

OPTIMIZATION OF POWDER WIRE COMPOSITION THROUGH MATHEMATICAL MODELING OF THE INFLUENCE OF CHEMICAL ELEMENTS ON THE OPERATIONAL PROPERTIES OF THE WELDED METAL

The problem of resource conservation is one of the most important, as tens of thousands of tons of metal are used annually in various industries to manufacture spare parts and replace rapidly worn components. This requires significant labor costs, leads to increased downtime of equipment, the need for replacing worn-out parts, and a reduction in the productivity of machines and devices. Increasing the wear resistance and service life of equipment is an important task in production. One effective way to address this issue is through the restoration of machine parts and tools and extending their service life by means of arc welding. In many cases, scarce alloying materials are used for this purpose, making the process costly. A solution is the development of new cost-effective alloyed welding materials that improve operational properties. In this context, the study investigates the possibilities of creating wear-resistant welding materials that provide the welded metal with the property of dynamic self-strengthening during operation, which emphasizes the relevance and importance of this direction for various industries. Research methods: the study employed metallographic analysis, chemical and X-ray spectral analysis of the welded metal, hardness measurements, comprehensive wear resistance tests under dry friction, abrasive, and impact-abrasive wear conditions, as well as mathematical modeling of the Fe-Cr-Mn-Ni-N welding metal system.

Keywords: powder wire, austenite, wear resistance, alloying, arc welding, carbides, nitrides, mathematical modeling.

Стаття надійшла 10.10.2024р.

УДК 621.791.052

doi.org/10.31498/2522-9990282024318367

Захарова І.В., Студенікін Д.А.

ВПЛИВ ПРОЦЕСІВ ТЕРМООБРОБКИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ У ВИРОБНИЦТВІ ТРУБ ЗАДЛЯ ВАЖЛИВИХ СЕРЕДОВИЩ

Трубопроводи є одним з основних елементів інфраструктури атомної електростанції (АЕС), оскільки вони забезпечують транспортування різноманітних середовищ (води, пари, пароводяних сумішей, повітря тощо) між різними частинами станції [3,4].

Для трубопроводів насиченого пара, які йдуть до турбін, використовують сталі типу 12Х1МФ, оскільки вони здатні витримувати високі температури та тиски, а також мають високу корозійну стійкість [1]. Сталь 12Х1МФ є оптимальним вибором для систем, що транспортують важливі середовища.

Для визначення ролі термообробки після зварювання проведено серію експериментів, що включали зварювальні випробування, випробування з термообробки після зварювання.

Отримані результати дозволяють детальніше оцінити вплив різних режимів термообробки на структурні та механічні властивості зварних з'єднань, що є важливим для підвищення надійності та довговічності продукції з цієї сталі.

Наявність залишкових напружень, що виникають після процесу зварювання, сприяє утворенню корозійних тріщин та знижує стійкість металу до втомного пошкодження. У

Машинобудування і зварювальне виробництво

зв'язку з цим, важливо досліджувати методи зменшення залишкових напружень, серед яких найбільш ефективним є термообробка після зварювання.

Термін "термообробка (DHT)" зазвичай розшифровується як *Dehydrogenation Heat Treatment* (дегідрогенізаційна термообробка). Цей процес використовується для видалення водню зі зварного з'єднання або металевої деталі після зварювання. Водень може проникати в метал під час зварювання і спричиняти дефекти, такі як тріщини, особливо в зонах зварних швів. Тому дегідрогенізаційна термообробка проводиться для запобігання крихкості та руйнування зварних з'єднань.

Додатково проаналізовано вплив різних параметрів процесу термообробки після зварювання на ефективність зниження залишкових напружень.

Виявлено, що підвищення температури термообробки сприяє більшому зменшенню залишкових напружень, особливо в зонах максимальних напружень, із піковою температурою в межах 650–750 °C.

Ключові слова: залишкові напруження, термообробка, трубні сталі, руйнування.

