

І.М. Неклюдов, Б.В. Борц, О.Т. Лопата, Н.Д. Рибальченко, В.І. Ситін

Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут", Харків

СТВОРЕННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПЕРЕХІДНИКІВ ІЗ МАТЕРІАЛІВ СТАЛЬ 20, СТАЛЬ 12Х18Н10Т, ВИГОТОВЛЕНИХ З'ЄДНАННЯМ У ТВЕРДІЙ ФАЗІ, ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ ТА НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ТРУБОПРОВОДІВ АЕС



Методом зварювання у твердій фазі на вакуумному прокатному стані виготовлені шаруваті композиції зі сталей з низьким вмістом вуглецю та нержавіючої сталі 12Х18Н10Т безпосередньо і через бар'єрні прошарки нікелю. Досліджено мікроструктуру та властивості меж з'єднання після прокатки і термообробки різної тривалості при температурі 500 і 600 °С. Вивчені механічні властивості композитів в інтервалі температур 20–500 °С. Збереження високих значень міцності композиту з прошарком нікелю дає можливість рекомендувати його для використання як перехідника при зварюванні труб з різнорідних металів.

Ключові слова: вакуумна прокатка, шаруваті композити, мікроструктура, міцність, термообробка, бар'єрні прошарки, перехідникові елементи.

ВСТУП

Розвиток сучасного атомного машинобудування вимагає від конструкційних матеріалів надійності й довговічності в умовах інтенсивних теплових впливів, механічного навантаження агресивних робочих середовищ та ін. Розвиток атомної енергетики, авіа- та космічної техніки й багатьох інших галузей промисловості потребують створення нових конструкційних матеріалів, здатних поліпшити найважливіші параметри машин, агрегатів, вузлів конструкцій і приладів керування, підвищити міцність, вакуумщільність і корозійну стійкість, що в свою чергу збільшить термін служби й надійність матеріалів при експлуатації. Такими матеріалами можуть бути біметали й багатошарові композиції, у яких шляхом комбінації високоміцних і

пластичних, а також дорогих і відносно дешевих матеріалів можна цілеспрямовано створювати принципово нові матеріали з такими параметрами, які властиві тільки композитам [1–4].

Проблема ресурсу і безпеки експлуатації енергонавантажених конструкцій, споруд, агрегатів і окремих вузлів машин різного типу реакторів на атомних станціях потребує надійного з'єднання трубопроводів з нержавіючої і низьковуглецевої сталі. Отримати надійні, довговічні з'єднання елементів конструкцій, що виготовляються з різних за властивостями матеріалів, придатних для експлуатації в жорстких умовах (змінних теплових і радіаційних полів) можна через перехідники. Схема зварювання труб за допомогою перехідника, виробленого з композиту, наведена на рис. 1. Такі перехідники повинні забезпечувати високу міцність і вакуумщільність у процесі технологічних операцій (обробка різанням, зварюван-

ня, термоциклічне навантаження та ін.), а також у процесі тривалої роботи в умовах експлуатації.

Проведені дослідження показали можливість отримання таких перехідників зварюванням в твердій фазі методом високотемпературної вакуумної прокатки на стані ДУО-170 [5]. Основними умовами отримання композиційних перехідників було забезпечення відсутності на межах з'єднання основних складових крихких фаз (типу карбідів, інтерметалідів та ін.), які в процесі тривалої роботи в умовах високих теплових потоків і навантажень неминуче приводять до виникнення на межах з'єднання тріщин і до втрати цілісності конструкції.

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Для зварювання в твердій фазі *нержавіюча сталь—сталь 20* використовувався вакуумний прокатний стан ДУО-170 конструкції ННЦ ХФТІ [5].

Металографічні дослідження структури матеріалів проводили на мікрошліфах з використанням металографічного комплексу, що складався з мікроскопа GX-51 та аналізатора зображення ІА-32.

Мікротвердість складових композитів вимірювали на мікротвердомірі ПМТ-3 при навантаженнях 20 г.

