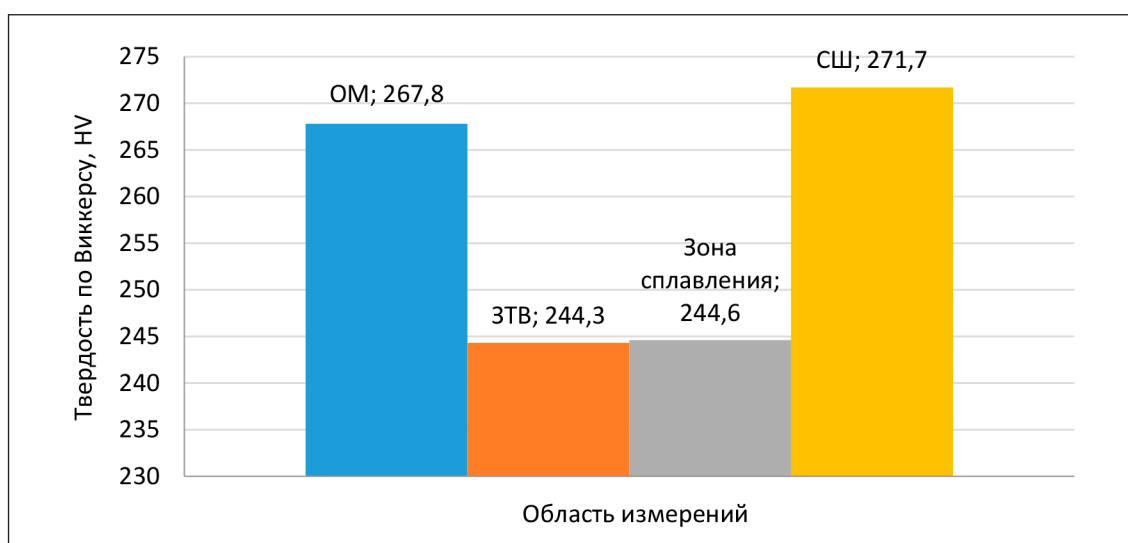


Рис. 3. Усредненное распределение микротвердости по сечению сварных соединений толщиной 6 мм  
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

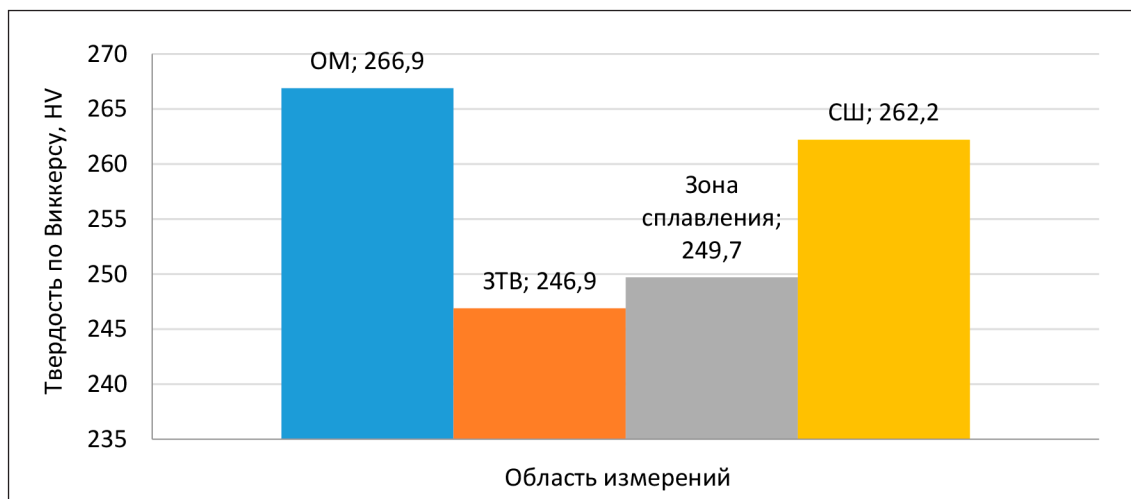


Рис. 4. Усредненное распределение микротвердости по сечению сварных соединений толщиной 3 мм  
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Усредненное распределение микротвердости по сечению всех исследованных образцов представлено на диаграммах (рис. 3 и 4), которые иллюстрируют описанные закономерности: стабильный ОМ, «провал» в ЗТВ и различный уровень твердости шва.

