



# МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 669.021

И.Ю. КУДЕЛКО

научный сотрудник лаборатории проблем надежности и металлоемкости карьерных автосамосвалов большой и особо большой грузоподъемности<sup>1</sup>

E-mail: samosvaloim@mail.ru

А.Г. СИДОРЕНКО, канд. техн. наук, доц.

заведующий лабораторией проблем надежности и металлоемкости карьерных автосамосвалов большой и особо большой грузоподъемности<sup>1</sup>

E-mail: samosvaloim@mail.ru

<sup>1</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 26.09.2024.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ ВАНАДИЕМ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ 10ХСНД И СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ЕЕ ОСНОВЕ

*Приведены результаты исследований влияния микролегирования ванадием на механические свойства, структуру и твердость низколегированной конструкционной стали 10ХСНД и сварного соединения на ее основе. Показано, что микролегирование ванадием этой стали приводит к повышению среднего значения пределов прочности и текучести, незначительному повышению относительного удлинения, ударной вязкости, а также изменению хода кривой растяжения. При этом регистрируется значительное повышение ударной вязкости образцов сварного соединения из стали 10ХСНД, микролегированной ванадием, их микротвердости по сравнению со сварными образцами из стали 10ХСНД в серийном исполнении. Изменений в микроструктуре как цельных, так и сварных образцов вследствие микролегирования ванадием не выявлено.*

**Ключевые слова:** низколегированная конструкционная сталь, сварное соединение, структура, механические свойства

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-1-70-74-79>

**Введение.** Сварные соединения, широко используемые при производстве мобильных машин, являются основным местом их усталостного и хрупкого разрушения.

Повышение прочности и надежности сварных соединений конструкций машин возможно путем микролегирования стали, за счет чего может быть достигнуто повышение прочностных характеристик как самой стали, так и сварных соединений на ее основе.

Результаты, полученные в рамках данной работы, дополняют исследования по влиянию скоростной электротермической обработки (СЭТО)

на структуру и твердость сварного соединения из низколегированной конструкционной стали [1], что позволяет прогнозировать повышение равнопрочности несущих конструкций мобильных машин.

Анализ имеющихся литературных данных [2–9] свидетельствует о том, что легирование (микролегирование) стали ванадием способствует получению мелкозернистой структуры, уменьшению склонности к перегреву, разупрочнению при отпуске, повышению износостойкости.

Ванадиевая сталь характеризуется хорошими литейными свойствами, лучше сваривается, чем

углеродистая сталь. Введение ванадия (0,05–0,10 %) в конструкционные стали повышает их прочность на 10–20 %, не уменьшая заметно пластичность и ударную вязкость. Лучшее сочетание механических свойств у таких сталей наблюдается при совместном легировании азотом (0,015–0,025 %) и ванадием (0,08–0,15 %) [10].

В соответствии с [11, 12], микролегирование стали ванадием приводит к повышению структурной и механической однородности границ зерен (равнопрочности границ зерен) стального материала и, как следствие, к уменьшению склонности стали к макролокализации пластической деформации и разрушению. В результате можно ожидать повышения равнопрочности как самой стали, так и сварных соединений на ее основе.

Целью работы является исследование влияния микролегирования ванадием на структуру и механические свойства конструкционной стали 10ХСНД и сварных соединений из нее.

В качестве объекта исследования использовались цельные образцы и образцы сварного соединения из стали 10ХСНД, микролегированной ванадием, а в качестве сравнения — аналогичные образцы из серийной стали 10ХСНД (ГОСТ 19281-2014) без добавок ванадия. Процесс сварки осуществлялся посредством сварочной проволоки Св-08Г2С диаметром 1,6 мм согласно инструкции СТБ ISO 15609-1-2009.

Исследования структуры и твердости сварного соединения осуществлялись в соответствии с ГОСТ 5639-82 и СТБ ИСО 9015-1-2023.

Металлографические исследования образцов со сварным соединением проводились на микроскопе Leica MEF 4A. Травление образцов с целью выявления структуры проводилось в 10-процентном водном растворе азотной кислоты. Для выявления зеренной структуры использовался пересыщенный водный раствор пикриновой кислоты с добавлением ПАВ.

