

ВПЛИВ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ СТАЛІ МАГІСТРАЛЬНИХ ТА ПРОМИСЛОВИХ ТРУБОПРОВОДІВ НА ЯКІСТЬ ЗВАРЮВАННЯ

Р.Т. Мартинюк¹, О.Т. Чернова²

¹к.т.н, доцент кафедри транспортування та зберігання енергоносіїв,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-
Франківськ, Україна

ORCID ID: 0009-0000-0309-6587

²к.т.н, доцент кафедри транспортування та зберігання енергоносіїв,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-
Франківськ, Україна

ORCID ID: 0000-0002-6424-7569

Анотація

Вступ. В даний час велика увага приділяється якості спорудження та ремонту трубопроводів. Питання якості зварювання вважається одним з найважливіших в даному напрямку. Першочерговими завданнями при зварюванні є: грамотний вибір технологічного оснащення; вибір методу зварювання та методика підготовки під зварювання. Основним завданням всіх видів зварювання є якісне виконання зварювання неповоротних стиків труб. Головна проблема зварювання неповоротних стиків труб полягає в тому, що при зварюванні постійно змінюється просторове положення зварювальної ванни. На зварювальну ванну в кожному положення діють різні сили. Це ускладнює завдання формування кореневого та наступних шарів шва у зв'язку з виникненням пропалів, напливів та інших дефектів. Для прискорення процесу зварювання неповоротних стиків труб та отримання якісно виконаного зварного з'єднання широко застосування отримали механізовані методи зварювання. **Мета.** Дана стаття розширює аналіз впливу ключових елементів хімічного складу сталей на якість їх зварних з'єднань. **Результати.** У праці проаналізовано дослідження науковців, які стверджують, що хімічний склад сталі магістральних та промислових трубопроводів суттєво впливає на якість зварювання. Це визначається вмістом основних легуючих елементів та шкідливих домішок, які впливають на формування структури металу шва та зони термічного впливу, а також на схильність до утворення дефектів. **Висновки.** 1. Хімічний склад сталі є визначальним фактором її зварюваності та, відповідно, якості зварних швів. Різноманітні хімічні елементи по-різному впливають на процес зварювання, схильність до утворення дефектів і кінцеві механічні властивості зварного з'єднання. 2. Встановлено, що вплив хімічного складу сталі магістральних та промислових трубопроводів на якість зварювання є критично важливим. Хімічний склад сталі, з якої виготовлені труби, безпосередньо впливає на її зварюваність, визначаючи ризик виникнення дефектів та механічні властивості зварного шва.

Ключові слова: зварювання, домішки, зварне з'єднання, кореневий шар зварного шва, зварювальне обладнання.



INFLUENCE OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF STEEL OF MAIN
AND INDUSTRIAL PIPELINES ON WELDING QUALITY

R.T. Martynyuk¹, O.T. Chernova²

¹PhD, Associate Professor, Department of Transportation and Storage of Energy Carriers,
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ukraine
ORCID ID: 0009-0000-0309-6587

²PhD, Associate Professor, Department of Transportation and Storage of Energy Carriers,
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-6424-7569

Summary

Introduction. At present, considerable attention is being paid to the quality of pipeline construction and repair. The quality of welding is considered one of the most important issues in this field. The primary tasks in welding include the proper selection of technological equipment, the choice of a welding method, and the procedure for joint preparation prior to welding. The main objective of all welding processes is to ensure high-quality welding of non-rotatable pipe joints. The main problem in welding non-rotatable pipe joints lies in the fact that the spatial position of the weld pool continuously changes during welding. Different forces act on the weld pool in each position, which complicates the formation of the root pass and subsequent weld layers due to the occurrence of burn-throughs, overlaps, and other defects. To accelerate the welding process of non-rotatable pipe joints and to obtain high-quality welded joints, mechanized welding methods have been widely adopted. **Purpose.** This article expands the analysis of the influence of key elements of the chemical composition of steels on the quality of their welded joints. **Results.** The paper analyzes studies conducted by researchers who argue that the chemical composition of steels used for mainline and industrial pipelines significantly affects welding quality. This is determined by the content of major alloying elements and harmful impurities, which influence the formation of the weld metal and heat-affected zone microstructure, as well as the susceptibility to defect formation. **Conclusions.** 1. The chemical composition of steel is a determining factor in its weldability and, consequently, in the quality of welded seams. Various chemical elements affect the welding process, the tendency to defect formation, and the final mechanical properties of the welded joint in different ways. 2. It has been established that the influence of the chemical composition of steels used for mainline and industrial pipelines on welding quality is critically important. The chemical composition of the steel from which the pipes are manufactured directly affects their weldability, determining the risk of defects and the mechanical properties of the weld seam.