На рис. 5, а, представлено соединение стали толщиной 3 мм. Четко визуализируются узкая зона термического влияния (ЗТВ) и зона сплавления (ЗСПЛ) без резких пере-

ходов, что характерно для сварки тонкого металла без разделки кромок. На рис. 5, б, показано соединение стали толщиной 6 мм с V-образной разделкой. Здесь ЗТВ имеет большую протяженность, а геометрия шва (ЗСП) отличается от тонкого образца, что обусловлено большим объемом наплавленного металла и иными условиями теплоотвода. Ширина ЗТВ коррелирует с полученными профилями микротвердости (рис. 3 и 4).

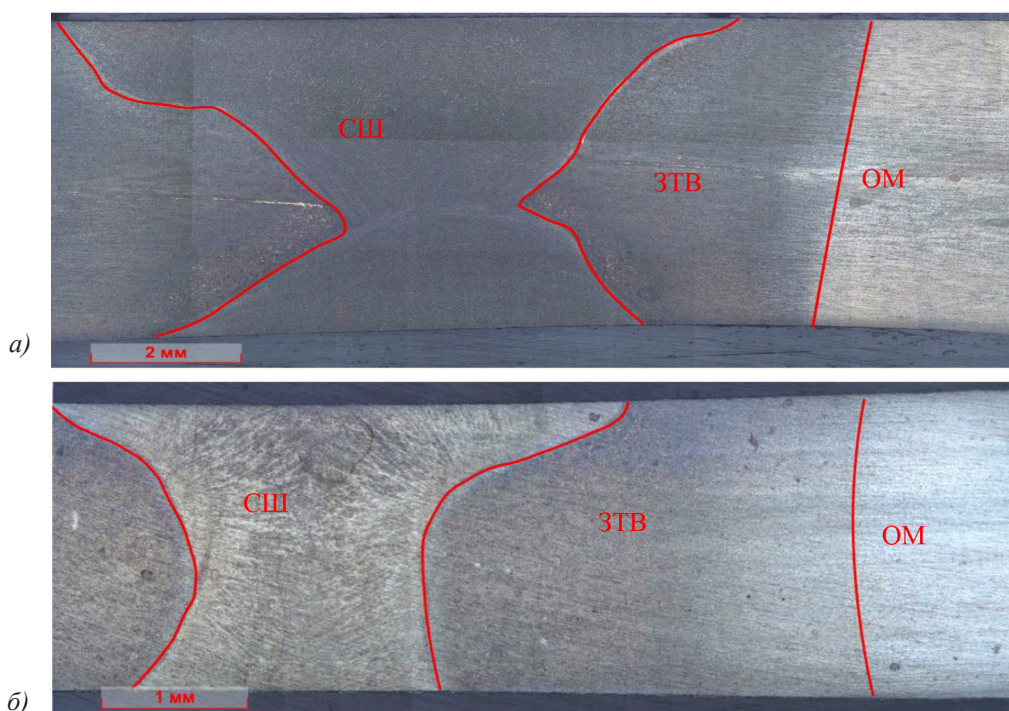


Рис. 5. Микроструктура зоны сварных соединений: а – сталь толщиной 3 мм, б – сталь толщиной 6 мм: ОМ – основной металл; ЗТВ – зона термического влияния; СШ – сварной шов  
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Полученные значения твердости основного металла (266,9–267,8 HV) хорошо коррелируют с нормативными требованиями к стали класса прочности S700 и данными других исследователей [5, 11], что подтверждает репрезентативность выборки.

