

АНАЛІЗ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК З РІЗНОРІДНИХ СТАЛЕЙ

Особливості будови зварних з'єднань різнорідних сталей і зумовлена ними явно виражена хімічна, структурна і механічна неоднорідності повинні враховуватися при призначенні матеріалів конструкції і виборі технології її виготовлення. При виготовленні комбінованих конструкцій з різнорідних сталей може використовуватися більшість наявних методів зварювання. Пошук найбільш раціонального методу виготовлення суднових допоміжних механізмів з різнорідних сталей, так само як і при зварюванні вузлів зі сталі одного легування, визначається умовами отримання звареної конструкції високої якості. При цьому необхідно враховувати мінімізацію витрат і оптимізацію типу з'єднання, клас легування марок зварювальних сталей та сумарну собівартість виготовлення конструкції. При зварюванні між собою сталей одного структурного класу будь-які додаткові вимоги до вибору методу зварювання і її режиму, що враховують різнорідність з'єднання, можна звичайно не враховувати. В межах одного структурного класу теплофізичні властивості сталей помітно один від одного не відрізняються. Властивості перехідних шарів шва за рахунок проплавлення основного металу в подібних з'єднаннях також в більшості випадків суттєво не відрізняються від властивостей наплавленого металу. При цьому розгляд вибору зварювальних матеріалів і основного металу для досліджуваних сполук є найбільш складним у зв'язку зі значною відмінністю між собою сталей, що зварюються. Тому питання збереження властивостей в перехідних ділянках шва, а також зведення до мінімуму дифузійних прошарків в зоні сплаву, набувають для таких з'єднань особливої важливості. Важливим є виконання порівняння властивостей зварних з'єднань, у яких використовуються термічно-зміцнювана та дисперсно-твердіюча аустенітні сталі. Для сталей даного класу термічна обробка після зварювання є обов'язковою для відновлення властивостей околошовної зони. Особлива роль приділяється вибору режиму термічної обробки зварного з'єднання, вона залежить від рівня легування як сталі, так і зварного з'єднання. Також розглядаються і величини експлуатаційних навантажень на судові енергетичні установки.

Ключові слова: легуючі елементи, аустеніт, основний метал, наплавлений метал, перехідний шар, мартенсит, перліт, структура металу.

Коваленко И.В. Анализ свойств материалов и технологии для изготовления судовых энергетических установок из разнородных сталей. Свойства металлов и особенности строения сварных соединений разнородных сталей и обусловленная ими явно выраженная химическая, структурная и механическая неоднородности должны учитываться при назначении материалов конструкции и выборе технологии ее изготовления. При изготовлении комбинированных конструкций из разнородных сталей могут использоваться большинство имеющихся методов сварки. Поиск наиболее рационального метода изготовления судовых вспомогательных механизмов из разнородных сталей, так же как и при сварке узлов из стали одного легирования, определяется условиями получения сварной конструкции высокого качества. При этом необходимо учитывать минимизацию затрат и оптимизацию типа соединения, класс легирования марок свариваемых сталей и суммарную себестоимость изготовления изделия. При сварке между собой сталей одного струк-

* канд. техн. наук, доцент, ГБУЗ «Азовский морской институт», г. Мариуполь, ivankovalenko165@gmail.com

турного класу какие-либо дополнительные требования к выбору метода сварки и ее режима, учитывающих разнородность соединения, можно обычно не учитывать. В пределах одного структурного класса теплофизические свойства сталей заметно друг от друга не отличаются. Свойства переходных слоев шва за счет проплавления основного металла в подобных соединениях также в большинстве случаев существенно не отличаются от свойств наплавленного металла. При этом рассмотрение выбора сварочных материалов и основного металла для исследуемых соединений является наиболее сложным в связи со значительным отличием между собой свариваемых сталей. Поэтому вопросы сохранения свойств в переходных участках шва, а также сведения к минимуму диффузионных прослоек в зоне сплавления, приобретают для таких соединений особую важность.

Ключевые слова: легирующие элементы, аустенит, основной металл, наплавленный металл, переходной слой, структура металла.

