

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-4-40-45>

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И МИКРОСТРУКТУРЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ КОНСТРУКЦИОННОЙ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ S690QL РОССИЙСКОГО И ЗАРУБЕЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА

© Андрей Александрович Галкин, Юлия Сергеевна Мордовина\*, Максим Сергеевич Аносов, Дмитрий Александрович Шатагин

Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Россия, 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24; \*e-mail: [ips4@nntu.ru](mailto:ips4@nntu.ru)

*Статья поступила 27 августа 2023 г. Поступила после доработки 27 сентября 2023 г. Принята к публикации 21 ноября 2023 г.*

Сталь S690QL предназначена для сварных тяжело нагруженных конструкций: грузоподъемных стрел, траверсов, прицепов тяжеловозов и др. В работе представлены результаты исследования механических свойств и микроструктуры стали S690QL отечественного и зарубежного производства и вязких свойств сварных образцов при разных температурах. Использовали методы эмиссионной атомной спектроскопии, испытаний на растяжение и ударную вязкость, микроструктурного анализа. Твердость определяли методом Виккерса. Установлено, что химический состав обеих сталей практически идентичен. Значения ударной вязкости образцов из отечественной S690QL превышают показатели зарубежной. Особенно это касается металла, не подвергнутого сварочным процессам (ударная вязкость для российской стали в этой зоне составила 200 Дж/см<sup>2</sup> при –40 °С, что превышает ударную вязкость для зарубежной стали в той же зоне почти на 80 %). Определены температуры хрупко-вязкого перехода для зон сварных соединений из российской S690QL. У зон наплавленного металла и термического влияния эта температура составила –40 °С. Во всех зонах сварного шва контрольных сварных соединений стали обоих производств обладают схожей микроструктурой. Твердость в исследуемых образцах имеет близкие значения и схожесть изменения по зонам сварных соединений. Полученные результаты могут быть использованы в машиностроении при сертификации и проектировании сварных конструкций прежде всего для арктической зоны.

**Ключевые слова:** высокопрочные конструкционные стали; хладостойкость; ударная вязкость; S690QL.

## STUDY OF THE MECHANICAL PROPERTIES AND THE MICROSTRUCTURE OF WELDED JOINTS MADE OF STRUCTURAL HIGH-STRENGTH STEELS S690QL OF RUSSIAN AND FOREIGN ORIGIN

© Andrey A. Galkin, Yuliya S. Mordovina\*, Maksim S. Anosov, Dmitriy A. Shatagin

R. E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, 24, ul. Minina, Nizhny Novgorod, 603155, Russia; \*e-mail: [ips4@nntu.ru](mailto:ips4@nntu.ru)

*Received August 27, 2023. Revised September 27, 2023. Accepted November 21, 2023.*

Steel S690QL is designed for welded heavy-loaded structures: lifting booms, traverses, trailers of heavy trucks, etc. We present the results of studying the mechanical properties and the microstructure of S690QL steel manufactured both in Russia and abroad, as well as the viscous properties of welded samples at different temperatures. The methods of atomic emission spectroscopy, tensile and impact strength tests, and microstructural analysis were used. Hardness was determined by the Vickers method. It is shown that the chemical composition of both grades of steel is almost identical. The values of the impact strength of samples made of domestic S690QL exceed those of foreign ones. This is especially true for metal that has not been subjected to welding processes (the impact strength for Russian steel S690QL in this zone was 200 J/cm<sup>2</sup> at –40°C, which exceeds the impact strength for foreign analogs in the same zone by almost 80%). The temperatures of brittle-viscous transition (BVT) for zones of welded joints made of Russian steel S690QL were determined. In the areas of welded metal deposit and heat affected zones the BVT temperature was –40°C. The microstructures of both steels are similar in all areas of the weld seam of control welded joints. The hardness in the studied samples of welded joints has similar values and similar

changes in the zones of welded joints. The results obtained can be used in mechanical engineering for certification and design of welded structures, primarily for the Arctic zone.