Обнаруженное разупрочнение в ЗТВ является характерной особенностью сварки термоупрочненных низколегированных сталей [3, 12]. Участки ЗТВ, нагретые в межкритическом интервале температур или до температур высокого отпуска, теряют начальную прочность из-за укрупнения карбидов и изменений в структуре зерна, что приводит к снижению прочностных свойств. Степень разупрочнения (до 15 %) согласуется с результатами, полученными для аналогичных сталей при дуговых методах сварки [6, 13]. Локализация пластической деформации именно в этой зоне может определять несущую способность всего соединения при статическом и особенно циклическом нагружении [14].

Ключевым результатом работы является выявленное различие в твердости металла шва в зависимости от толщины свариваемого проката. Более высокая средняя твердость шва в образцах толщиной 3 мм (271,7 HV) по сравнению с 6 мм (262,2 HV) может быть объяснена различными термическими циклами. Тонкий металл характеризуется более высокими скоростями охлаждения, вследствие интенсивного теплоотвода. Это способствует формированию в металле шва более дисперсных структур, обладающих повышенной твердостью [15, 16]. Для образцов 6 мм при большей погонной энергии скорость охлаждения шва снижается, что может приводить к образованию большего количества ферритной составляющей и, как следствие, к некоторому снижению твердости.

Отсутствие в ЗТВ высоких значений твердости (свыше 350 HV) свидетельствует о том, что выбранные режимы сварки обеспечивают отсутствие закалочных структур и позволяют избежать образования холодных трещин.

### Выводы

1. Установлено, что микротвердость основного металла составляет 266,9–267,8 HV при стандартном отклонении около 5 HV, что соответствует нормативным показателям для данного класса прочности и подтверждает однородность исходного материала.

2. Подтверждено наличие зоны разупрочнения в ЗТВ, где падение микротвердости относительно основного металла составляет от 8 до 15–17 %. Минимальные

зафиксированные значения (216–217 HV) наблюдаются в зоне сплавления. Повышенные значения стандартного отклонения в ЗТВ (12–16 HV) отражают структурную неоднородность этой области.

3. Выявлена зависимость твердости металла шва от толщины проката: для образцов толщиной 3 мм средняя твердость шва (271,7 HV, 95 % ДИ: 267,7–275,7 HV) выше, чем для образцов 6 мм (262,2 HV, 95 % ДИ: 249,0–275,4 HV). При этом для толщины 6 мм характерен существенно больший разброс значений ( $s = 10,6$  HV против 3,3 HV для 3 мм), что указывает на менее стабильные условия структурообразования. Данный эффект объясняется более высокой скоростью охлаждения тонких листов, способствующей формированию дисперсных упрочняющих структур.

4. Полученные результаты, включая статистические характеристики, могут быть использованы для верификации расчетных моделей сварных соединений и оптимизации режимов сварки с целью минимизации зоны разупрочнения и обеспечения стабильности свойств металла шва.