I.V. Kovalenko. Material properties and manufacture technologies analysis of combined ship power-plants from different steels. The peculiarities of the structure of welded joints of different steels caused by their pronounced chemical, structural and mechanical heterogeneity must be taken into account when designing materials of a structure and choosing the technology of its manufacture. In the manufacture of composite structures of different steels, most existing welding methods can be used. The search for the most rational method of manufacturing ship auxiliary mechanisms of different steels, as well as for welding units of the same alloy, is determined by the conditions for obtaining a welded structure of high quality. It is not necessary to take into account the cost minimization and optimization of the type of connection, the grade of the alloying elements as well as the total cost of the construction. When welding steels of the same structural class, any additional requirements for the choice of a welding method and its mode, with consideration for the heterogeneity of the joint, can usually be ignored. Within one and the same structural class, the thermophysical properties of steels do not significantly differ. The properties of the transition layers of the seam due to the penetration of the base metal in such compounds in most cases are not significantly different from the properties of the weld metal either. The consideration of the choice of welding materials and the base metal for the compounds to be tested is the most difficult due to the significant difference between the welding steels. Therefore, the question of preserving properties in the transition areas of the seam, as well as the minimizing the diffusion layers in the alloy zone, are of particular importance for such compounds. It is important to compare the properties of welded joints using thermally-hardened and dispersion-hardened austenitic steels. For the steels of this class, heat treatment after welding is required to restore the properties of the surrounding area. The choice of the welded joint heat treatment mode is of particular value, it depends on the level of alloying both steel and the welded joint. The magnitudes of operational loads on the ship's power plants are also taken into account.

Keywords: alloying elements, austenite, base metal, weld metal, transition layer, metal structure.

Постановка проблеми. Різномірні сталі є універсальним матеріалом, що застосовується у багатьох секторах світової економіки: металургії, машинобудуванні, енергетиці, будівництві, оборонному комплексі.

Також різномірні сталі є високотехнологічним матеріалом, який сприяє підвищенню ефективності виробництва, енергоефективності, матеріалоефективності, періоду і циклу експлуатації, рівню якості виробів, що виготовляються.

На сучасному етапі розвитку технологій по ремонту та виготовленню суднових конструкцій особливу увагу приділяють якості матеріалів та технологічності методів зварювання. При цьому виникає особливість застосування різномірних матеріалів при виготовленні суднових конструкцій в одному вузлі із сталей різних структурних класів. Виникає необхідність розгляду, перш за все, при зварюванні перлітної сталі з аустенітною та пов'язаних з цим різних труд-

нощів. Тому вибір матеріалів, методу і режиму зварювання суднових енергетичних конструкцій повинен забезпечити якість та експлуатаційну надійність вузла. Важливим є зрівняння властивостей сталей різних класів, які мають особливі механічних показники.

У світовій практиці при використанні різномірних сталей для виготовлення конструкцій найбільшого поширення набули поєднання основного шару з конструкційної сталі та робочого шару з низьколегованого матеріалу, у якого підвищені експлуатаційні властивості.

В даний час одним з основних матеріалів, застосовуваних для виготовлення вузлів суднового обладнання допоміжного призначення, є низьколеговані конструкційні сталі. При цьому даний вид матеріалу має ряд недоліків, таких як низька опірність до агресивних середовищ і статичних навантажень і, як наслідок, низький період експлуатації.

Найбільш раціональним є використання різномірних сталей в якості основного матеріалу при виготовленні вузлів суднових агрегатів. Даний вид конструкційного матеріалу найбільш стійкий до впливу як циклічних деформацій, так і агресивних середовищ. У багатьох джерелах представлений досвід застосування різномірних сталей в якості основного матеріалу суднових металоконструкцій. При цьому вибір різномірної сталі, що складається з шару конструкційного матеріалу і легованого шару, мало висвітлений в науково-технічних джерелах. Не в повній мірі розкрито методи підбору класу сталі, степені легованості та типу термічної обробки. Недостатньо описані процеси взаємодії легуючих елементів з перехідним шаром.

Тому питання отримання якісних зварних з'єднань в суднових металоконструкціях з двошарових сталей, здатних тривалий час сприймати статичні навантаження і працювати в умовах підвищених температур і агресивних середовищ, є досить актуальним.

Актуальність досліджень у цьому напрямку є важливою для багатьох компаній і підприємств, які спеціалізуються на ремонті та виготовленні елементів суднового енергетичного обладнання. Результати досліджень, наведені у даній статті, допоможуть зменшити змінну частину собівартості виготовлення та ремонту суднового обладнання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У роботі [1] наведені дослідження, основані на тому, що при виготовленні суднових комбінованих конструкцій з різномірних сталей найбільше розповсюдження отримала ручна дугова зварка. Основною її перевагою в даному випадку є гнучкість процесу і можливість забезпечення порівняно помірних ступенів проплавлення. Перспективним є використання методів автоматичного зварювання та наплавлення під флюсом, які забезпечують мінімальне проплавлення основного металу (зварювання розщепленою дугою, наплавка стрічковим електродом) [2]. Але залишилися без відповіді питання виконання виробів з перлітних сталей різного легування і перлітних сталей з високохромистою мартенситною складовою у середовищі вуглекислого газу. Тому дослідження у цьому напрямку є актуальними. Також існують труднощі, які виникають при зварюванні цих сталей при виготовленні вузлів з високолегованих сталей та зварюванні в інертних газах [3]. Причиною цих труднощів можуть бути холодні тріщини, які виникають при кристалізації шва. Вирішення цієї проблеми залежить від застосування при виготовленні суднових тонколистових конструкцій з перлітної та аустенітної сталі вакуумного обладнання електронно-променевого зварювання [2]. Таким чином пошук оптимального спеціалізованого виду зварювання також є актуальним. При розгляді технології виготовлення вузлів суднових конструкцій з різномірних сталей різними методами зварювання основною вимогою вибору зварювального режиму є забезпечення заданого співвідношення проплавлення кожної зі зварювальних кромок. Зазначена вимога дотримується при стиковому зварюванні введенням різних настановних довжин труб, що зварюються, а при точковому зварюванні – за рахунок переходу від м'яких до жорстких режимів [3]. Але важливим залишається пошук технологічного підходу до зварювання плавленням з вимогою зведення до мінімуму частки основного металу в шві. Цей результат досягається веденням процесу на режимах з мінімальною силою струму при помірних швидкостях.