Измерения твердости проводились на твердомере VMNT MOT при нагрузке на индентор 1,961 и 49,03 Н. Механические испытания проводились с использованием разрывной машины Quasar 600, копра Jmpact 450J.

На первом этапе исследований проводились сравнительные испытания цельных образцов из стали 10ХСНД в серийном исполнении и после микролегирования ванадием.

Для изготовления образцов применялся листовой прокат низколегированной стали 10ХСНД, микролегированной ванадием на уровне 0,08–0,10 %, производства АО «Уральская сталь» (г. Новотроицк, Российская Федерация). Для сравнения — аналогичный прокат стали в 10ХСНД в серийном исполнении без добавок ванадия по ГОСТ 19281-2014 (таблица 1).

Из результатов испытаний, приведенных в таблице 1, можно видеть, что микролегирование

Таблица 1 — Механические характеристики листового проката стали 10ХСНД в серийном исполнении и после микролегирования ванадием  
Table 1 — Mechanical characteristics of 10KhSND steel sheets in serial version and after vanadium microalloying

Механические свойства	Сталь 10ХСНД в серийном исполнении* (фактические значения)	Сталь 10ХСНД, микролегированная ванадием* (фактические значения)
Временное сопротивление разрыву $\sigma_b$ , МПа	600,1	682,8
Предел текучести $\sigma_t$ , МПа	464,8	567,2
Относительное удлинение $\delta$ , %	27,8	28,5
Ударная вязкость КСУ <sup>-70</sup> , Дж/см <sup>2</sup>	191,0	195,4
Ударная вязкость КСУ <sup>+20</sup> , Дж/см <sup>2</sup>	210,0	232,0

Примечание. \*Приведены средние значения по результатам испытаний трех образцов.

стали 10ХСНД ванадием приводит к повышению среднего значения пределов прочности и текучести на 13,7 и 22,0 % соответственно (в абсолютных значениях — на 82,7 и 102,4 МПа), а также к незначительному повышению относительного удлинения и ударной вязкости –70 °С и при +20 °С.

Отличительной особенностью поведения образцов из микролегированной ванадием стали 10ХСНД при механических испытаниях на растяжение является изменение характера деформирования при нагрузке, соответствующей переходу от упругой к упругопластической деформации. В частности, исчезает выраженная площадка текучести, по сравнению с образцами из стали 10ХСНД без добавок ванадия (рисунки 1–2).

Согласно [11–14], указанные эффекты определяются состоянием границ зерен материала, их структурной и механической однородностью, что свидетельствует о снижении склонности ванадиевой стали к макролокализации пластической деформации и разрушению.

На втором этапе работы проводились сравнительные исследования образцов сварного соеди-

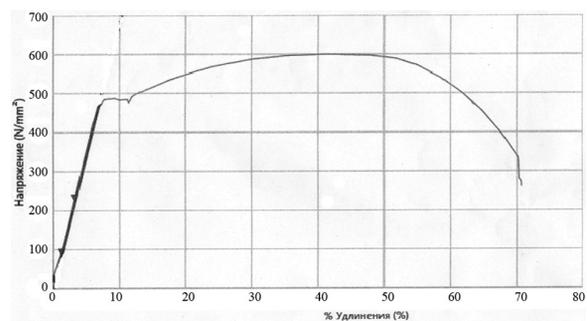


Рисунок 1 — Диаграмма растяжения образца из серийной стали 10ХСНД

Figure 1 — Tensile diagram of a sample made of 10KhSND serial steel

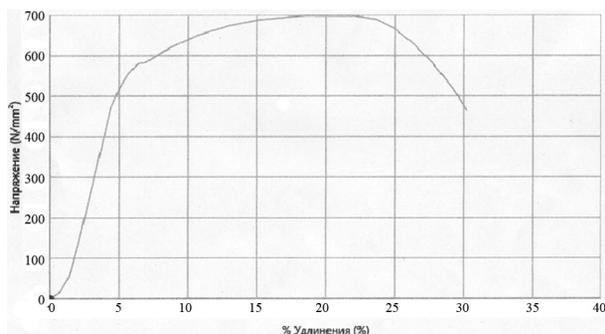


Рисунок 2 — Диаграмма растяжения образца из стали 10ХСНД, микролегированной ванадием  
Figure 2 — Tensile diagram of the sample made of 10KhSND steel microalloyed with vanadium

нения из листового проката стали 10ХСНД в серийном исполнении и после микролегирования ванадием.