### Список литературы

1. Chen J., Shi Z., Luo X., Chai F., Pan, T., Feng G., Yang C. Micro-alloying effects on microstructure and weldability of high-strength low-alloy steel: a review // *Materials*. 2025. Vol. 18. Is. 5. P. 1036. DOI: 10.3390/ma18051036. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/18/5/1036> (дата обращения: 01.02.2026).
2. Wang P., Gomes F. M., Warchomicka F. G., Ernst W., Vallant R., Poletti M. C., Enzinger N. The effect of thermomechanical welding on the microstructure and mechanical properties of S700MC steel welds // *Weld World*. 2024. Vol. 68. Is. 5. P. 1053–1069. DOI: 10.1007/s40194-024-01711-x. URL: [https://www.researchgate.net/publication/375649802\\_The\\_effect\\_of\\_thermomechanical\\_welding\\_on\\_the\\_microstructure\\_and\\_mechanical\\_properties\\_of\\_S700MC\\_steel\\_welds](https://www.researchgate.net/publication/375649802_The_effect_of_thermomechanical_welding_on_the_microstructure_and_mechanical_properties_of_S700MC_steel_welds) (дата обращения: 09.02.2026).
3. Ji D., Zhang J., Liu Y., Zhang B., Chen X., Li R. Microstructural evolution and fatigue performance of 25CrMo4 steel remanufactured by high-speed laser cladding of Inconel 625 alloy // *International Journal of Fatigue*. 2026. Vol. 203. P. 109291. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2025.109291 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112325004888> (дата обращения: 18.02.2026).
4. Zhang D., Xu T., Xu J., Li W., Zhang H., Hou, J. Effect of microstructural characteristics on the impact fracture behavior of cryogenic 9Ni steel // *IOP Publishing. Materials Research Express*. 2023. Vol. 10. Is. 10 P. 114318. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127525007385> (дата обращения: 06.02.2026). DOI: 10.1088/2053-1591/acfa9.
5. Gorka J., Stano S. Microstructure and properties of hybrid laser arc welded joints (laser beam-MAG) in thermo-mechanical control processed S700MC steel // *Metals*. 2018. Vol. 8. Is. 2. P. 132. URL: [https://www.researchgate.net/publication/323284762\\_Microstructure\\_and\\_Properties\\_of\\_Hybrid\\_Laser\\_Arc\\_Welded\\_Joints\\_Laser\\_Beam-MAG\\_in\\_Thermo-Mechanical\\_Control\\_Processed\\_S700MC\\_Steel](https://www.researchgate.net/publication/323284762_Microstructure_and_Properties_of_Hybrid_Laser_Arc_Welded_Joints_Laser_Beam-MAG_in_Thermo-Mechanical_Control_Processed_S700MC_Steel) (дата обращения: 07.02.2026). DOI: 10.3390/met8020132.
6. Skowrońska B., Chmielewski T., Golański D., Szulc J. Weldability of S700MC steel welded with the hybrid plasma+

MAG method // *Manufacturing Review*. 2020. Vol. 7. P. 4. URL: [https://www.researchgate.net/publication/338836631\\_Weldability\\_of\\_S700MC\\_steel\\_welded\\_with\\_the\\_hybrid\\_plasma\\_MAG\\_method](https://www.researchgate.net/publication/338836631_Weldability_of_S700MC_steel_welded_with_the_hybrid_plasma_MAG_method) (дата обращения: 20.01.2026). DOI: 10.1051/mfreview/2020001.

7. Szczucka-Lasota B., Węgrzyn T., Jurek A. Formation of oxides and sulfides during the welding process of S700MC steel by using new electrodes wires // *Materials*. 2024. Vol. 17. Is. 12. P. 2974. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/17/12/2974> (дата обращения: 23.01.2026). DOI: 10.3390/ma17122974.

8. Günther J., Prowaznik R., Krug D., Jahn S., Niendorf T., Wegener T. Microstructure and mechanical properties of hand-held laser beam welded S700MC high-strength steel // *Journal of Advanced Joining Processes*. 2025. № 12. P. 100359. URL: [https://www.researchgate.net/publication/397542689\\_Microstructure\\_and\\_Mechanical\\_Properties\\_of\\_Hand-Held\\_Laser\\_Beam\\_Welded\\_S700MC\\_High-Strength\\_Steel](https://www.researchgate.net/publication/397542689_Microstructure_and_Mechanical_Properties_of_Hand-Held_Laser_Beam_Welded_S700MC_High-Strength_Steel) (дата обращения: 27.01.2026). DOI: 10.1016/j.jajp.2025.100359.

9. Gorka J. Structure and properties of hybrid laser arc welded t-joints (laser beam-mag) in thermo-mechanical control processed steel S700mc of 10 mm thickness // *Archives of Metallurgy and Materials*. 2018. Vol. 63. Is. 3. P. 1125–1131. URL: [https://www.researchgate.net/publication/328850632\\_Structure\\_and\\_properties\\_of\\_hybrid\\_laser\\_arc\\_welded\\_T-Joints\\_laser\\_beam\\_-\\_MAG\\_in\\_thermo-mechanical\\_control\\_processed\\_steel\\_S700MC\\_of\\_10\\_mm\\_thickness](https://www.researchgate.net/publication/328850632_Structure_and_properties_of_hybrid_laser_arc_welded_T-Joints_laser_beam_-_MAG_in_thermo-mechanical_control_processed_steel_S700MC_of_10_mm_thickness) (дата обращения: 04.02.2026). DOI: 10.24425/123785.