Механічні властивості композитів визначали на циліндрових зразках, вирізаних з композитів по товщині перпендикулярно межі сполучення шарів. Діаметр робочої частини зразків складав 4 мм, довжина — 20 мм. Випробування проводили на розривній машині "Instron 5581" при 20 °С. Випробування в діапазоні температур 150–500 °С проводили на вакуумній розривній машині зі швидкістю переміщення рухомого захвату 2 мм/хв.

РОЗРОБКА ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ КОМПОЗИТУ СТАЛЬ 20—НЕРЖАВІЮЧА СТАЛЬ 12Х18Н10Т

Для вибору оптимальних технологічних параметрів отримання міцних нероз'ємних з'єднань *сталь 20—сталь Х18Н10Т* нами були про-

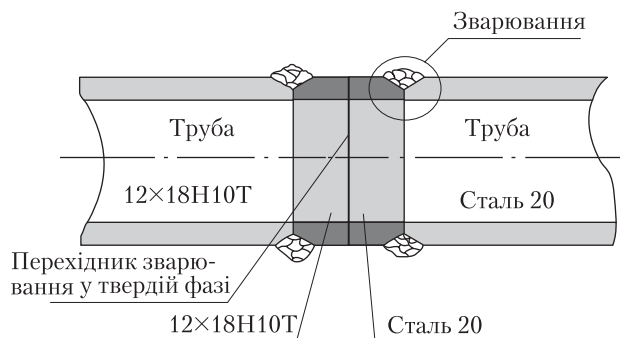


Рис. 1. Схема зварювання труб з різномірних металів за допомогою перехідникового елемента з композиту

Розміри складових пакету, мм	Метал		
	Сталь 20	Сталь 12Х18Н10Т	Нікель
Товщина	20–25	20–25	0,5–1,0
Ширина	115	115	115
Довжина	200	250	250

катані дослідні партії модельних біметалів при температурах 900–1 200 °С і відносних обтисненнях від 10 до 40 % при залишковому тиску газів у вакуумній системі стану $1-5 \cdot 10^{-2}$ Па.

Ширина пакета обиралася 65 мм, довжина — 150–200 мм з товщиною 15–20 мм шарів сталі 20 і сталі 12Х18Н10Т.

З аналізу результатів дослідження, проведених на модельних пакетах, найбільш оптимальними умовами отримання композиту *сталь 20—сталь Х18Н10Т* вибрані такі параметри процесу прокатки:

- залишковий тиск у камері печі — $1-5 \cdot 10^{-2}$ Па;
- температура печі — $1\ 080 \pm 20$ °С;
- відносний обтиск — 28 ± 3 %.

Для використання перехідників відповідно до сортаменту трубної промисловості розміри початкових матеріалів сталі 20 та сталі 12Х18Н10Т були збільшені в порівнянні з розмірами в модельних пакетах (див. табл.). Крім того, враховуючи значну дифузійну рухливість вуглецю при високих температурах з низьковуглецевої сталі в нержавіючу з утворенням карбідів на межі з'єднання, ми передбачили окрім з'єднан-

ня безпосередньо сталі 20 зі сталлю 12X18H10T застосування бар'єрного прошарку з нікелю між основними складовими композиту.

МЕТАЛОГРАФІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Складнощі в збереженні високих механічних властивостей можуть з'явитися в композиті *сталь 20—сталь Х18Н10Т* внаслідок неоднорідності складу, будови і властивостей в перехідних зонах вже на стадії його виготовлення. Взаємодія складових композиту приводить до виникнення поблизу міжслойної поверхні розділу специфічної, характерної для кожної конкретної композиції, неоднорідності різних видів (геометричної, структурної, хімічної та механічної). Неоднорідність складу в зоні сполучення різнорідних складових біметалу типу "*вуглецева сталь + нержавіюча аустенітна сталь*" пов'язана в першу чергу з дифузійним перерозподілом вуглецю як у процесі сумісної пластичної деформації різнорідних сталей при гарячій прокатці, так і при подальших експлуатаційних або технологічних нагріваннях. "Висхідну" дифузію вуглецю при підвищених температурах можна зупинити, застосовуючи проміжні бар'єрні прошарки, які мають твердорозчинні зони та не дають крихких сполук на межах складових композиту.