Широко відомо, що способи зварювання плавленням, формування шва, в яких виконується лише проплавлення основного металу, впливають на властивості шва [4]. Причиною цього можуть бути крупнозернисті структури, які схильні до охрупчення. Наприклад, рішення цього питання полягає у використанні автоматичної приварки під флюсом шипів зі сталі типу сіхромаль до труб з маловуглецевої сталі поверхонь нагріву котлів [5]. Це дозволяє стверджувати, що у швах за рахунок проплавлення матеріалу шипа утворюється однофазна феритна структура і вони стають крихкими після експлуатації в інтервалі температур 400-500°C. Стійкість швів

проти охрупчення була помітно підвищена, коли ввели перед зварюванням операцію нікелювання шипів [6]. Тому важливий пошук конструкційних матеріалів, у яких нікель переходить в шов, додатково легує його і приводить до усунення однофазної крупної феритної структури.

Але залишились питання по вибору зварювальних матеріалів. Від легування наплавленого металу істотно залежить можливість утворення в перехідних шарах шва тендітних структур і тріщин, а також інтенсивність розвитку в зоні сплаву кристалізаційних і дифузійних прошарків. Залежно від поєднання зварювальних сталей, технології виготовлення і режиму експлуатації конструкцій застосовуються зварювальні матеріали, які за своїм складом можуть бути близькі до менш або більш легованої сталі, а у ряді випадків і помітно відрізнятися від них.

У комбінованих суднових конструкціях метал шва по своїй міцності може задовольняти вимогам менш міцної зі сталей [7]. Зазвичай зварні шви за механічними властивостями у жароміцних сталей близькі або навіть перевершують властивості основного металу. Тому використання зварювальних матеріалів близького складу, але з менш міцними характеристиками і менш легованими складами, задовольняє вимогам, що пред'являються до міцності суднових конструкцій [7].

Все це дозволяє стверджувати що проведення аналізу та дослідження у цьому напрямку є актуальними.

Метою даної роботи є аналіз дослідження та обґрунтування забезпечення правильного підбору основного металу і зварювальних матеріалів при виготовленні суднових енергетичних установок вузлів з різномірних сталей. Також необхідно виконати обґрунтування супутніх режимів термічної обробки.

Для досягнення визначеної мети необхідно виконати наступні завдання:

– сформулювати методи усунення залишкових напруг та концентраторів напруг у конструкціях судового обладнання;

– обґрунтувати вибір матеріалу та режиму термічної обробки з урахуванням основних та додаткових вимог вибору зварювального режиму з забезпеченням заданого співвідношення проплавлення кожної зі зварювальних кромок без виникнення мартенситних структур;

– структурувати вимоги до аустенітних матеріалів, суднових конструкцій з різними геометричними параметрами щодо дотримання при стиковому зварюванні виконання переходу від м'яких до жорстких режимів.

Виклад основного матеріалу. Найбільш простим є вибір термічної обробки комбінованих виробів зі сталей різного легування, але одного структурного класу [8]. Для них ефект перерозподілу поля власних напружень при відпуску може не враховуватися, і останній призводить до зняття залишкових напруг. Для цих вузлів доцільність термічної обробки і її режим встановлюються за вимогами для сталей, які більш схильні до загартування. Лише при використанні у конструкціях нестабілізованих перлітових сталей повинні прийматися додаткові заходи до усунення дифузійних прошарків під час нагрівання до високих температур. Ці заходи необхідні для зниження температури і тривалості відпуски, або для введення, особливо в жорстких вузлах, проміжних захисних облицювань з перлітової стабілізованої сталі [8].