Key words: welding, impurities, welded joint, root pass of the weld seam, welding equipment.

Вступ.

Хімічний склад сталі, з якої виготовлені трубопроводи, є одним із найважливіших чинників, що визначають її зварюваність (здатність утворювати якісне зварне з'єднання). Теоретичні та практичні результати досліджень науковців свідчать про прямий зв'язок між вмістом в сталях легованих елементів та ризиком виникнення дефектів.

Сучасні високоміцні сталі, які використовуються для магістральних та промислових трубопроводів є термічно і механічно обробленими низьковуглецевими сталями. При виготовленні труб з низьковуглецевих сталей передбачають низький вміст сірки та фосфору для того, щоб мінімізувати ризик утворення гарячих тріщин і забезпечити механічні властивості зварного шва. Низький вміст вуглецю забезпечує добру зварюваність і знижує схильність до тріщиноутворення. Введення до складу сталі в мінімальній кількості легованих елементів (менше 0,1 %) проводять з метою покращення їх механічних властивостей, таких як міцність і в'язкість. Результат впливу легованих елементів полягає в тому, що процес зварювання повинен бути чітко адаптований під хімічний склад сталі трубопроводу, щоб гарантувати отримання зварного з'єднання з необхідними експлуатаційними характеристиками. Для проведення якісного зварювання необхідно проводити контроль за технологічними процесами (попередній підігрів або прогрів) та використання зварювальних матеріалів, що забезпечують необхідний хімічний склад і механічні властивості наплавленого металу.

Формулювання цілей статті. За допомогою аналізу та систематизації впливу ключових елементів хімічного складу сталей (вуглецю, марганцю, кремнію, хрому, молібдену, нікелю тощо) проаналізувати необхідний взаємозв'язок між хімічним складом сталей трубопроводів і якістю зварних швів [2].

Наукова новизна дослідження полягає у аналізі існуючих моделей, що описують кількісний вплив легованих елементів на показники якості зварювання; детальний аналіз кінетики фазових та структурних перетворень у металі шва; виявлення закономірностей, які стосуються деградації зварних з'єднань трубопроводів довготривалої експлуатації.

Виклад основного матеріалу.

Зварювання металу залежить від його хімічних та фізичних властивостей, кристалічної решітки сталі, наявності домішок. Хімічний склад сталі, з якої виготовлені магістральні та промислові трубопроводи, є визначальним фактором надійності зварних з'єднань. Леговані елементи впливають на формування мікроструктури зварного з'єднання. Найбільш важливий легований елемент – вуглець. Добру зварюваність забезпечує вміст вуглецю в межах від 0,22 % до 0,25 %. Зі збільшенням вмісту вуглецю збільшується міцність і твердість сталі, але знижується її пластичність [3].

Показником зварюваності є еквівалентний вміст вуглецю в сталі. В залежності від еквівалентного вмісту вуглецю зварювання поділяють на чотири групи: добре, задовільне, обмежене та погане. Еквівалентний вміст вуглецю визначаємо за формулою

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2}, \quad (1.1)$$

де C , Mn , Cr , Ni , Cu , P – леговані елементи у металі шва.

Еквівалент розміру вуглецю визначаємо за формулою

$$C_p = 0,005 \cdot \delta \cdot C_e, \quad (1.2)$$

де δ – товщина стінки трубопроводу.