Найбільш перспективним матеріалом прошарку, згідно з діаграмами стану подвійних металевих систем, є нікель. Він хорошою протистоїть корозії при підвищених температурах та має достатню міцність і пластичність [6]. Мікрошліфи вирізали по товщині біметалів перпендикулярно межах з'єднання шарів. Досліджували мікроструктуру на шліфах композицій *сталь 20—сталь 12Х18Н10Т* без прошарків та з прошарком нікелю між *сталлю 20—сталлю 12Х18Н10Т*. Аналіз проводили на зразках після прокатки та відпалу при температурі 500 °С протягом 10 та 50 год, а також після відпалу 600 °С тривалістю 50 год (рис. 2, 3, див. кольорову вклейку).

Після вакуумної прокатки при температурі $1\ 080 \pm 20$ °С на межах з'єднання сталі 20 з нержавіючою сталлю 12Х18Н10Т ніяких до-

даткових фаз не було виявлено. В сталі 20 біля межі з'явилися знеуглецьована зона зі стовбчастою структурою фериту розміром 55—60 мкм поперек і невелика по товщині зона дрібніших рівноосних зерен фериту розмірами 35—40 мкм, що переходить до ферито-перлітової структури, характерної для низьковуглецевої сталі типу *сталь 20*. Після додаткової термообробки у вигляді відпалу феритна зона в сталі 20 збільшується в композиті, прокатаному без прошарку. Розміри її залежать від комбінації температур і тривалості витримки. Так, після відпалу при температурі 500 °С впродовж 10 год істотних змін структури в порівнянні з видом після прокатки не спостерігається як в сталі 12Х18Н10Т, так і в сталі 20.

Після триваліших витримок при температурах 500 і 600 °С впродовж 50 год хімічна і структурна неоднорідності виявлені як у маловуглецевій сталі, так і в нержавіючій сталі 12Х18Н10Т. Зона фериту збільшується вдвічі і більше. З боку нержавіючої сталі з'являється вузька світла смуга розміром в декілька мікрон (10—100 мкм) з підвищеною мікротвердістю в цій ділянці (350—700 кг/мм²). Це може бути карбідна складова як результат взаємодифузії легуючих елементів (наприклад, хрому з нержавіючої сталі і висхідної дифузії вуглецю в нержавіючу сталь). Далі йде перехідна зона темного кольору розміром 30—40 мкм і більше. Як показали дані мікрорентгеноспектрального аналізу, ця темна зона являє собою насичений вуглецем шар нержавіючої сталі за рахунок дифузії вуглецю зі сталі 20. При цьому вміст вуглецю в сталі 12Х18Н10Т збільшується від 0,10 до 0,45 ваг. % і більше [7]. Потім йде широка зона аустенітних зерен з різною щільністю виділень частинок карбідів, розташованих як по межі, так і по тілу зерен сталі 12Х18Н10Т, і нарешті йде зона, в межах якої карбіди розташовані по межах зерен аустеніту. Далі ця зона переходить у звичайну аустенітну структуру нержавіючої сталі після відпалу. Відмічені хімічна і структурна неоднорідності типові для ряду композитів з корозійностійких