До теперішнього часу відсутня єдина думка про необхідність термічної обробки вузлів зі сталей різних структурних класів. Часто рішення цього питання визначається загальними вимогами до термічної обробки після зварювання сталей, що входять в дану конструкцію без урахування різномірності зварного з'єднання [9].

Як показано у дослідженнях [9], залишкові напруги можуть призводити до руйнування конструкції, якщо її матеріал є крихким або переходить в крихкий стан в умовах роботи конструкції. Розвитку руйнування сприяє наявність у судовій конструкції дефектів типу концентраторів напружень, рис. 1.

У розглянутих вузлах залишкові напруги не можуть бути зняті відпускою, тому її слід вводити, в першу чергу, в тих випадках, коли термічна обробка сприяє помітному підвищенню пластичних властивостей металу окремих ділянок конструкції. Особливу увагу при цьому слід приділяти шву, так як в ньому найбільш вірогідна поява різних дефектів типу несплавлення та шлакових включень.

Прийняття зазначеного положення дозволяє більш обґрунтовано підходити до вирішення питання про недоцільність термічної обробки розглянутих комбінованих конструкцій. Так, наприклад, в вузлах з використанням перлітової сталі з часткою хрому більше 10% звареними

електродами перлітового класу відпуску необхідно перш за все виконувати для відновлення пластичних властивостей загартованого при зварюванні шву [10]. На відміну від цього, вузол, зварений аустенітними електродними матеріалами, у більшості випадків у відпусці не має необхідності, так як температурний запас в'язкості аустенітних швів в початковому стані після зварювання вельми великий і небезпеки їх руйнування від дії залишкових напружень немає.

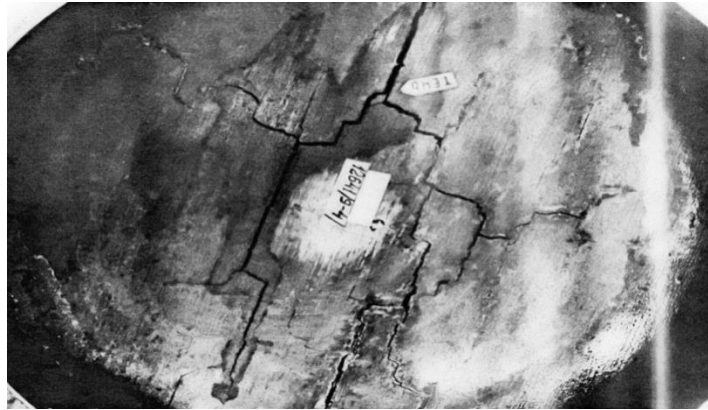


Рис. 1 – Тріщини у судновій конструкції при наявності концентрації напружень

У великогабаритних конструкціях з різнорідних сталей при зварюванні великих товщин термічну обробку виконують у декілька операцій. Так, при виготовленні робочих коліс потужних гідротурбін тривалість перебування окремих зварних стиків при температурі відпуски доходить до 50-70 годин. Внаслідок цього в зоні сплаву отримують помітний розвиток дифузійні прошарки, які знижують міцність виробу (рис. 2).



Рис. 2 – Макрошлиф основного металу та дифузійного прошарку сталі з часткою хрому 12%

В окремих випадках, як, наприклад, в робочих колесах гідротурбін з лопатями з нержавіючої 12%-ної хромової сталі і обіддям з низьколегованої сталі, можна рекомендувати заміну відпуски нормалізацією. Нагрівання при цій операції на 50-100°C вище критичної точки призводить до помітно меншого розвитку дифузійних прошарків у порівнянні з відпускою.

При температурі нормалізації більше 350°C зменшується також і термодинамічна стійкість карбідів в легованій складовій зварного з'єднання, що є рушійною силою процесу дифузії. Випробування зразків з надрізом в зоні сплаву на ударний вигин показали, що ударна в'язкість після нормалізації залишається високою, в той час як після тривалої відпуски вона падає до дуже малих величин та появи крихкого зламу.

Вибір матеріалів при зварюванні різнорідних перлітових сталей. У цьому випадку доцільно використовувати зварювальні матеріали, близькі за складом до менш легованої сталі [11]. Так як технологічна міцність перлітових швів знижується з підвищенням їх легування, то задоволення цієї вимоги дозволяє більш успішно забезпечити відсутність в швах тріщин і інших дефектів. В даному випадку не доводиться побоюватися появи небажаних структур в шарах шва, що примикають до більш легованої сталі, у зв'язку з відсутністю різкої зміни властивостей

в межах можливої зміни легування. При великій різниці у вмісті легуючих елементів у сталях, що зварюються, можуть застосовуватися додаткові матеріали проміжного легування. Рекомендації по їх вибору для різних методів зварювання плавленням наведені у [12]. Там же дано вказівки щодо температури підігріву при зварюванні $T_{\text{під}}$ і відпусці $T_{\text{від}}$ зварених виробів.