Процесс сварки осуществлялся в автоматическом режиме на установке в условиях сварочного цеха ОАО «БЕЛАЗ» — управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ» с использованием сварочной проволоки Св-08Г2С диаметром 1,6 мм согласно инструкции СТБ ISO 15609-1-2009.

Результаты испытаний на ударный изгиб образцов со сварными соединениями из проката стали 10ХСНД в серийном исполнении и микролегированных ванадием представлены в таблицах 2, 3.

Из приведенного выше следует, что микролегирование ванадием приводит к значительному повышению сопротивления хрупкому разрушению при температуре  $-70$  °С: среднее значение величины ударной вязкости ( $KCU^{-70}$ ) для микролегированной стали составило  $81,9$  Дж/см<sup>2</sup>, что

Таблица 2 — Результаты испытаний на ударный изгиб образцов со сварным соединением из стали 10ХСНД в серийном исполнении  
Table 2 — Results of impact bending tests on welded joint samples made of 10KhSND steel in serial version

Образцы со сварным соединением из проката стали 10ХСНД в серийном исполнении	$KCU^{-70}$ , Дж/см <sup>2</sup>
Образец № 1	19,9
Образец № 2	10,6
Образец № 3	60,1

Таблица 3 — Результаты испытаний на ударный изгиб образцов со сварным соединением из стали 10ХСНД, микролегированной ванадием  
Table 3 — Results of impact bending tests on welded joint samples made of 10KhSND steel microalloyed with vanadium

Образцы со сварным соединением из проката стали 10ХСНД, микролегированной ванадием	$KCU^{-70}$ , Дж/см <sup>2</sup>
Образец № 1	101,3
Образец № 2	92,9
Образец № 3	51,5

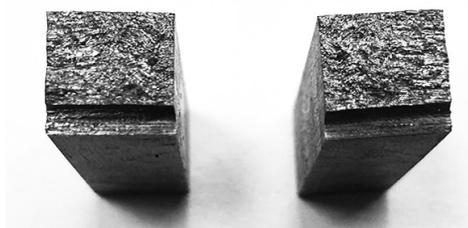


Рисунок 3 — Общий вид хрупкого излома образцов со сварным соединением из стали 10ХСНД серийного исполнения  
Figure 3 — General view of brittle fracture of the welded joint samples made of 10KhSND steel in serial version

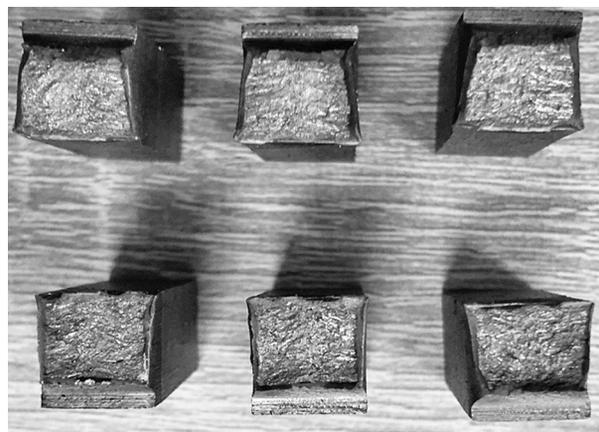


Рисунок 4 — Общий вид хрупкого излома образцов со сварным соединением из стали 10ХСНД, микролегированной ванадием  
Figure 4 — General view of brittle fracture of the welded joint samples made of 10KhSND steel microalloyed with vanadium

в 2,7 раза выше, чем  $KCU^{-70}$  для стали без добавок ванадия —  $30,2$  Дж/см<sup>2</sup>.

На рисунке 3 приведен общий вид хрупкого излома образцов со сварным соединением из стали 10ХСНД в серийном исполнении, на рисунке 4 — микролегированной ванадием.

Можно видеть, что излом образцов стали, микролегированной ванадием, отличается темным, матовым строением с большей долей вязкого излома по сравнению с более светлыми, блестящими фасетками скола кристаллического строения для их серийного исполнения.