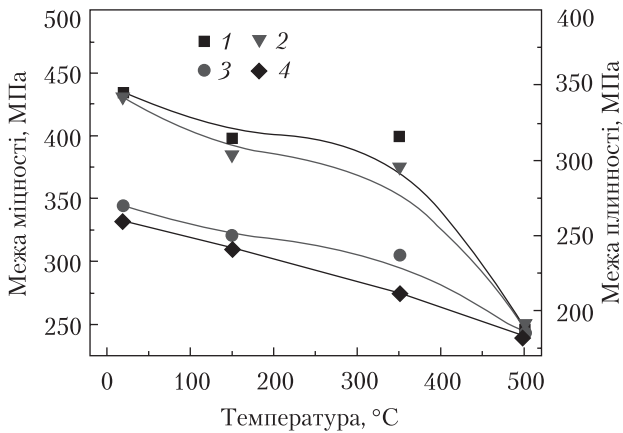


Рис. 4. Механічні властивості композиту *сталь 20—сталь 12X18H10T* (1,3) та композиту *сталь 20—нікель—сталь 12X18H10T* (2,4) в залежності від температури випробувань (1,2— σ_b , 3, 4— σ_{02})



Рис. 5. Фото натурних виробів перехідникових елементів з'єднань трубопроводів АЕС

нержавіючих сталей та дешевої вуглецевої сталі, яка широко використовується в конструкціях машинобудування [8–10].

Аналіз даних мікротвердості складових біметалу поблизу межі після відпалу при 600 °C протягом 50 год показав, що перехідна зона темного кольору має досить високу мікротвердість (700–500 кг/мм²) по відношенню до основної структури аустенітної сталі (220–250 кг/мм²). Висока твердість може бути результатом утворення структури мартенситного типу за рахунок насичення вуглецем та дії розтягуючої напруги, що виникає при охо-

лоджуванні композиту за рахунок відмінності коефіцієнтів лінійного розтягування складових біметалу [9]. Це явище додатково активізує процеси дифузії вуглецю з більш віддалених шарів. Такі структури небажані, оскільки можуть привести до появи крихких руйнувань на межі розділу, особливо при знакозмінних навантаженнях [9, 11]. В композиті *сталь 20—нікель—нержавіюча сталь 12X18H10T*, як показав структурний аналіз зразків після прокатки та після термообробок, структурних змін на межах складових не виявлено.

Мікротвердість сталі 20 на межі з нікелем становить 189 кг/мм², що трохи відрізняється від її значення поза межею (167 кг/мм²). Твердість нікелю складає 189–220 кг/мм².

Мікротвердість нержавіючої сталі біля межі з нікелем дещо нижча ($H\mu = 189\text{--}143$ кг/мм²) в порівнянні з основою далеко від межі ($H\mu = 201\text{--}242,8$ кг/мм²). Ці коливання значень мікротвердості на межах сталі 20 та нержавіючої сталі 12X18H10T можуть бути пов'язані з дифузією нікелю до основних складових композиту.

МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ *СТАЛЬ 20— СТАЛЬ 12X18H10T* ТА *СТАЛЬ 20—НІКЕЛЬ— СТАЛЬ 12X18H10T*

Дослідження механічних властивостей проводили на шаруватих композиційних матеріалах, що склалися з шарів сталі 20 та нержавіючої сталі 12X18H10T, а також з прошарком нікелю між складовими композиту. Для з'ясування впливу тривалої термічної дії на механічні характеристики досліджуваних композиційних матеріалів були проведені відпали композитів при температурі 500 °C впродовж 10 год. Відпал проводили в вакуумі не гірше $2 \cdot 10^{-2}$ Па.

Механічні випробування показали, що композит *сталь 20—сталь 12X18H10T* при 20 °C руйнується з помітною пластичною деформацією. Руйнування композиційного матеріалу після випробувань при кімнатній температурі до і після відпалу при 500 °C проходить по сталі

20. При випробуваннях композиту *сталь 20—нікель—сталь 12X18H10T* руйнування відбувалося також з помітною пластичністю як по сталі 20, так і по прошарку нікелю. Значення границі міцності як для композиту *сталь 20—сталь 12X18H10T*, так і для композиту *сталь 20—нікель—сталь X18H10T* становило 425–445 МПа, а границя плинності — 260–275 МПа. Після відпаалу границя плинності для обох композитів дещо знизилася і становила в середньому 230 МПа. Значення межі міцності композитів *сталь 20—сталь 12X18H10T* та *сталь 20—нікель—сталь 12X18H10T* після відпаалу суттєво не змінилося.