**Keywords:** high-strength structural steels; cold resistance; impact strength; steel S690QL.

Введение

В отечественном машиностроении ранее часто использовались зарубежные материалы. Так, для производства нагруженных деталей и механизмов (подъемников, кранов, стальных платформ, строительных машин, транспортных цистерн и др.) применялась сталь S690QL [1, 2]. Листовой горячекатаный прокат из S690QL характеризовался высокими показателями плоскостности, минимальными остаточными напряжениями и оптимальными механическими свойствами, что способствовало получению высокой точности на готовых изделиях после гибки.

В настоящее время разработан отечественный аналог S690QL, который можно использовать в широком диапазоне температур (от -70 до 300 °C) для изделий автомобилестроения, подъемно-транспортного машиностроения и др. Заметим, что прокат из высокопрочной стали с пределом текучести до 700 МПа может иметь ряд недостатков: зачастую он поставляется в напряженном состоянии, обладает высокой степенью анизотропии, могут быть отклонения по плоскостности, свойства металла в разных партиях могут различаться [3 – 5]. Это сказывается на последующих технологических операциях производства (гибка листов может сопровождаться образованием трещин и расслоением материала, при сварке также могут возникать трещины) [6, 7].

Цель работы — исследование механических свойств и микроструктуры стали S690QL отече-

ственного и зарубежного производства в сварных конструкциях.

Материалы, методика, оборудование

Исследовали образцы стали марки S690QL (EN 10025-6) зарубежного и российского производства. Для подготовки сварных проб использовали листы в состоянии поставки (закалка с прокатного нагрева с последующим отпуском по режиму поставщика). S690QL — конструкционная высокопрочная сталь ферритно-перлитного класса. Химический состав и механические свойства стали по нормативам представлены в табл. 1, 2. Отметим, что для отечественной S690QL ударная вязкость гарантируется только в продольном направлении.

Образцы для испытаний вырезали из сваренных встык контрольных пластин размером 350 × 150 × 14 мм. Сварку выполняли плавящимся электродом на оборудовании Fronius TransSteel 5000 сварочной проволокой ESAB OK AristoRod 69 по одинаковым технологическим режимам (табл. 3) при постоянном токе обратной полярности с подогревом и контролем межваликовой температуры (расход защитного газа 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub> — 15 – 18 л/мин).

Для испытания на ударный изгиб изготавливали образцы Шарпи с V-образным концентратором (ГОСТ 9454) (размер — 10 × 10 × 55 мм, высота сечения по линии надреза — 8 мм). Образцы вырезали из сваренных контрольных соединений в разных областях относительно сварного

Таблица 1. Химический состав стали S690QL российского и зарубежного производства

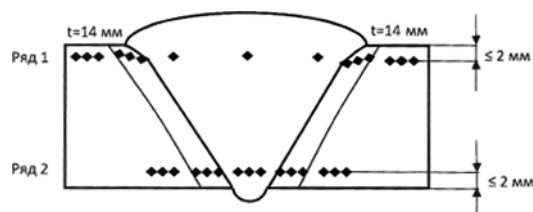
Table 1. Chemical composition of S690QL steel of Russian and foreign production

| Сталь           | Максимальное содержание химического элемента, % |      |     |       |      |     |      |     |      |      |      |      |
|-----------------|-------------------------------------------------|------|-----|-------|------|-----|------|-----|------|------|------|------|
|                 | C                                               | Si   | Mn  | P     | S    | Cr  | Mo   | Ni  | Cu   | Nb   | V    | Al   |
| S690QL          | 0,20                                            | 0,8  | 1,7 | 0,02  | 0,01 | 1,5 | 0,7  | 2,0 | 0,50 | 0,06 | 0,12 | 0,1  |
| S690QL (Россия) | 0,20                                            | 0,86 | 1,8 | 0,018 | 0,01 | 1,0 | 0,50 | 1,1 | 0,30 | 0,07 | 0,14 | 0,05 |

Таблица 2. Механические свойства стали S690QL российского и зарубежного производства