Результаты испытаний на статическое растяжение образцов со сварными соединениями из серийной стали 10ХСНД и после микролегирования ванадием представлены в таблицах 4, 5 и на рисунках 5, 6.

Таблица 4 — Результаты испытаний на статическое растяжение образцов со сварным соединением из стали 10ХСНД в серийном исполнении  
Table 4 — Results of static tensile tests on welded joint samples made of 10KhSND steel in serial version

Разрушающая нагрузка $P_{max}$ , Н	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	Место разрыва
275 200	550,4	$\sigma_{Bcp} = 549,7$
274 500	549,0	

Таблица 5 — Результаты испытаний на статическое растяжение образцов со сварным соединением из стали 10ХСНД, микролегированной ванадием  
 Table 5 — Results of static tensile tests on welded joint samples made of 10KhSND steel microalloyed with vanadium

Разрушающая нагрузка $P_{max}$ , Н	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	Место разрыва
328 500	631,7	$\sigma_{Bcp.} = 638,5$ Сварной шов
319 300	645,2	



Рисунок 5 — Общий вид разрушенных после растяжения образцов со сварным соединением из стали 10ХСНД, микролегированных ванадием

Figure 5 — General view of fractured welded joint samples made of 10KhSND steel microalloyed with vanadium after tensile strength

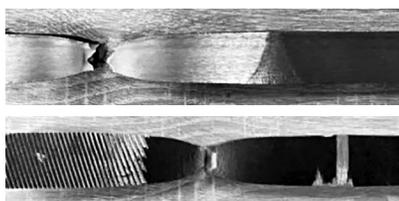


Рисунок 6 — Общий вид разрушенных после растяжения образцов со сварным соединением из стали 10ХСНД в серийном исполнении

Figure 6 — General view of fractured welded joint samples made of 10KhSND steel in serial version after tensile strength

Анализ результатов испытаний на статическое растяжение образцов со сварным соединением из стали 10ХСНД в серийном исполнении и микролегированной ванадием позволяет сделать вывод, что микролегирование стали ванадием приводит к повышению среднего значения предела прочности на 13,9 % и смещению зоны разрушения от основного металла в зону сварного шва.

На рисунке 7 представлен общий вид макрошлифа образца сварного соединения с нанесенными характерными зонами сварки, линиями и точками замеров микротвердости.

Результаты измерений значений твердости по характерным зонам сварного соединения образцов из стали 10ХСНД в серийном исполнении и после микролегирования ванадием приведены в таблицах 6, 7.

Анализ результатов исследований показывает, что сварное соединение из стали 10ХСНД,

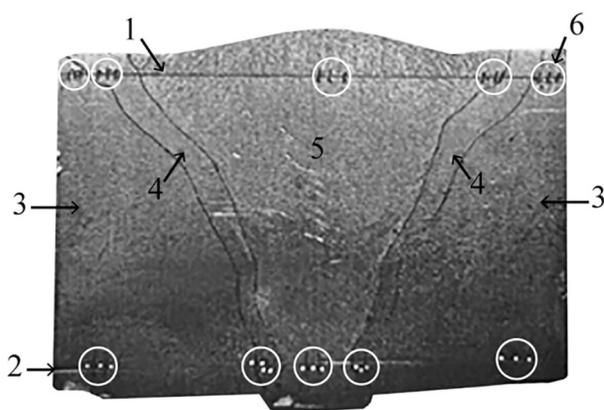


Рисунок 7 — Общий вид металлографического шлифа сварного соединения из стали 10ХСНД с расположением зон сварки, линий и точек замеров микротвердости: 1, 2 — линии замеров микротвердости; 3 — основной металл; 4 — зона термического влияния; 5 — сварной шов; 6 — точки замеров микротвердости

Figure 7 — General view of the metallographic slip of the welded joint made of 10KhSND steel with the location of welding zones, lines and points of microhardness measurements: 1, 2 — hardness measurement lines; 3 — base metal; 4 — heat affected zone; 5 — welded seam; 6 — microhardness measurement points

Таблица 6 — Результаты измерения микротвердости характерных зон образца сварного соединения из стали 10ХСНД в серийном исполнении  
 Table 6 — Results of measuring microhardness of characteristic zones of the welded joint sample made of 10KhSND steel in serial version