Постановка проблеми. Сталь марки 12X1МФ — це низьколегована хромо-молібденова сталь, яка використовується для виготовлення трубопроводів та обладнання, що працюють при високих температурах і тисках. Її основне застосування — це котли, теплообмінники та паропроводи в енергетиці, хімічній промисловості та нафтохімії. Попри її добрі механічні властивості та жаростійкість, робота з цією сталлю пов'язана з рядом проблем, особливо під час зварювання та подальшої експлуатації зварних з'єднань.

Основні проблеми зварювання сталі 12X1МФ

1. Під час зварювання 12X1МФ існує високий ризик утворення гарячих тріщин у зварному шві та зоні термічного впливу (ЗТВ). Це зумовлено високим вмістом хрому (1%) і молібдену (0,5%), які збільшують жорсткість зони зварювання. При швидкому охолодженні можуть утворюватися крихкі фази, що сприяють тріщиноутворенню.

2. Після зварювання в сталях 12X1МФ виникають значні залишкові напруження, особливо при зварюванні товстостінних труб. Це призводить до утворення деформацій та зниження тріщиностійкості, особливо під час експлуатації при високих температурах і тисках.

3. Сталь 12X1МФ схильна до утворення оксидних плівок при тривалій експлуатації в умовах високих температур (понад 500°C). Оксидні плівки можуть зменшувати теплопровідність та викликати корозію під напругою.

4. При термообробці зварних з'єднань 12X1МФ існує ризик утворення крупнозернистих структур, що знижує ударну в'язкість і міцність. Неправильна термообробка може призвести до передчасного руйнування в умовах циклічного навантаження.

Зварювання та термообробка труб зі сталі 12X1МФ вимагають спеціальних заходів через високу схильність до утворення тріщин, зміну мікроструктури та утворення залишкових напружень. Правильний вибір зварювальних матеріалів, оптимізація режимів зварювання, використання попереднього підігріву та після зварювальної термообробки є ключовими факторами для забезпечення якості зварних з'єднань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У промисловому виробництві існує кілька процесів термообробки після зварювання, таких як дегідрогенізаційна термообробка (DHT), нормалізація, відпустка тощо. Вибір відповідних процесів термообробки залежно від властивостей матеріалу та характеристик зварювання є важливим питанням для виробників. Наприклад, дослідження показали, що DHT може лише незначно зменшити залишкові напруження у сталі високої міцності. Khalaj та ін. провели порівняльне дослідження різних процесів термообробки сталі API X60, виявивши, що двоступенева термообробка "гартування + відпустка" є більш ефективною, ніж традиційна одноступенева нормалізація [2]. Варто зазначити, що неправильно спроектований процес термообробки може не лише не зменшити

Машинобудування і зварювальне виробництво

залишкові напруження, але й завдати шкоди. Виявили, що неналежна термообробка після зварювання призводить до нерівномірного розподілу температури у трубопроводі 12Cr1MoV, що може викликати тріщини в зварних з'єднаннях.

Мета дослідження. Метою статті є дослідити вплив різних процесів термообробки на залишкові напруження у зварних з'єднаннях, що дозволить визначити оптимальні методи підвищення довговічності та надійності зварних конструкцій.

Основний матеріал дослідження. У даній роботі були проведені експериментальні зварювальні випробування для труб зі сталі 12ХМФ1, які включали підготовку зразків, зварювання, а також термообробку після зварювання. Для проведення зварювання використовували стандартні методи зварювання, а зразки формували у вигляді труб з відповідними геометричними характеристиками.

Випробування проводили на зразках сталі 12Х1МФ у вигляді трубних заготовок 273 мм, довжиною 150 мм і товщиною стінки 26 мм. на них була проведена V-подібна оброблення крайок під кутом 30° з притупленням торця 2 мм (рис. 1).



Рисунок 1 – Характеристики зварного з'єднання та технологічні параметри

Машинобудування і зварювальне виробництво

Труба зі сталі 12Х1МФ виготовлена відповідно ТУ 143р-55-2001 і використовується при монтажі паропроводу.