Table 2. Mechanical properties of S690QL steel of Russian and foreign production

| Сталь           | Предел текучести, МПа | Предел прочности, МПа | Относительное удлинение, % | Ударная вязкость KCV <sub>40</sub> , Дж/см <sup>2</sup> |                          |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------|
|                 |                       |                       |                            | в продольном направлении                                | в поперечном направлении |
| S690QL          | 690                   | 770 – 940             | 14                         | 37,5                                                    | 33,75                    |
| S690QL (Россия) | 690                   | 770 – 940             | 14                         | 80 — для толщин <40 мм<br>37,5 — для толщин ≥40 мм      | —                        |



**Рис. 1.** Схема определения твердости в сечении образцов  
**Fig. 1.** Scheme of hardness measurements in the cross section of samples

шва таким образом, чтобы для каждой из трех групп образцов концентратор попадал в зоны наплавленного металла (НМ), термического влияния (ТВ) и основного металла (ОМ).

Химический состав определяли методом эмиссионной атомной спектроскопии с помощью спектрометра Foundry-Master UVR. Испытания на растяжение (ГОСТ 1497) для определения соответствия механических свойств сталей их стандартам проводили без воздействия на них сварки, испытания на ударную вязкость (ГОСТ 9454) — на маятниковом копре МК-300 (диапазон температур — -80 – 20 °С, шаг — 20 °С). При определении температуры хрупко-вязкого перехода стали S690QL российского производства использовали значения ударной вязкости KCV. Для микроструктурного анализа образцы готовили стандартным способом, включающим шлифовку, полировку и химическое травление в 4 %-ном

спиртовом растворе HNO<sub>3</sub> [8]. Твердость измеряли по методу Виккерса (ISO 6507-1) с испытательными нагрузками 98,07 Н (HV10) на твердомере DuraVision20 (рис. 1).

**Обсуждение результатов**

В табл. 4, 5 приведены результаты химического анализа образцов и их фактические механические свойства (без воздействия сварки). В целом механические свойства сталей соответствуют стандартам, по которым они изготавливались.

Для исследуемых образцов рассчитывали фактические углеродные эквиваленты (Э<sub>ЭКВ</sub>). Для S690QL Э<sub>ЭКВ</sub> составил 0,513, для S690QL (Россия) — 0,474 % (по нормативу — до 0,65 и 0,55 % соответственно). Можно заключить, что теоретически образцы обладают практически одинаковой свариваемостью.

Результаты испытаний на ударный изгиб представлены на рис. 2.

Учитывая погрешности, можно заключить, что сварные соединения из сталей S690QL и S690QL (Россия) при -40 °С в зоне НМ имеют приблизительно одинаковую ударную вязкость. Для участков ОМ ударная вязкость (S690QL (Россия)) составляет около 200 Дж/см<sup>2</sup>, что превышает (более чем в 1,5 раза) значения для зарубежной стали в той же зоне. Следовательно, отечественная S690QL имеет более высокие вязкие свойства по сравнению со сталью зарубежного

**Таблица 3.** Режимы сварки контрольных пластин

**Table 3.** Welding modes for control plates

| Параметр сварки                            | Корень шва | Заполнение шва | Облицовочный шов |
|--------------------------------------------|------------|----------------|------------------|
| Напряжение <i>U</i> , В                    | 17,2       | 26,5           | 27,3             |
| Сила тока <i>I</i> , А                     | 123        | 250            | 277              |
| Скорость подачи проволоки <i>V</i> , м/мин | 3,3        | 7,8            | 9,0              |

**Таблица 4.** Фактический химический состав сталей

**Table 4.** Actual chemical composition of steels

| Сталь           | Максимальное содержание химического элемента, % |       |       |       |        |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------|-------------------------------------------------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 | C                                               | Si    | Mn    | P     | S      | Cr    | Mo    | Ni    | Cu    | Nb    | V     | Al    |
| S690QL          | 0,172                                           | 0,472 | 1,457 | 0,014 | 0,0006 | 0,045 | 0,004 | 0,026 | 0,015 | 0,026 | 0,001 | 0,018 |
| S690QL (Россия) | 0,160                                           | 0,340 | 1,250 | 0,010 | 0,001  | 0,280 | 0,220 | 0,030 | 0,050 | 0,020 | 0,003 | 0,040 |