ОМ	ЗТВ	СШ	ЗТВ	ОМ
1 линия HV5				
200	222	230	232	198
199	225	214	235	190
194	228	222	225	189
2 линия HV5				
180	199	228	222	196
183	209	220	230	197
187	225	221	221	196

Таблица 7 — Результаты измерения микротвердости характерных зон образца сварного соединения из стали 10ХСНД, микролегированной ванадием  
 Table 7 — Results of measuring microhardness of characteristic zones of the welded joint made of 10KhSND steel microalloyed with vanadium

ОМ	ЗТВ	СШ	ЗТВ	ОМ
1 линия HV5				
242	256	275	270	293
244	247	311	270	273
245	245	267	271	283
2 линия HV5				
251	204	236	229	260
261	214	231	220	267
256	227	240	225	268

микролегированной ванадием, отличается более высокими значениями твердости во всех его характерных зонах по сравнению со сталью 10ХСНД без добавок ванадия. При этом для об-

разца из стали с ванадием у корня шва наблюдаются более низкие величины микротвердости в зонах сварного шва по сравнению с основным металлом, что не характерно для стали 10ХСНД без добавок ванадия.

По результатам исследований микроструктуры двух видов стали 10ХСНД существенных отличий не установлено. Микроструктура сварного шва — столбчатые кристаллы, основного металла — феррито-перлитная, балл зерна № 9 по шкале ГОСТ 5639-82.

**Заключение.** Установлено, что микролегирование ванадием конструкционной стали 10ХСНД приводит к повышению среднего значения пределов прочности и текучести стали на 13,7 и 22 % соответственно, а также к незначительному увеличению относительного удлинения и ударной вязкости при  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Отличительной особенностью поведения стали 10ХСНД, микролегированной ванадием, является изменение хода кривой растяжения на пределе текучести: исчезает или значительно уменьшается длина площадки текучести, что свидетельствует о снижении склонности материала к макролокализации пластической деформации и разрушению.

Для образцов сварного соединения из стали 10ХСНД с ванадием наблюдается повышение среднего значения предела прочности на 13,9 % при резком росте величины ударной вязкости при  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При этом само сварное соединение отличается более высокими значениями микротвердости во всех его зонах по сравнению с серийной сталью 10ХСНД, за исключением корня шва, где наблюдаются более низкие величины твердости по сравнению с основным металлом, что не характерно для стали 10ХСНД без добавок ванадия.

По результатам исследований микроструктуры образцов из стали 10ХСНД с ванадием и серийной стали существенных отличий не выявлено: микроструктура сварного шва — столбчатые кристаллы, основного металла — феррито-перлитная, балл зерна № 9 по шкале ГОСТ 5639-82.

## Список литературы

1. Исследование влияния скоростной электротермической обработки на структуру сварного соединения из низко-