Для проведення випробувань зі зварювання трубні заготовки розрізали на сегменти. Далі проводили зварювання сегментів між собою по ряду технологічних режимів.

Для зварювання даних сегментів використовували електроди марки ТМЛ –3у Ø3мм, призначені для зварювання паропроводів з сталей марок 12Х1МФ, 15Х1МФ, 20ХМФЛ, 15Х1М1ФЛ, що працюють при температурі до 570 °з, і елементів поверхонь нагріву з сталей марок 12Х1МФ, 12Х2МФСР, 12Х2МФБ незалежно від робочої температури, а також для заварки дефектів в елементах з тих же сталей. Зварювання даними електродами можна проводити у всіх просторових положеннях, крім вертикального «зверху вниз», на постійному струмі зворотної полярності.

Для вимірювання окружних та осьових напружень у різних точках вздовж перетину зварного шва, було проведено тест з використанням інструментального вдавлювання. Цей метод має переваги майже без руйнівного характеру та зручності в експлуатації. Вимірювання залишкових напружень проводилося за допомогою індикаторного тестера KJS-3, що ілюстрований на рисунку. Спочатку поверхня зварного з'єднання механічно полірувалася. Потім до контрольних точок були приклеєні деформаційні датчики за допомогою спеціального клею, і тестер напружень був підключений до датчиків. Третім етапом було розміщення ударного вдавлювального пристрою на зварному з'єднанні з вирівнюванням сферичного індентора з деформаційним датчиком. Нарешті, ударна сила прикладається до зварного з'єднання шляхом розпуску пружини ударного пристрою. [3-5].