При ручному дуговому зварюванні слід використовувати електроди з фтористокальцієвим покриттям, які забезпечують високу стійкість металу шва проти кристалізаційних тріщин та його підвищену пластичність. Застосування електродів з рудно-кислим і органічним покриттям не рекомендується у зв'язку з небезпекою утворення тріщин в шарах шва, що примикають до більш легваної сталі [13].

Технологічні режими зварювання і, перш за все, температуру підігріву бажано вибирати близькими до необхідних для більш легваної сталі. При зварюванні масивних виробів в окремих випадках доцільно знизити температуру підігріву або зовсім виключити останню, шляхом попередньої обробки крайок з боку більш легваної сталі. Так, під час зварювання частин циліндра парової турбіни з маловуглецевої сталі марки 25Л з хромомолібденованадієвою сталлю марки 15Х1М1ФЛ підігріву можна уникнути, якщо ввести попереднє облицювання. Стик необхідно облицювати на висоту 14 мм кромки деталі з легваної сталі електродами типу Е42А. Після облицювання необхідно виконувати відпуску при температурі 720°C, а після заварки основного шва – лише при температурі 620-650°C, для отримання дрібнозернистої структури металу шва (рис. 3).

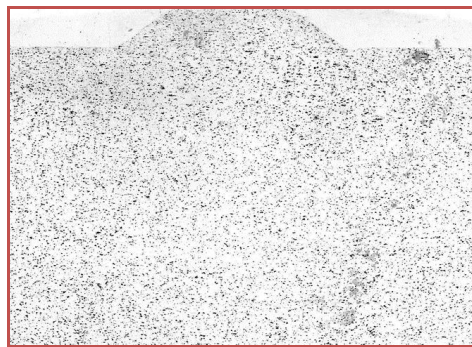


Рис. 3 – Структура зварного з'єднання сталі перлітного класу 15Х1М1ФЛ

За умовою відновлення пластичних властивостей металу, у якому утворюються загартовані структури, при зварюванні окремих зон такого зварного з'єднання температуру відпуски бажано вибирати близькою до рекомендованої для більш легваної сталі. Однак у зв'язку з різним вмістом у зварюваних сталях активних карбідоутворюючих елементів за умовою зниження до мінімуму дифузійних прошарків, температура відпуски повинна бути знижена до 600°C. Таким чином, можливо стверджувати, що ефективно зняття зварювальних напружень досягається при відпусці по термічному режиму для менш легваної складової і становить 550°C [14].

Виходячи з необхідності одночасного обліку всіх цих факторів, температура відпуски зазвичай вибирається середньою між необхідними показниками для однорідних зварних з'єднань обох марок сталей.

При порівняно великій різниці в складі зварювальних сталей і, перш за все, у вмісті карбідоутворюючих елементів за рахунок структури шва не вдається повністю припинити дифузію вуглецю в зоні сплаву. Такі процеси призводять до появи у структурі шва небажаних прошарків. Тому для таких зварних з'єднань необхідно обмежувати робочу температуру виробу. Таким чином, з'ясовано, що для зварних з'єднань вуглецевих сталей з хромомолібденованадієвими або 5%-ними хромистими сталями, гранична робоча температура повинна бути знижена до 350°C. У подібних з'єднаннях слід зменшувати і температуру термічної відпуски. При необхідності роботи цих сполук в інтервалі температур 400-600°C можуть бути рекомендовані введення перехідників, або попереднє облицювання кромки з боку вуглецевої сталі [15].

У зварних з'єднаннях трубопроводів найбільш раціональним є введення перехідника зі сталі 15ХМ (20ХМ). Спочатку слід приварити патрубок електродами типу Е-ХМ до труби з хромомолібденованадієвої сталі і зробити відпуску стику при температурі 680-700°C. Далі, зва-

рюється замикаючий стик патрубку з трубою з вуглецевої сталі. При товщині стінок труби до 10 мм вказаний стик можна термічно не оброблювати. При великій товщині стінки труби, більш 10 мм, стик повинен бути відпущений при температурі 630-650°C.

Облицювання крайок слід рекомендувати у виробках з великою товщиною зварювальних елементів. Спочатку з боку хромомолібденованадієвої сталі проводиться наплавлення електродами типу Е-ХМ (6 мм) і потім електродами типу Е42А (9 мм). Після облицювання повинна бути виконана термічна відпуска при температурі 700-720°C. Зварювання стику може проводитися без підігріву і наступного термічного оброблення.