**Таблица 5.** Фактические механические свойства сталей

**Table 5.** Actual mechanical properties of steels

| Сталь           | Предел текучести, МПа | Предел прочности, МПа | Относительное удлинение, % | Ударная вязкость KCV <sub>-40</sub> , Дж/см <sup>2</sup> |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------------------------------------|
| S690QL          | 768                   | 826                   | 17                         | 127,5                                                    |
| S690QL (Россия) | 790                   | 850                   | 17,5                       | 203,75                                                   |

производства. Однако по сечению сварного шва наблюдается перепад значений  $KCV$  в 2,7 раза, что может создавать градиенты напряжений при эксплуатации изделий и способствовать ускоренному разрушению.

Заметим, что значения ударной вязкости в зоне ТВ для S690QL (Россия) ниже нормативного показателя по собственному СТО на 6,25 %, но выше нормативного значения по ISO EN 10025-6 более чем на 120 %.

В табл. 6 для S690QL (Россия) представлены результаты испытаний на ударную вязкость в зависимости от температуры. Отметим, что, несмотря на схожесть поведения сталей ферритно-перлитного класса при понижении температуры, отечественная S690QL обладает большей хладостойкостью по сравнению, например, со сталями 09Г2С и 350 [9, 10].

Полученные данные показывают, что ударная вязкость в зонах НМ и ТВ ниже по сравнению с ОМ более чем в 2 раза. При этом изменение ударной вязкости ОМ в зависимости от температуры более плавное, чем в других зонах. Для зон НМ и ТВ можно выделить температуру хрупко-вязкого перехода, которая примерно составляет  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

При понижении температуры до  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  вязкая составляющая в изломе в зонах ТВ и НМ сварного соединения из S690QL (Россия) отсутствует, в то время как ОМ при той же температуре имеет ударную вязкость  $155\text{ Дж/см}^2$ .

На рис. 3 приведены микроструктуры сварных соединений, полученные с помощью металлографического анализа. Видно, что сталь S690QL мелкозернистая [11 – 13]. ОМ образцов представлен ферритными зернами с включениями сорбита отпуска. У S690QL границы зерен феррита менее четкие по сравнению с S690QL (Россия), а также прослеживаются следы полосчатости после проката.

Зона ТВ у исследуемых образцов имеет одинаковые структурные составляющие: зерна феррита с включениями троостосорбита. Выделяются границы бывшего зерна аустенита, размер которого составляет 35 (S690QL (Россия)) и 24 мкм (S690QL). Однако у S690QL наблюдаются признаки видмаштеттовой структуры.

Структурные составляющие зоны НМ для отечественной и зарубежной S690QL включают феррит и сфероидизированный сорбитообразный перлит. Зерна имеют направленность, параллельную теплоотводу, который был при кристаллизации после сварки. Однако у зарубежной S690QL отмечаются признаки ликвации, возникшей вследствие неравновесных условий охлаждения.

Результаты микроструктурного анализа свидетельствуют, что сварные образцы из S690QL

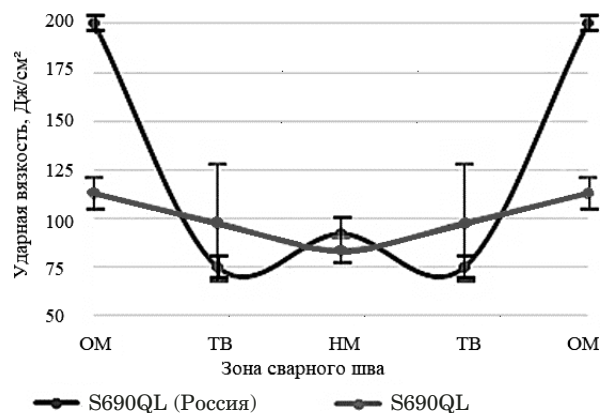


Рис. 2. Зависимости ударной вязкости образцов от зоны сварного шва

Fig. 2. Dependence of the impact strength of samples on the weld zone

(Россия) имеют меньше структурных дефектов, чем образцы из стали зарубежного производства. Это может говорить о стабильности структурообразования во время сварки при условии соблюдения технологии. Вместе с тем более крупное зерно в зоне ТВ может быть причиной снижения механических свойств отечественной стали, в частности, ударной вязкости при пониженных температурах [14 – 16].