10. Шайманов Г. С., Симонов М. Ю., Симонов Ю. Н. Анализ структуры и карт распределения микротвердости под поверхностью разрушения конструкционных сталей после однократных динамических испытаний // *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*. 2023. Т. 25. № 1. С. 27–36. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-struktury-i-kart-raspredeleniya-mikrotverdosti-pod-poverhnostyu-razrusheniya-konstruktsionnyh-staley-posle-odnokratnyh> (дата обращения: 10.02.2026). DOI: 10.15593/2224-9877/2023.1.03.

11. Spachinger S. J., Ernst W., Enzinger N., Influence of Ti on the toughness of the FGHAZ and the CGHAZ of high-strength microalloyed S700MC steels // *Welding in the World*. 2017. Vol. 61. № 1. P. 1117–1131. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40194-017-0480-7>

(дата обращения: 10.02.2026). DOI: 10.1007/s40194-017-0480-7.

12. Gorka J. Study of structural changes in S700MC steel thermomechanically treated under the influence of simulated welding thermal cycles // *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*. 2015. Vol. 22. P. 497–502. URL: [https://www.researchgate.net/publication/285778837\\_Study\\_of\\_structural\\_changes\\_in\\_S700MC\\_steel\\_thermomechanically\\_treated\\_under\\_the\\_influence\\_of\\_simulated\\_welding\\_thermal\\_cycles](https://www.researchgate.net/publication/285778837_Study_of_structural_changes_in_S700MC_steel_thermomechanically_treated_under_the_influence_of_simulated_welding_thermal_cycles) (дата обращения: 18.02.2026).

13. Полетаев Ю. В., Полетаев В. Ю. Влияние термического цикла сварки и повторного нагрева на структурно-фазовые изменения низколегированной Cr-Ni-Mo-V стали // *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2016. № 4 (87). С. 96–103. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-termicheskogo-tsikla-svarki-i-povtornogo-nagreva-na-strukturno-fazovye-izmeneniya-nizkolegировannoy-cr-ni-mo-v-stali> (дата обращения: 23.02.2026). DOI: 10.12737/22166.

14. Панин В. Е., Панин С. В., Почивалов Ю. И., Смирнова А. С., Еремин А. В. Структурно-масштабные уровни пластической деформации и разрушения сварных соединений высокопрочных титановых сплавов // *Физическая мезомеханика*. 2018. № 4. С. 33–44. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/strukturno-masshtabnye-urovni-plasticheskoy-deformatsii-i-razrusheniya-svarnyh-soedineniy-vysokoprochnyh-titanovykh-splavov> (дата обращения: 23.02.2026). DOI: 10.24411/1683-805X-2018-14004.

15. Gorka J. Microstructure and properties of the high-temperature (HAZ) of thermo-mechanically treated S700MC high-yield-strength steel // *Materials and Technologies*. 2016. Vol. 50. Is. 4. P. 617–621. URL: [https://www.researchgate.net/publication/306242330\\_Microstructure\\_and\\_properties\\_of\\_the\\_high-temperature\\_HAZ\\_of\\_thermo-mechanically\\_treated\\_S700MC\\_high-yield-strength\\_steel](https://www.researchgate.net/publication/306242330_Microstructure_and_properties_of_the_high-temperature_HAZ_of_thermo-mechanically_treated_S700MC_high-yield-strength_steel) (дата обращения: 27.02.2026). DOI: 10.17222/mit.2015.123.

16. Чукин М. В., Полецков П. П., Набатчиков Д. Г., Гушина М. С., Бережная Г. А. Влияние легирующих элементов на свойства сталей при различных скоростях охлаждения // *Качество в обработке материалов*. 2016. № 1 (5). С. 5–8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-legiruyuschih-elementov-na-svoystva-staley-pri-razlichnyh-skorostyah-ohlazhdeniya> (дата обращения: 12.01.2026).

**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-2025-0004, госзадания ВлГУ).

**Financing:** The work was performed within the framework of the state research assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic FZUN-2025–0004, state assignment to Vladimir State University).