При з'єднанні високохромистих мартенситних, феритних і ферито-аустенітних сталей вибір електродних матеріалів для зварних з'єднань різнорідних високохромистих сталей визначається вимогами. Найголовніша з них – отримання швів без тріщин і відсутності в них крихких складових [16]. При зварюванні цих сталей внаслідок високого вмісту в основному металі енергійного карбидоутворюючого елементу – хрому – помітного розвитку дифузійних прошарків в зоні сплаву очікувати не слід. Якщо зварюються 12%-ні хромисті мартенситні або мартенситно-феритні сталі різного легування, то можуть застосовуватися електродні матеріали для будь-якої зі зварюваних сталей. При автоматичному зварюванні під флюсом або в вуглекислому газі необхідно використовувати зварювальний дріт типу 08Х14ГТ.

Режим підігріву слід вибирати по вимогам до сталі, яка більш загортається, та має, як правило, підвищений вміст вуглецю. Його температура в залежності від жорсткості конструкції і вмісту в сталі вуглецю може коливатися у межах 200-400°C. Після зварювання обов'язковим є термічна відпуска при температурі 700-750°C. Якщо товщина зварювальних елементів перевищує 30 мм, то бажано до охолодження конструкції не нижче температури 100-150°C поміщати її у термічну піч для нагрівання під відпуску.

При зварюванні 12%-них хромистих мартенситних сталей з високохромистими феритними і ферито-аустенітними сталями найбільш доцільно використовувати зварювальні матеріали ферито-аустенітного класу. Перевагою цих матеріалів в порівнянні з феритними (типу ЕФХ17) є мала схильність металу шва до зростання зерна і висока його пластичність в початковому стані після зварювання (рис. 4).

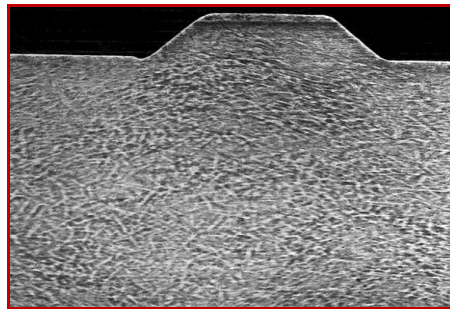


Рис. 4 – Структура зварного з'єднання сталі з феритною структурою

Температура підігріву таких з'єднань при зварюванні повинна вибиратися по термічному режиму для 12%-ної хромистої сталі. Після зварювання необхідна відпуска при температурі 700-750°C.

У ході термічної обробки слід вживати заходи до прискореного охолодження конструкції, щоб уникнути прояву ефекту крихкості при 475°C [16]. Проведення відпуски помітно підвищує корозійну стійкість зварного з'єднання, насамперед, в районі околшовної зони феритно-аустенітної сталі.

При зварюванні зазначеного поєднання сталей застосовуються також аустенітні, електродні та присадочні матеріали. Температура підігріву може бути знижена при цьому на 100-150°C у відрізненні від необхідного режиму для високохромистої сталі.

Температура підігріву під час зварювання зазвичай знаходиться в межах 130-180°C. При необхідності, що викликана умовами забезпечення необхідного рівня властивостей і стійкості проти міжкристалічної корозії, температура термічної відпуски виробу може бути підвищена до 800-850°C.

При з'єднанні аустенітних і ферито-аустенітних сталей та виборі електродних і присадних матеріалів для зварювання різнорідних аустенітних сталей необхідно перш за все враховувати схильність аустенітних швів до утворення тріщин. Цей недолік виникає при порівняно невеликому, до 3-5%, відхиленні легування від оптимального. Можна стверджувати, що дифузійний перерозподіл вуглецю в зоні сплаву для аустенітних складових структур шва так само, як і для з'єднань з високохромистих сталей, у більшості випадків може не враховуватися.

Для попередньої оцінки придатності зварювальних матеріалів доцільно використовувати поділ аустенітних сталей по зварюваності на дві групи [15]. До першої з них відносяться найбільш поширені аустенітні сталі, у яких вміст основного легуючого елемента – хрому – перевищує або близько до змісту нікелю >1%. Ці сталі можуть зварюватися найбільш технологічними аустенітно-феритними електродними матеріалами. Друга група охоплює сталі з підвищеним запасом аустеніту, у яких вміст нікелю перевершує вміст хрому <1% і які аустенітно-феритними електродними матеріалами зварюватись не можуть.

Тому можливо стверджувати, що вибір легування електродних матеріалів визначається умовами роботи конструкції і вимогами її термічної обробки.

Висновки

1. У ході аналізу і досліджень сталей і матеріалів, призначених до експлуатації в суднових умовах при високих температурах, необхідно особливо зупинитися на можливій граничній робочій температурі $T_{\text{гран}}$ комбінованого зварного стику. При відносно невеликій різниці в легуванні вона може вибиратися близькою до граничної для менш легованої сталі. Тому, наприклад, в з'єднаннях вуглецевої сталі з хромо-молібденовою, що містить до 1% Cr і 0,5% Mo, максимальна робоча температура визначається вуглецевою сталлю і становить 450°C.