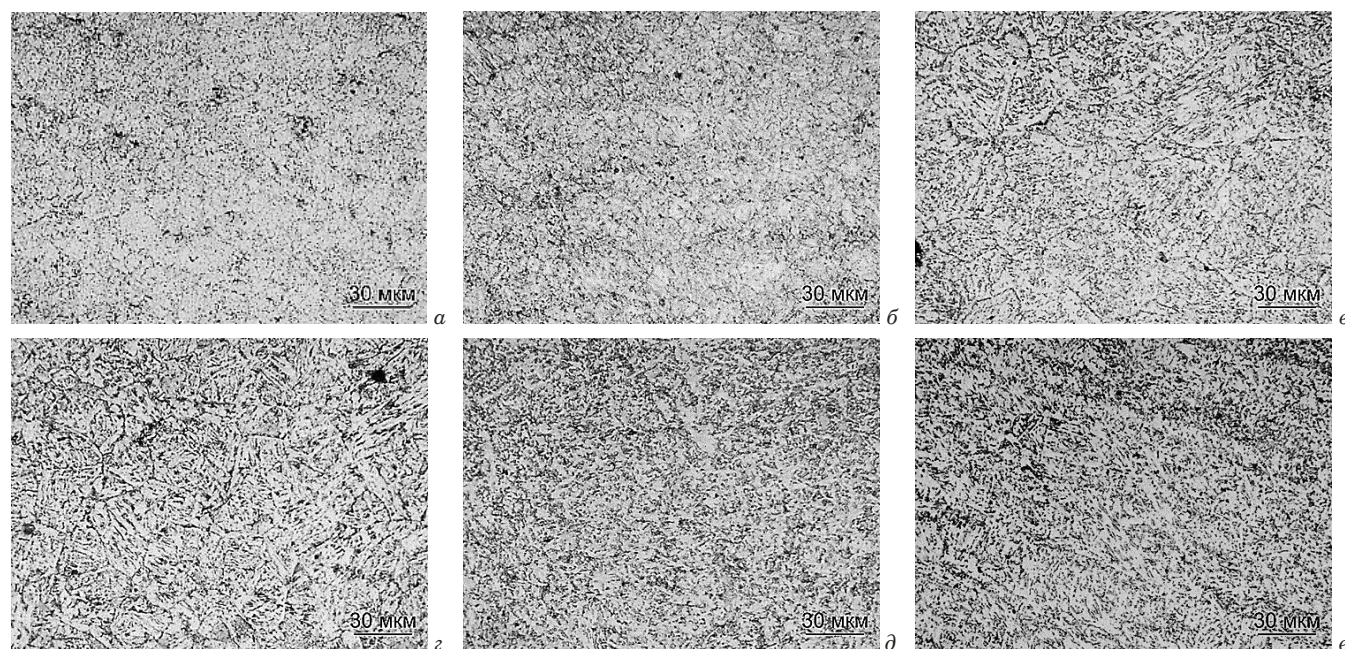
Результаты определения твердости образцов методом Виккерса в зависимости от зоны сварного соединения представлены на рис. 4.

Распределение твердости по сечению шва укладывается в теоретические рамки [17, 18]. Для S690QL (Россия) твердость сечения сварного соединения колеблется в пределах 230 – 250, для S690QL — 215 – 255 HV10. В случае отечественной стали значения твердости меняются более плавно, что положительно влияет на дальнейшую эксплуатацию из-за отсутствия больших градиентов. В зоне НМ значения твердости для исследуемых образцов ниже на 2 – 3 % по сравнению с твердостью ОМ. В зоне ТВ твердость у отечественной S690QL ниже относительно ОМ на 5, у зарубежной — на 15 %.