1. легированной конструкционной стали / И.Ю. Куделко, А.Г. Сидоренко, И.И. Вегера, А.В. Зизико // Механика машин, механизмов и материалов. — 2024. — № 2(67). — С. 61–68. — DOI: doi.org/10.46864/1995-0470-2024-2-67-61-68.
2. Role of vanadium in microalloyed steel / R. Lagneborg, T. Siwecki, S. Zajac, V. Hutchinson // Scandinavian Journal of Metallurgy. — 1999. — Vol. 28, iss. 5. — P. 186–241.
3. Голиков, И.Н. Ванадий в стали / И.Н. Голиков, М.И. Гольдштейн, И.И. Мурзин. — М.: Металлургия, 1968. — 291 с.
4. Упрочнение конструкционных сталей / М.И. Гольдштейн, А.В. Гринь, Э.Э. Блюм, Л.М. Панфилова. — М.: Металлургия, 1970. — 224 с.
5. Гольдштейн, М.И. Дисперсионное упрочнение стали / М.И. Гольдштейн, В.М. Фарбер. — М.: Металлургия, 1979. — 208 с.
6. Филиппенков, А.А. Разработка ванадийсодержащих сталей и высокоэффективных технологий их производства с целью повышения долговечности литых деталей в машиностроении и металлургии: дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.04 / А.А. Филиппенков. — Екатеринбург, 2002. — 372 с.
7. Определение технологических свойств низколегированных сталей / А.В. Богомолов, П.О. Быков, Н.К. Кулумбаев, Ж.Т. Батталов // Наука и техника Казахстана. — 2012. — № 1–2. — С. 41–45.
8. Технология ванадийсодержащих ферросплавов / В.П. Зайко, В.И. Жучков, Л.И. Леонтьев [и др.]. — М.: Академкнига, 2004. — 515 с.
9. Ровнушкин, В.А. Легирование стали промежуточными продуктами ванадиевого передела / В.А. Ровнушкин, Л.А. Смирнов // Проблемы производства и применения стали с ванадием: материалы междунар. науч.-технич. семинара, г. Екатеринбург, 26–27 сент. 2006 г. / ГНЦ РФ ОАО «Уральский институт металлов»; редкол.: Л.А. Смирнов (отв. ред.) [и др.]. — Екатеринбург, 2007. — С. 95–120.
10. Бекенов, Д.К. Влияние вводимого ванадия на свойства стали / Д.К. Бекенов, С.Р. Масакбаева // Наука и техника Казахстана. — 2020. — № 3. — С. 67–73.
11. Моисеенко, В.И. Основы структурной равнопрочности стали и элементов крупногабаритных деталей машин / В.И. Моисеенко, П.Л. Мариев. — Минск: Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси, 1999. — 200 с.
12. Мариев, П.Л. Повышение конструкционной равнопрочности крупногабаритных деталей и сварных узлов карьерных самосвалов / П.Л. Мариев. — Минск: Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси, 2001. — 180 с.
13. Криштал, М.М. Неустойчивость и мезоскопическая неоднородность пластической деформации (аналитический обзор). Часть 1. Феноменология зуба текучести и прерывистой текучести / М.М. Криштал // Физическая мезомеханика. — 2004. — Т. 7, № 5. — С. 5–29.
14. Криштал, М.М. Неустойчивость и мезоскопическая неоднородность пластической деформации (аналитический обзор). Часть 2. Теоретические представления о механизмах неустойчивости пластической деформации / М.М. Криштал // Физическая мезомеханика. — 2004. — Т. 7, № 5. — С. 31–45.

## KUDELKO Igor U.

Researcher of the Laboratory of Reliability Problems and Metal Intensity of High and Extra-High Capacity Dump Trucks of the R&D Center “Mining Machinery”<sup>1</sup>  
E-mail: samosvaloim@mail.ru

## SIDORENKO Aleksandr G., Ph. D. in Eng.

Head of the Laboratory of Reliability Problems and Metal Intensity of High and Extra-High Capacity Dump Trucks of the R&D Center “Mining Machinery”<sup>1</sup>  
E-mail: samosvaloim@mail.ru

<sup>1</sup>Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

## STUDY OF THE INFLUENCE OF VANADIUM MICROALLOYING ON THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF STRUCTURAL STEEL 10XCHД (10KhSND) AND WELDED JOINTS ON ITS BASIS

The results of research of vanadium microalloying effect on mechanical properties, structure and hardness of low-alloyed structural steel 10XCHД (10KhSND) and a welded joint on its basis are presented. It is shown that vanadium microalloying of the steel leads to an increase in the average value of strength limit and yield strength, insignificant increase in relative elongation, impact strength, as well as a change in the course of the tensile curve. At the same time, a significant increase in the impact strength of samples of welded joints made of 10KhSND steel, microalloyed with vanadium, and their microhardness compared with welded samples made of 10KhSND steel in serial version is recorded. There were no changes in the microstructure of both solid and welded samples due to vanadium microalloying.