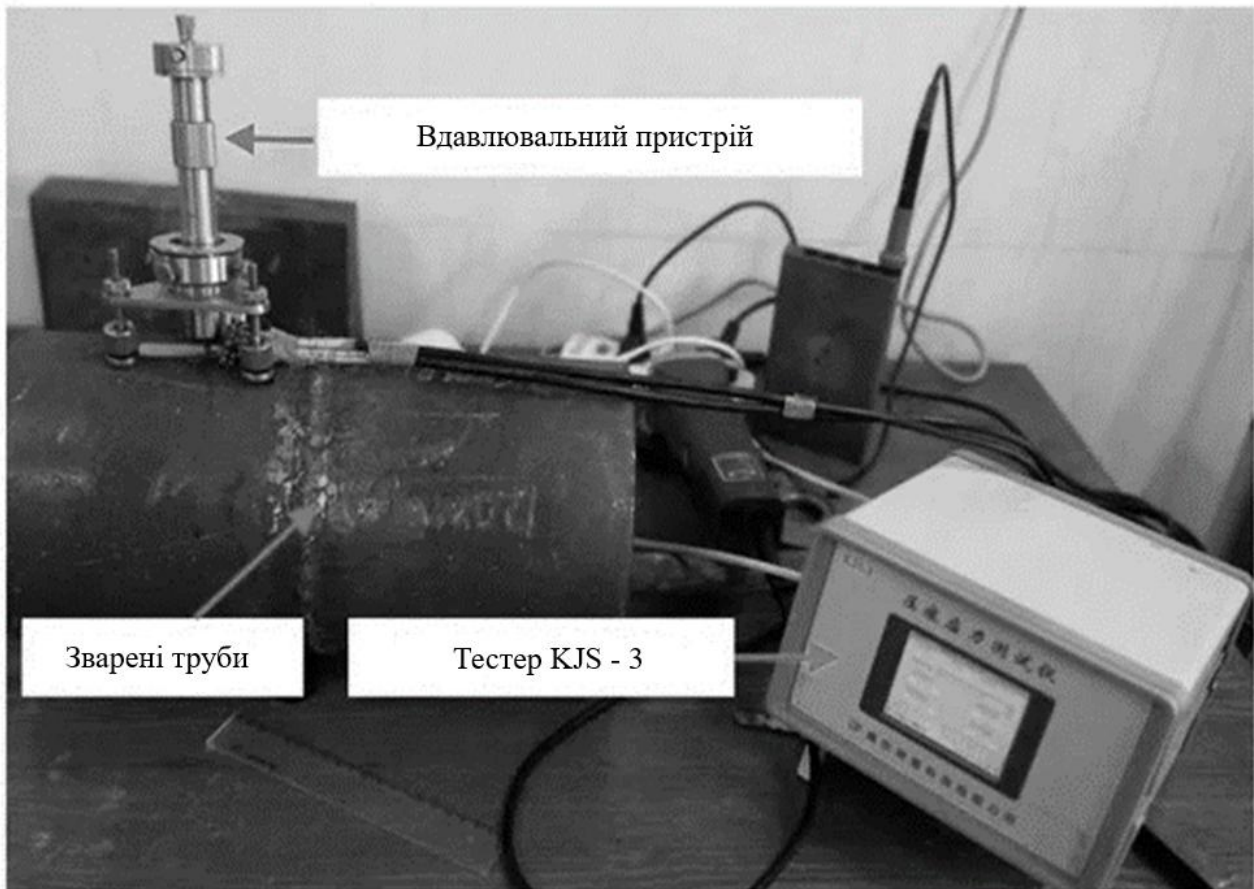


Рисунок 2 – Випробування залишкових напружень за допомогою індикаторного тестера

Машинобудування і зварювальне виробництво

Для розгляду мікроструктури були підготовлені зразки зварних з'єднань

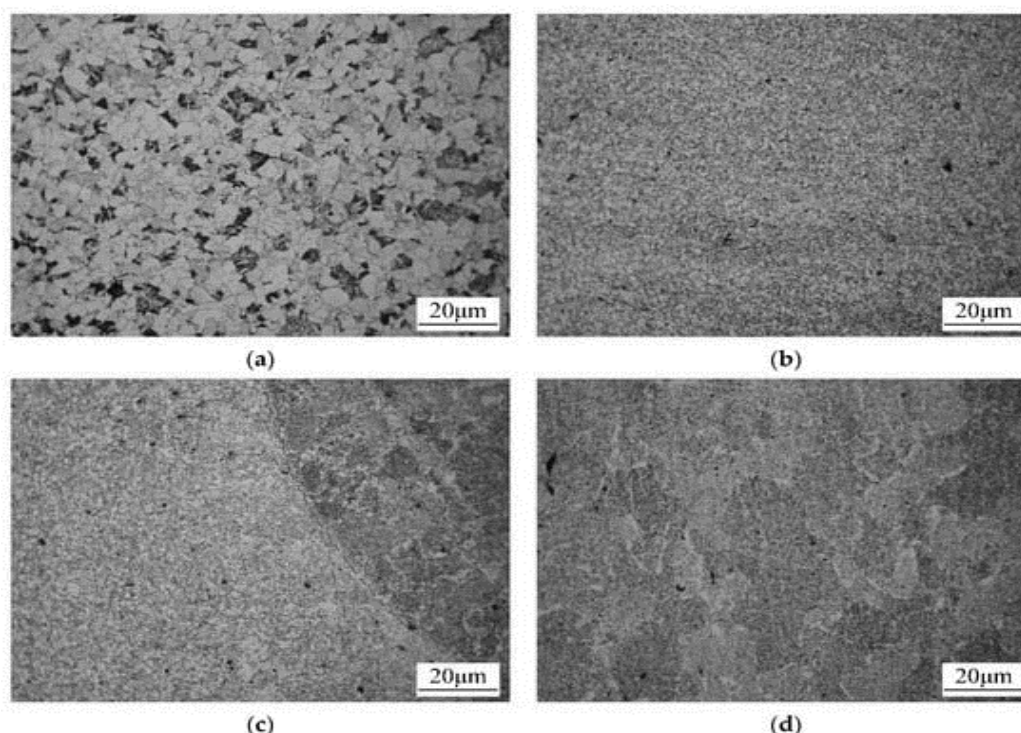


Рисунок 3 – Мікроструктури зварного з'єднання 12X1МФ після деігідації:
(а) Основна металева частина; (б) Зона термічного впливу; (с) Зона злиття; (д) метал шва