2. Визначено особливість, що при температурах експлуатації сталей суднових конструкцій в межах 450-500°C можна не побоюватися помітного розвитку дифузійних прошарків в зоні сплаву хромомолібденової сталі зі швом. Завдяки цьому можливо стверджувати, що зварні з'єднання хромомолібденової сталі з хромомолібденованадієвими або 5%-вою хромистою сталлю можуть експлуатуватися до температури 500°C. При цьому необхідно враховувати умови роботи конструкцій з менш легованої сталі.

3. Встановлено, що механічні властивості і тривала міцність суднових зварних з'єднань зі сталей аустенітного і перлітного класів знаходяться на рівні основного металу.

4. Визначено вплив легуючих елементів при зварюванні плавленням на частку основного металу в шві. Відсоток основного металу 60%, а залишок об'єму 40% – структура легуючих елементів та перехідні структури.

5. Сформульовані основні напрямки впровадження проведеного аналізу та досліджень. Основні викладки даної роботи потрібні на підприємствах, які спеціалізуються на виготовленні та ремонті вузлів та суднових установок, основу конструкцій котрих складають перлітні та аустенітні сталі.

Перелік використаних джерел:

1. Chigarev V.V. Flux-cored strips for surfacing / V.V. Chigarev, A.G. Belik // *Welding International*. – Vol. 26. – 2012. – Pp. 975-979. Mode of access: DOI: 10.1080/09507116.2012.694643.
2. Фока А.А. Судовой механик : в 3 т. Т.1 / А.А. Фока. – Одесса : Феникс, 2010. – 1030 с.
3. Kovalenko I. Operation reliability evolution of the ship power pipelines with application of mathematical modeling and ultrasonic testing methods / I. Kovalenko, V. Spiridonov // *The scientific heritage*. – 2016. – № 6, vol. 2. – С. 88-91.
4. Chigarev V.V. Optimization of the fractional composition and performance melting powder tapes with exothermic mixture in the filler / V.V. Chigarev, A.G. Belik, D.A. Zarechenskii // *Welding International*. – 2016. – Vol. 30, № 7. – Pp. 557-559. Mode of access: DOI: 10.1080/09507116.2015.1099892.
5. Чигарев В.В. Способ увеличения срока службы металлургического оборудования / В.В. Чигарев, И.В. Коваленко // *Вісник Приазовського державного технічного університету* : Зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2010. – Вип. 20. – С. 231-236. – (Серія : Технічні науки).
6. Чигарев В.В. Исследование эксплуатационных свойств биметаллических сварных соединений / В.В. Чигарев, И.В. Коваленко // *Вісник Приазовського державного технічного універ-*

- ситету : Зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2011. – Вип. 22. – С. 161-165. – (Серія : Технічні науки).
7. Чигарев В.В. Усовершенствование методики испытания сварных соединений из биметалла при одностороннем изгибе / В.В. Чигарев, И.В. Коваленко // *Захист металургійних машин від поломок* : Зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2010. – Вип. 14. – С. 99-102.
 8. Готальский Ю.Н. Сварные соединения разнородных сталей / Ю.Н. Готальский. – М. : Техника, 1981. – 185 с.
 9. Перспективы производства толстостенных биметаллических корпусов высокого давления / Б.Е. Патон, А.Д. Чепурной, В.Я. Саенко, Л.Б. Медовар // *Автоматическая сварка*. – 2004. – № 1. – С. 30-39.
 10. Закс И.А. Сварка разнородных сталей / И.А. Закс. – М. : Статус-Эко, 1973. – 208 с.
 11. Махненко В.И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций / В.И. Махненко. – Киев : Наукова думка, 2006. – 618 с.
 12. Патон Б.Е. Новые возможности автоматической сварки в машиностроении / Б.Е. Патон, Л.Б. Медовар, В.Е. Саенко // *Металлургия машиностроения*. – 2003. – № 1. – С. 2-5.
 13. Медовар Б.И. Сварка хромоникелевых аустенитных сталей / Б.И. Медовар. – М. : Mashgiz, 1958. – 258 с.
 14. Мовчан Б.А. Микроскопическая неоднородность в литых сплавах / Б.А.Мовчан. – Киев : Гостехиздат УССР, 1968. – 230 с.
 15. Касаткин Б.И. Методика исследования кинетики деформаций при замедленном разрушения / Б.И. Касаткин, В.Я. Бреднев, В.В.Волков // *Автоматическая сварка*. – 1981. – № 11. – С. 1-11.
 16. Mohammad Essa Ahmad. Application of flux-cored strips for ruggedization and reconditioning of machine parts / Mohammad Essa Ahmad, W.W.Chigarev, A.G.Belik // *Modern Developments in Renewable Energy and Sustainability*. – Kuala Lumpur, Malaysia, 2008. – Pp. 110-118.