**Keywords:** low-alloyed structural steel, welded joint, structure, mechanical properties

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-1-70-74-79>

### References

- Kudelko I.U., Sidorenko A.G., Wegera I.I., Ziziko A.V. Issledovanie vliyaniya skorostnoy elektrotermicheskoy obrabotki na strukturu svarnogo soedineniya iz nizkolegированной konstrukционной стали [Investigation of the effect of high-speed electrothermal treatment on the structure of a welded joint made of low-alloy structural steel]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2024, no. 2(67), pp. 61–68. DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-2-67-61-68> (in Russ.).
- Lagneborg R., Siwecki T., Zajac S., Hutchinson B. Role of vanadium in microalloyed steel. *Scandinavian journal of metallurgy*, 1999, vol. 28, iss. 5, pp. 186–241.
- Golikov I.N., Goldshteyn M.I., Murzin I.I. *Vanadiy v stali* [Vanadium in steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1968. 291 p. (in Russ.).
- Goldshteyn M.I., Grin A.B., Blyum E.E., Panfilova L.M. *Uprochnenie konstruktsionnykh staley* [Strengthening of structural steels]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970. 224 p. (in Russ.).
- Goldshteyn M.I., Farber V.M. *Dispersionnoe uprochnenie stali* [Dispersion strengthening of steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979. 208 p. (in Russ.).
- Filippenkov A.A. *Razrabotka vanadiysoderzhashchikh staley i vysokoeffektivnykh tekhnologiy ikh proizvodstva s tselyu povysheniya dolgovechnosti litykh detaley v mashinostroenii i metallurgii*. Diss. d-ra tekhn. nauk [Development of vanadium-containing steels and highly efficient technologies of their production in order to increase the durability of cast parts in mechanical engineering and metallurgy. D. Sc. Thesis]. Ekaterinburg, 2002. 372 p. (in Russ.).
- Bogomolov A.V., Bykov P.O., Kulumbayev N.K., Battalov Zh.T. *Opreделение tekhnologicheskikh svoystv nizkolegированных staley* [Identification of technological properties of the low-alloyed steels]. *Science and technology of Kazakhstan*, 2012, no. 1–2, pp. 41–45 (in Russ.).
- Zayko V.P., Zhuchkov V.I., Leontev L.I., Karnoukhov V.N., Voronov Yu.I. *Tekhnologiya vanadiysoderzhashchikh ferrosplavov* [Technology of vanadium-containing ferroalloys]. Moscow, Akademkniga Publ., 2004. 515 p. (in Russ.).
- Rovnushkin V.A., Smirnov L.A. Legirovanie stali promezhutochnymi produktami vanadievogo peredela [Steel alloying as intermediate products of vanadium conversion]. *Materialy mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo seminar "Problemy proizvodstva i primeneniya stali s vanadiem"* [Proc. international scientific and technical seminar "Problems of production and application of steel with vanadium"]. Yekaterinburg, 2007, pp. 95–120 (in Russ.).
- Bekenov D.K., Masakbaeva S. R. *Vliyanie vvodimogo vanadiya na svoystva stali* [Influence of administered vanadium on the properties of steel]. *Science and technology of Kazakhstan*, 2020, no. 3, pp. 67–73 (in Russ.).
- Moiseenko V.I., Mariev P.L. *Osnovy strukturnoy ravnoproschnosti stali i elementov krupnogabaritnykh detaley mashin* [Basics of structural equal strength of steel and elements of large-size machine parts]. Minsk, Institut tekhnicheskoy kibernetiki NAN Belarusi Publ., 1999. 200 p. (in Russ.).
- Mariev P.L. *Povyshenie konstruktsionnoy ravnoproschnosti krupnogabaritnykh detaley i svarnykh uzlov karernykh samovalov* [Increase of structural equal strength of large-size parts and welded assemblies of dump trucks]. Minsk, Institut tekhnicheskoy kibernetiki NAN Belarusi Publ., 2001. 180 p. (in Russ.).
- Krishtal M.M. *Neustoychivost i mezoskopicheskaya neodnorodnost plasticheskoy deformatsii (analiticheskiy obzor). Chast 1. Fenomenologiya zuba tekuchesti i preryvistoy tekuchesti* [Unsteadiness and mesoscopic heterogeneity of plastic deformation (analytical review). Part 1. Phenomenology of yield tooth and discontinuous yielding]. *Physical mesomechanics*, 2004, vol. 7, no. 5, pp. 5–29 (in Russ.).
- Krishtal M.M. *Neustoychivost i mezoskopicheskaya neodnorodnost plasticheskoy deformatsii (analiticheskiy obzor). Chast 2. Teoreticheskie predstavleniya o mekhanizmax neustoychivosti plasticheskoy deformatsii* [Unsteadiness and mesoscopic heterogeneity of plastic deformation (analytical review). Part 2. Theoretical ideas about the mechanisms of plastic deformation instability]. *Physical mesomechanics*, 2004, vol. 7, no. 5, pp. 31–45 (in Russ.).