Таблица 6. Ударная вязкость  $KCV$ , Дж/см², сварных образцов из стали S690QL (Россия) в зависимости от температуры испытания

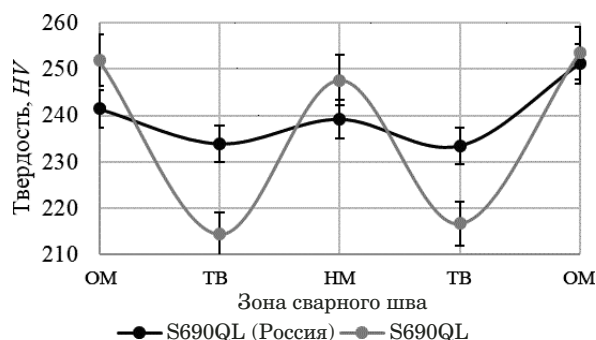
Table 6. Dependence of the impact strength  $KCV$ , J/cm² of welded samples made of S690QL steel (Russia) on the test temperature

| Зона сварного шва | Температура испытания, °C |       |       |     |
|-------------------|---------------------------|-------|-------|-----|
|                   | 20                        | -20   | -60   | -80 |
| НМ                | 130,6                     | 113,6 | 0     | 0   |
| ТВ                | 164,4                     | 120   | 0     | 0   |
| ОМ                | 253,9                     | 224,9 | 154,7 | 75  |



**Рис. 3.** Микроструктуры сварных соединений из S690QL (Россия) (а, в, д) и S690QL (б, з, е): а, б — ОМ; в, з — ТВ; д, е — НМ ( $\times 500$ )

**Fig. 3.** Microstructures of welded joints made of S690QL (Russia) (a, c, e) and S690QL (b, d, f): a, b — BM (base metal); c, d — HAZ (heat affected zone); e, f — WM (weld metal) ( $\times 500$ )



**Рис. 4.** Зависимости твердости образцов от зоны сварного шва

**Fig. 4.** Dependence of the hardness of samples on the weld zone

## Закключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что по нормативам образцы стали S690QL отечественного и зарубежного производства по химическому составу и углеродному эквиваленту отличаются между собой незначительно. Требования к механическим свойствам практически идентичны, за исключением направления проката при определении ударной вязкости. Фактический состав сталей, по данным химического анализа, также практически одинаков.

Бликие результаты испытаний на растяжение (ОМ) говорят о соответствии стандартам. Во всех зонах сварного шва контрольных сварных

соединений стали обладают схожей микроструктурой. При этом в зоне ТВ S690QL (Россия) отличается большей величиной зерен (практически на 45 % больше, чем у S690QL), что может оказывать влияние на ударную вязкость при пониженных температурах. Однако у зарубежной S690QL выявлены признаки видманштетта, что также негативно сказывается на ударной вязкости.

ОМ отечественной S690QL характеризуется более высокой (более 1,5 раза) ударной вязкостью по сравнению со сталью зарубежного производства. Ударная вязкость зон ТВ и НМ в сварном соединении для обеих сталей удовлетворяет нормативу ISO EN 10025-6. Вместе с тем значения ударной вязкости в зоне ТВ для S690QL (Россия) ниже нормативного показателя собственного СТО на 6,25 %, что, однако, может быть связано с погрешностью. Для S690QL (Россия) ударная вязкость в зонах НМ и ТВ ниже значений ударной вязкости ОМ в 2 раза. У зон НМ и ТВ можно выделить температуру хрупко-вязкого перехода ( $-40^{\circ}\text{C}$ ). Снижение температуры до  $-60^{\circ}\text{C}$  и ниже вызывает полностью хрупкое разрушение сварного соединения. В то же время ОМ при данной температуре имеет ударную вязкость  $155 \text{ Дж/см}^2$ .

Твердость в исследуемых образцах сварных соединений имеет близкие значения и схожесть изменения по зонам металла. Однако для зарубежной стали S690QL характерно более резкое изменение твердости в зависимости от зоны сварного шва.