Температуру, необхідну для нагрівання зварного з'єднання визначаємо за формулою

$$T_n = 350 \cdot \sqrt{\sum C_e - 0,25} \quad (1.3)$$

Крім того, на зварюваність впливає вміст в сталі легованих елементів, таких як марганцю, кремнію, сірки та фосфору. Марганець та кремній – типові розкислювачі. Марганець покращує пластичність і знижує ймовірність утворення гарячих тріщин. Кремній підвищує плинність металу під час зварювання, але, водночас, високий вміст кремнію може привести до утворення газових пор, а високий вміст марганцю може посилювати схильність до загартування сталі.

Сірка та фосфор – шкідливі домішки, які при перевищенні норми погіршують зварюваність. Оптимальний вміст сірки повинний бути в межах від 0,025 % до 0,04 %, а фосфору від 0,035 % до 0,030 %. Вміст більшого відсотку сірки сприяє утворенню сульфідів заліза. Це викликає утворення гарячих тріщини в зварному шві. При перевищенні фосфору збільшується крихкість металу та знижується ударна в'язкість [5].

Леговані елементи, такі як кремній, нікель, молібден та титан додають в сталь з метою підвищення міцності та корозійної стійкості сталі. Для виготовлення сучасних трубопровідних систем використовують низьковуглецеві леговані сталі з контрольованим вмістом легованих елементів. Це дає змогу досягнути високу міцність сталі та забезпечити добру зварюваність зварного шва.

Для деталізації зварного з'єднання розглянемо його тепловий цикл (рисунок 1).

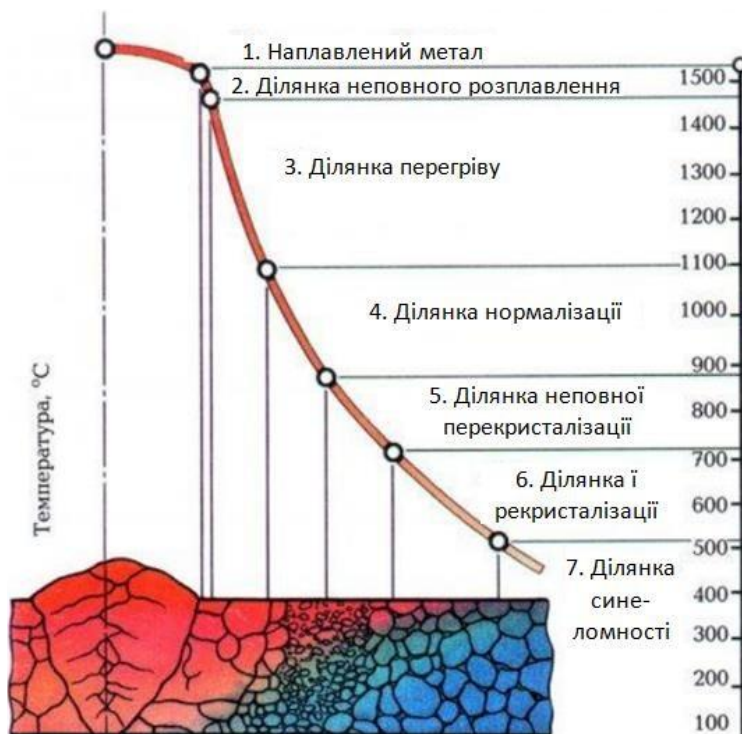


Рис. 1. Тепловий цикл зварного з'єднання

Кожен метал складається з зерен, яких можна бачити на зламі. У металі розрізняють макро- та мікроструктуру. Макроструктуру можна побачити неозброєним оком, а мікроструктуру вивчають зі збільшенням від 60 до 100 раз під мікроскопом.