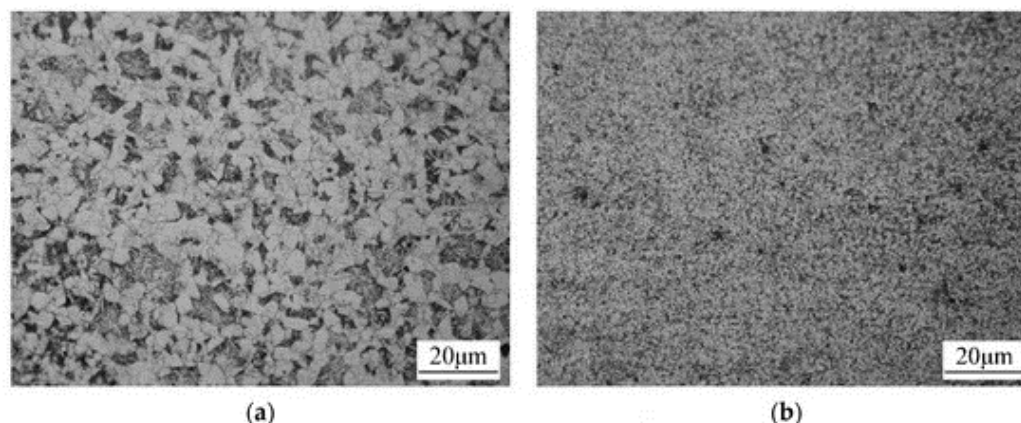


Рисунок 4 – Мікроструктури зварного з'єднання 12X1МФ термічної обробки: Основна металева частина; (б) Зона термічного впливу;

Мікроструктури зварного з'єднання сталеві труби 12X1МФ після деігідації та термічної обробки показані на рисунку. Згідно з морфологією мікроструктури та розмірами зерен, зварне з'єднання поділяється на чотири підзони: основна металева частина зона термічного впливу, зона злиття та зварювальний метал

Обидва основні метали, що піддавалися ДНТ та термічній обробці, складаються з фериту та перліту. Однак кількість перліту суттєво відрізняється. Мікроструктурні спостереження виявили, що вміст перліту в основному металі з ДНТ (див. Рисунок 3а) вищий, ніж у основному металі з термічною обробкою (див. Рисунок 4а). Порівняння між Рисунок 3б і Рисунок 4б показує, що розмір зерен ЗТВ з ДНТ менший, ніж у ЗТВ з термічною обробкою.

ВИСНОВКИ

В результаті виконаної роботи були досліджені структури наплавленого металу шва, ЗТВ, а також механічні властивості зварних з'єднань з теплостійкої сталі 12Х1МФ виконані по 6 технологічним режимам (за п'ять проходів ручним дуговим зварюванням покритими електродами і зазнали різних режимів попереднього підігріву і подальшої ТО). На основі отриманих результатів були зроблені наступні висновки:

1. Зварювання без підігріву призводить до формування тріщин в наплавленому металі кореневої частини зварного з'єднання. Початком формування тріщин можуть служити різного роду дефекти, наприклад, пори і великі не металеві включення. Подальша термічна обробка не виключає даного роду сформованого дефекту.

2. Введення в технологічний процес зварювання тільки підігріву не забезпечує зниження рівня твердості за обсягом наплавленого металу. Мікроструктура особливо в обсязі кореня шва зберігається метастабільною з незначною кількістю окремих феритних зерен. В обсязі наплавленого металу другого проходу дані структурні складові зберігаються в співвідношенні 50:50.

3. Підігрів і подальша термічна обробка при 740°C вирівнює рівень мікротвердості по всьому об'єму зварного з'єднання. Структура має дендритну будову по межах яких знаходиться феритний прошарок.