S690QL (Россия) может выступать аналогом стали зарубежного производства по таким характеристикам, как химический состав, механические свойства при испытаниях на растяжение и ударную вязкость при  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  (ISO EN 10025-6). Для повышения и выравнивания механических свойств по сечению сварного соединения требуется проведение термической обработки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Arsić D., Lazić V., Nikolić R., et al. Application of the S690QL class steels in responsible welded structures / Mater. Eng. 2013. N 20. P. 174 – 183.
2. Mert T., Tümer M., Kerimak M. Investigations on Mechanical Strength and Microstructure of Multi-Pass Welded S690QL HSLA Steel Using MAG and FCAW / Praktische Metallographie. 2019. N 56. P. 634 – 654. DOI: 10.3139/147.110578
3. Родионова И. Г., Углов В. А., Зайцев А. И. и др. Разработка и освоение высококачественных экономичных автолистовых сталей нового поколения / Сталь. 2016. № 1. С. 46 – 54.
4. Недзвецкий М. Ю. Новые перспективные виды трубной продукции из высокопрочных (K80, X100), плакированных и криогенных сталей / Газовая промышленность. 2021. № S3(823). С. 40 – 45.
5. Ильин В. А., Ускова Т. В., Лукин Е. В. и др. Трансформация межрегиональных цепочек создания стоимости: проблемы и перспективы. — Вологда: ВолНИЦ РАН, 2021. — 244 с.
6. Овчинников В. В., Гуреева М. А. Сварочное производство. Сварочные материалы. Свойства сварных соединений. Дефекты. Т. 2. — Вологда: Инфра-инженерия, 2023. — 508 с.
7. Овчинников В. В. Контроль качества сварных швов и соединений. — Вологда: Инфра-инженерия, 2023. — 208 с.
8. Jovičević-Klug P., Lipovšek N., Jovičević K., Podgornik B. Optimized Preparation of Deep Cryogenic Treated Steel and Al-alloy Samples for Optimal Microstructure Imaging Results / Mater. Today Comm. 2021. Vol. 27. N 102211. P. 1 – 11. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2021.102211
9. Горицкий В. М., Силина Н. Г., Шнейдеров Г. Р. Механические свойства легких стальных тонколистовых конструкций / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 3. С. 55 – 60. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-3-55-60
10. Григорьев А. В., Лепов В. В. Оценка надежности металлоконструкций из стали 09Г2С, эксплуатируемых в условиях Севера и Арктики / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 8. С. 53 – 58. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-8-53-58
11. Celin R., Burja J., Kosce G. A comparison of as-welded and simulated heat affected zone (HAZ) microstructures / Mater. Technol. 2016. Vol. 50. N 3. P. 455 – 460. DOI: 10.17222/mit.2016.006
12. Oruc M., Imamović A., Gigović-Gekić A., Rimac M. Characteristics of the microstructure and grain size of S690QL steel in the hardened and tempered state / 14<sup>th</sup> Scientific Research Symposium “Metallic and nonmetallic materials”. — B&H, 2023. P. 105 – 110.
13. Weglowski M., Blacha S., Dymek S., Kopyscianski M. Electron Beam Welding of High Strength Quenched and Tempered Steel / Mater. Sci. Forum. 2016. Vol. 879. P. 2078 – 2083. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.879.2078
14. Мерсон Д. Л., Попова Л. И., Разуваев А. А. и др. Физика прочности и пластичности: лабораторный практикум. — Тольятти: ТГУ, 2021. — 91 с.
15. Zhao M., Wu H., Lu J., et al. Effect of grain size on mechanical property and corrosion behavior of a metastable austenitic stainless steel / Mater. Characterization. 2022. Vol. 194. N 112360. DOI: 10.1016/j.matchar.2022.112360
16. Kang C., Yoon J. Effect of Strain Localization on the Mechanical Properties from Nonuniform Grain Size Distribution of Ultralow Carbon Steel / Steel Res. Int. 2023. Vol. 94. N 2200335. DOI: 10.1002/srin.202200335
17. Щипачёв А. М., Самигуллин Г. Х. Технологическое обеспечение надежности нефтегазового оборудования. — СПб.: Лань, 2022. — 68 с.
18. Сидоров В. П., Моторин К. В., Короткова К. В. и др. Технология и оборудование сварки плавлением. — Тольятти: ТГУ, 2017. — 392 с.