На ділянці 1 наплавлений метал знаходиться в розплавленому стані, який має структуру зі стовпчастих кристалів. Це несприятливо позначається на зварному шві де відбувається зниження міцності та пластичності металу. Зона термічного впливу складається з кількох ділянок, які відрізняються між собою формою та будовою зерна. Ці відмінності викликані різною температурою нагріву (до 1530 °С). Ширина 1 ділянки становить половину ширини зварного шва. На 2 ділянці під час зварювання відбувається нагрівання та перехід від основного до наплавленого металу, а також зростання зерен. Межа сплавлення є вузькою від 0,1 до 0,4 мм, тому дана ділянка є найслабшим місцем зварного з'єднання, з температурою від 1470 до 1470 °С. Ділянка 3 – область основного металу, що нагрівається до температури від 1100 до 1470 °С. Метал має крупнозернисту структуру. Чим більша зона нагрівання тим більше зерно та нижче механічні властивості. Ширина даної ділянки від 3 до 4 мм. На ділянці нормалізації 4 метал нагрівається від 880 до 1100 °С. Процес перекристалізації металу відбувається без перегрівання та з утворенням дрібнозернистої структури. Ширина 4 ділянки становить від 0,2 до 0,4 мм. 5 – ділянка неповної перекристалізації. Причина неповної перекристалізації – недостатня температура нагріву. Структура цієї ділянки складається з дрібних зерен, а ширина від 0,1 до 0,3 мм. В порівнянні з 4 ділянкою, метал цієї ділянки має нижчі механічні властивості. Ділянка рекристалізації 6. Метал у цій зоні нагрівається до температури 720 °С. Як наслідок, відбувається зростання зерна металу, структура стає грубішою. Ширина ділянки – від 0,1 до 1,5 мм.

Ділянка 7. На ній нагрівання проводять при температурі від 200 до 510 °С. Ця є перехідна ділянка. На ній можливе випадання карбідів заліза, та механічні властивості металу знижуються.

Неналежний хімічний склад трубопровідної сталі та невірно підібраний режим зварювання може призвести до [6]:

- утворення тріщин (холодних та гарячих). Холодні тріщини виникають під час охолодження зварного з'єднання, гарячі утворюються під час кристалізації;
- погіршення механічних властивостей. Недостатня міцність зварного шва може призвести до його руйнування;
- несплавлення. Невірно підібраний склад сталі може призвести до поганого зварювання та сприяти утворенню газових пор;
- зниження корозійної стійкості. Концентрація деяких легованих елементів може сприяти утворенню в зварному шві корозії;
- шлакові включення. Елементи, що окислюються можуть утворювати тугоплавкі оксиди, а це, в свою чергу, приводить до утворення шлакових включень. Також процес окислення легованих елементів може змінити хімічний склад металу шва і погіршити його механічні властивості.

Висновок.

Якість зварювання магістральних та промислових трубопроводів залежить від хімічного складу сталі, з якої вони виготовлені. Для забезпечення якісного зварного шва та хорошої зварюваності трубопровідна сталь повинна мати:

- низький вміст вуглецю;
- малий вуглецевий еквівалент;
- обмежену кількість легуючих елементів;
- мінімальну кількість сірки та фосфору.

Якість зварювання трубопроводів є критичним фактором безпеки, довговічності та герметичності всієї системи. Вона повинна забезпечуватись на всіх етапах – від підготовки труби до контролю готового шва [7].