4. Додаткова термічна обробка зварного з'єднання у вигляді високої відпустки при 740°C призводить до формування практично однорідної ферито-перлітної суміші в зоні термічного впливу, мікротвердість якої практично не перевищує рівень HV основного металу. Це дозволяє отримати рівномірне зварне з'єднання з основним металом. Руйнування при статичному навантаженні відбувається по основному металу. Рівень міцності і пластичності знаходиться в інтервалі значень характерних для вихідного матеріалу (ТУ 14-Зр-55-2001).

5. На основі всього комплексу результатів рекомендується найбільш раціонального технологічного процесу зварювання труб 273 з товщиною стінки 26 мм зі сталі 12Х1МФ: підігрів 250°C перед зварюванням і подальша термічна обробка зварного з'єднання у вигляді високого відпустки при 740°C з витримкою 2 години і подальшим охолодження на спокійному повітрі.

Список використаних джерел

1. Бучинський М. Я., Горик О. В., Чернявський А. М., Яхін С. В. ОСНОВИ ТВОРЕННЯ МАШИН / [За редакцією О. В. Горика, доктора технічних наук, професора, заслуженого працівника народної освіти України]. — Харків: Вид-во «НТМТ», 2017. — 448 с. : 52 іл. [ISBN 978-966-2989-39-7](#)

2. Khalaj-Amirhosseini, M. Microwave filters using waveguides filled by multilayer dielectric [Текст] / M. Khalaj-Amirhosseini // Progress In Electromagnetics Research, PIER 66. - 2006, p. 105-110.

3. Анохов А.Е., Корольков П.М., Зварювання і термічна обробка корпусного енергетичного обладнання при ремонті.- Київ:Екотехнологія,2003

4. Анохов А.Е., Корольков П.М., Термічна обробка зварних з'єднань. Київ:Еко-технологія, 2002.-112с.

5. Хромченко Ф.А., Корольков П.М. Технології і обладнання для термічної обробки зварних з'єднань:Енергоатом Видання,1997.-200 с.

THE INFLUENCE OF HEAT TREATMENT PROCESSES ON THE CHARACTERISTICS OF WELDED JOINTS IN THE PRODUCTION OF PIPES FOR CRITICAL ENVIRONMENTS

Pipelines are one of the main elements of the infrastructure of a nuclear power plant (NPP), as they provide transportation of various media (water, steam, steam-water mixtures, air, etc.) between different parts of the plant [3,4].

For pipelines of saturated steam, which go to turbines, steel type 12Cr1MoV. is used, because they can withstand high temperatures and pressures, and also have high corrosion resistance [1]. Steel 12Cr1MoV is the optimal choice for systems that transport important media.

To determine the role of heat treatment after welding, a series of experiments was conducted, which included welding tests, tests on heat treatment after welding.

The obtained results allow for a more detailed assessment of the effect of different heat treatment modes on the structural and mechanical properties of welded joints, which is important for increasing the reliability and durability of products made of this steel.

The presence of residual stresses arising after the welding process contributes to the formation of corrosion cracks and reduces the resistance of the metal to fatigue damage. In this regard, it is important to investigate methods of reducing residual stresses, among which heat treatment after welding is the most effective.

The term "heat treatment (DHT)" is usually deciphered as Dehydrogenation Heat Treatment (dehydrogenation heat treatment). This process is used to remove hydrogen from a welded joint or metal part after welding. Hydrogen can penetrate the metal during welding and cause defects such as cracks, especially in weld areas. Therefore, dehydrogenation heat treatment is performed to prevent brittleness and destruction of welded joints.

In addition, the influence of various parameters of the heat treatment process after welding on the effectiveness of residual stress reduction was analyzed.

It was found that an increase in the temperature of the heat treatment contributes to a greater reduction of the residual stresses, especially in the zones of maximum stresses, with a peak temperature in the range of 650–750 °C.

Keywords: residual stresses, heat treatment, pipe steel, destruction.

Стаття надійшла 12.11.2024р.