References:

1. Chigarev V.V., Belik A.G. Flux-cored strips for surfacing. *Welding International*, vol. 26, 2012, pp. 975-979. doi: 10.1080/09507116.2012.694643.
2. Foka A.A. *Sudovoi mekhanik. Tom I* [Ship mechanic. Vol. 1]. Odessa, Phoenix Publ., 2010. 1030 p. (Rus.)
3. Kovalenko I., Spiridonov V. Operation reliability evolution of the ship power pipelines with application of mathematical modeling and ultrasonic testing methods. *The scientific heritage*, 2016, no. 6, pp. 88-91.
4. Chigarev V.V., Belik A.G., Zarechenskii D.A. Optimization of the fractional composition and performance melting powder tapes with exothermic mixture in the filler. *Welding International*, 2016, vol. 30, no. 7, pp. 557-559. doi: 10.1080/09507116.2015.1099892.
5. Chigarev V.V., Kovalenko I.V. Sposob uvelicheniia sroka sluzhby metallurgicheskogo oborudovaniia [A way to increase the service life of metallurgical equipment]. *Visnik Priazovs'kogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu. Serii: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2010, no. 20, pp. 231-236. (Rus.)
6. Chigarev V.V., Kovalenko I.V. Issledovanie ekspluatatsionnykh svoistv bimetallicheskikh svarnykh soedinenii [The study of the operational properties of bimetallic welded joints]. *Visnik Priazovs'kogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu. Serii: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2011, no. 22, pp. 161-165. (Rus.)
7. Chigarev V.V., Kovalenko I.V. Usovershenstvovanie metodiki ispytaniia svarnykh soedinenii iz bimetalla pri odnostoronnem izgibe [Improving the methodology for testing welded joints from bimetal with one-sided bending]. *Zakhist metalurgiiniikh mashin vid polomok – Protection of metallurgical machines against breakdowns*, 2010, no. 14, pp. 99-102. (Rus.)
8. Gotalsky Yu.N. *Svarnye soedineniia raznorodnykh stalei* [Welded joints of dissimilar steels]. Moscow, Tekhnika Publ., 1981. 185 p. (Rus.)
9. Paton B.E., Chepurnoy A.D., Saenko V.Ya., Medovar L.B. Perspektivy proizvodstva tolstostennykh bimetallicheskikh korpusov vysokogo davleniia [Prospects for the production of thick-walled bimetallic high-pressure bodies]. *Avtomaticheskaiia svarka – Automatic Welding*, 2004,

no. 1, pp. 30-39. (Rus.)

10. Sax I.A. *Svarka raznorodnykh stalei* [Welding dissimilar steels]. Moscow, Status-Eco Publ., 1973. 208 p. (Rus.)
11. Makhnenko V.I. *Resurs bezopasnoi ekspluatacii svarnich soedinenii i uzlov sovremenich konstrukcii* [Resource of safe service of welded joints and units of modern structures]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 2006. 618 p. (Rus.)
12. Paton B.E., Medovar L.B., Saenko V.E. *Novie vozmozhnosti avtomat svarki v mashinosstroenii* [New opportunities for automatic welding in mechanical engineering]. *Metallurgiiia mashinostroeniia – Metallurgy of Machinery Building*, 2003, no. 1, pp. 2-5. (Rus.)
13. Medovar B.I. *Svarka chromonikelevich austenitnich stalei* [Welding austenitic chromium-Nickel steels]. Moscow, Mashgiz Publ., 1958. 258 p. (Rus.)
14. Movchan B.A. *Mikroskopicheskay neodnorodnost v litych splavach* [Microscopic heterogeneity in cast alloys]. Kiev, Gostehizdat of the USSR Publ., 1968. 230 p. (Rus.)
15. Kasatkin B.I., Brednev V.I., Volkov V.V. *Methodica isledovaniy kinetiki deformacii pri razrushenii* [Methodology of the study of the kinetics of deformations in the slow motion destruction]. *Avtomaticheskaiia svarka – Automatic Welding*, 1981, no. 11, pp. 1-11. (Rus.)
16. Mohammad Essa Ahmad, Chigarev V.V., Belik A.G. Application of flux-cored strips for ruggedization and reconditioning of machine parts. *Modern Developments in Renewable Energy and Sustainability*, Kuala Lumpur, 2008, pp. 110-118.

Рецензент: В.І. Щетиніна
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 10.07.2020