ЛІТЕРАТУРА

1. Мартинюк Р. Т. Визначення характеристик циклічної тріщиностійкості трубної сталі та її зварного з'єднання. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2011. № 2 (39). С. 83–86. URL: <http://elar.nung.edu.ua/bitstream/123456789/3852/1/1054p.pdf>
2. Костін О. М. Зварювальні матеріали: навч. посібник. Миколаїв : НУК, 2004. 225 с. <https://studfile.net/preview/433590/>
3. Мартинюк Р. Т., Грудз В. Я., Чернова О. Т. Оптимізація якості спорудження та ремонту трубопроводів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2006. Т. 19. № 2. С. 81–84.
4. Чернова О. Т. Термічна обробка зварних з'єднань трубопроводів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2001. № 3 (38). С. 69–73.
5. Афтанділянц Є. Г., Зазимко О. В., Лопатько К. Г. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство. Частина 2. Металознавство. Київ : Видавничий центр НАУ, 2006. 386 с. https://library.kpi.kharkov.ua/files/new_postupleniya/aftandilmater.pdf
6. Мартинюк Р. Т. Контроль герметичності магістральних газопроводів. *Прикарпатський вісник НТШ*. 2017. № 1 (37). С. 249–260. URL: <http://pvntsh.nung.edu.ua/index.php/pv/article/view/280>
7. Грудз В. Я., Мартинюк Р. Т., Чернова О. Т. та ін. Основні критерії якості спорудження магістральних трубопроводів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2010. № 2 (35). С. 121–125.
8. Чернова О. Т., Мартинюк Р. Т., Мартинюк Т. А. Комплексна механізація будівництва та ремонту трубопроводів: навчальний посібник. Івано-Франківськ : Факел, 2012. 286 с. ISBN 978-966-694-170-4.
9. Сологуб М. А., Рожнецький І. О., Некоз О. І. Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство. Київ : Техніка, 2002. 374 с.
10. Мартинюк Р. Т. Просвічування зварних швів рентгенівськими та гама-променями. Наука в епоху дисбалансів: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. (Київ, 25 січня 2016 р.). Київ, 2016. Ч. 2. С. 76–79.

REFERENCES

1. Martyniuk, R. T. (2011). Determination of cyclic crack resistance characteristics of pipe steel and its welded joint [Vyznachennia kharakterystyk tsyklichnoi trishchynostiikosti trubnoi stali ta yii zvarnoho ziednannia]. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, (2), 83–86. <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/1897> [in Ukrainian].

2. Kostin, O. M. (2004). Welding materials: textbook [Zvariuvalni materialy: navch. posibnyk]. NUK [in Ukrainian].
3. Martyniuk, R. T., Hrudz, V. Ya., & Chernova, O. T. (2006). Optimization of quality of construction and repair of pipelines [Optymizatsiia yakosti sporudzhennia ta remontu truboprovodiv]. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, 19 (2), 81–84. [in Ukrainian].
4. Chernova, O. T. (2001). Thermal treatment of welded joints of pipelines [Termichna obrobka zvarnykh ziednan truboprovodiv]. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, (3), 69–73 [in Ukrainian].
5. Aftandiliants, Ye. H., Zazymko, O. V. & Lopatko, K. H. (2006). Technology of structural materials and materials science. Part 2. Metal science [Tekhnolohiia konstruktsiinykh materialiv i materialoznavstvo. Chastyna 2]. *Metaloznavstvo*. Nauy Publishing Center [in Ukrainian].
6. Martyniuk, R. T. (2017). Tightness control of main gas pipelines [Kontrol hermetychnosti mahistralnykh hazoprovodiv]. *Prykarpatskyi Visnyk NTSh*, (1), 249–260. <http://pvntsh.nung.edu.ua/index.php/pv/article/view/280> [in Ukrainian].
7. Hrudz, V. Ya., Martyniuk, R. T., Chernova, O. T., et al. (2010). Basic quality criteria for the construction of trunk pipelines [Osnovni kryterii yakosti sporudzhennia mahistralnykh truboprovodiv]. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, (2), 121–125 [in Ukrainian].
8. Chernova, O. T., Martyniuk, R. T., & Martyniuk, T. A. (2012). Complex mechanization of construction and repair of pipelines: textbook [Kompleksna mekhanizatsiia budivnytstva ta remontu truboprovodiv: navchalnyi posibnyk]. Fabel [in Ukrainian].
9. Solohub, M. A., Rozhnetskyi, I. O., & Nekozy, O. I. (2002). Technology of structural materials and materials science [Tekhnolohiia konstruktsiinykh materialiv ta materialoznavstvo]. Tekhnika [in Ukrainian].
10. Martyniuk, R. T. (2016). X-ray and gamma-ray inspection of welds [Prosvichuvannia zvarnykh shviv renthenivskymy ta hama-promeniamy]. *Science in the era of imbalances: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference* (Part 2, pp. 76–79) [in Ukrainian].

Дата першого надходження статті до видання: 22.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 26.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026