## REFERENCES

1. Arsić D., Lazić V., Nikolić R., et al. Application of the S690QL class steels in responsible welded structures / Mater. Eng. 2013. N 20. P. 174 – 183.
2. Mert T., Tümer M., Kerimak M. Investigations on Mechanical Strength and Microstructure of Multi-Pass Welded S690QL HSLA Steel Using MAG and FCAW / Praktische Metallographie. 2019. N 56. P. 634 – 654. DOI: 10.3139/147.110578
3. Rodionova I. G., Uglov V. A., Zaitsev A. I., et al. A new generation of economical automotive steel / Stal. 2016. N 1. P. 46 – 54 [in Russian].
4. Nedzvetsky M. Yu. New prospective types of tubulars made of high-strength (K8, Kh100) clad and cryogenic steels / Gaz. Prom. 2021. N S3(823). P. 40 – 45 [in Russian].
5. Ilin V. A., Uskova T. V., Lukin E. V., et al. Transformation of interregional value chains: problems and prospects. — Vologda: VolNTs RAN, 2021. — 244 p. [in Russian].
6. Ovchinnikov V. V., Gureeva M. A. Welding production. Welding materials. Properties of welded joints. Defects. Vol. 2. — Vologda: Infra-Inzheneriya, 2023. — 508 p. [in Russian].
7. Ovchinnikov V. V. Quality control of welds and joints. — Vologda: Infra-Inzheneriya, 2023. — 208 p. [in Russian].
8. Jovičević-Klug P., Lipovšek N., Jovičević K., Podgornik B. Optimized Preparation of Deep Cryogenic Treated Steel and Al-alloy Samples for Optimal Microstructure Imaging Results / Mater. Today Comm. 2021. Vol. 27. N 102211. P. 1 – 11. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2021.102211
9. Goritsky V. M., Silina N. G., Shneyderov G. R. Characteristics of the resistance to brittle fracture of the elements of light steel thin-walled structures determined on samples with a sharp notch groove / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2020. Vol. 86. N 3. P. 55 – 60 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-8-53-58
10. Grigorev A. V., Lepov V. V. Estimation of the reliability of 09G2S steel structures operating in Arctic conditions / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2019. Vol. 85. N 8. P. 53 – 58 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-8-53-58
11. Celin R., Burja J., Kosce G. A comparison of as-welded and simulated heat affected zone (HAZ) microstructures / Mater. Technol. 2016. Vol. 50. N 3. P. 455 – 460. DOI: 10.17222/mit.2016.006
12. Oruc M., Imamović A., Gigović-Gekić A., Rimac M. Characteristics of the microstructure and grain size of S690QL steel in the hardened and tempered state / 14<sup>th</sup> Scientific Research Symposium “Metallic and nonmetallic materials”. — B&H, 2023. P. 105 – 110.
13. Weglowski M., Blacha S., Dymek S., Kopyscianski M. Electron Beam Welding of High Strength Quenched and Tempered Steel / Mater. Sci. Forum. 2016. Vol. 879. P. 2078 – 2083. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.879.2078
14. Merson D. L., Popova L. I., Razuvaev A. A., et al. Physics of strength and plasticity: laboratory workshop. — Tolyatti: TGU, 2021. — 91 p. [in Russian].
15. Zhao M., Wu H., Lu J., et al. Effect of grain size on mechanical property and corrosion behavior of a metastable austenitic stainless steel / Mater. Characterization. 2022. Vol. 194. N 112360. DOI: 10.1016/j.matchar.2022.112360
16. Kang C., Yoon J. Effect of Strain Localization on the Mechanical Properties from Nonuniform Grain Size Distribution of Ultralow Carbon Steel / Steel Res. Int. 2023. Vol. 94. N 2200335. DOI: 10.1002/srin.202200335
17. Shchepachev A. M., Samigullin G. Kh. Technological assurance of reliability of oil and gas equipment. — St. Petersburg: Lan', 2022. — 68 p. [in Russian].
18. Sidorov V. P., Motorin K. V., Korotkova K. V., et al. Melting welding technology and equipment. — Tolyatti: TGU, 2017. — 392 p. [in Russian].