Додатково досліджували механічні властивості композиційних матеріалів *сталь 20—сталь 12X18H10T* та *сталь 20—нікель—сталь 12X18H10T* при температурах 150, 350 та 500 °С. Результати таких досліджень наведені на рис. 4. Як видно з рисунка, при температурах 150 та 350 °С для композитів *сталь 20—сталь 12X18H10T* та *сталь 20—нікель—сталь 12X18H10T* значення границі міцності змінюється несуттєво. З підвищенням температури випробувань до 500 °С спостерігалось суттєве зниження границі міцності обох композитів. Значення границі міцності складає в середньому 250 МПа. Для досліджуваних композицій значення межі плинності в залежності від температури випробувань знижується поступово і після випробувань при 500 °С складає в середньому 180 МПа.

Наведені температурні залежності механічних властивостей композитів *сталь 20—сталь 12X18H10T* та *сталь 20—нікель—сталь 12X18H10T* свідчать про високу міцність і якість твердофазного зварювання.

Ілюстрація натурних виробів перехідникових елементів для з'єднань трубопроводів АЕС наведена на рис. 5.

ВИСНОВКИ

1. Зварюванням в твердій фазі методом високотемпературної вакуумної прокатки отримані міцні нероз'ємні з'єднання нержавіючої сталі типу X18H10T з низьковуглецевою сталлю

20. Оптимальні умови прокатки за один прохід: температура — $1\ 080 \pm 20$ °С; відносний обтиск — 30 ± 2 %; тиск залишкових газів у вакуумній системі стана — не гірше $5 \cdot 10^{-3}$ — $1 \cdot 10^{-2}$ Па.

2. Дослідження структурних змін на межах з'єднання композитів без прошарків та з нікелевим прошарком показали, що після тривалих термообробок при температурах 500 та 600 °С тільки композиція з прошарком нікелю забезпечує збереження високої міцності з'єднання шарів. У композиції *сталь 20—сталь X18H10T* без прошарків неминуче виникають карбідні фази на межах з'єднання, що призводить до зниження міцності внаслідок підвищеної крихкості межі з'єднань, появи мікро- та макротріщин та втрати цілісності композиції.

3. Найбільш перспективними для з'єднання труб із нержавіючої сталі типу X18H10T зі сталлю 20 для роботи в умовах підвищених теплових потоків конструкцій трубопроводів є перехідники з проміжними прошарками нікелю між основними складовими композиту. Така композиція може забезпечити довгострокову експлуатацію конструкційних елементів трубопроводів в інтервалі температур 20–400 °С.

4. Спосіб з'єднання різнорідних матеріалів труб за допомогою перехідників, отриманих методом високотемпературної вакуумної прокатки, доцільно поширювати на інші сортаменти сталей, що використовуються в трубній промисловості.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Современные композиционные материалы*. — М.: Мир, 1970. — 672 с.
2. *Патент* України № 80204, В23К 20\00 // "Спосіб зварювання у твердій фазі металевих пластин", І.М. Неклюдов, Б.В. Борц, І.Е. Вареха, О.Т. Лопата. Оpub. 25.06.2007, Бюл. № 9.
3. *Иванов В.Е., Амоненко В.М., Тронь А.С.* Високотемпературная прокатка в вакууме металлов, сплавов и многослойных материалов // УФЖ. — 1978, т. 23, № 11. — С. 1782–1789.
4. *Борц Б.В., Ванжа А.Ф., Лопата А.Т. и др.* Исследование процесса сварки многослойных структур из кристаллитов различного химического состава с помощью

- горячей прокатки в вакууме // Вопросы атомной науки и техники. Сер. "ФРП и РМ", 2005. — № 5 (88). — С. 156—158.
5. Амоненко В.М., Тронь А.С., Мухин В.В., Тарасов В.А. Вакуумный прокатный стан // Сталь. — 1960. — № 10. — С. 920—922.
 6. Бобылев А.В. Механические и технологические свойства металлов: Справочник. — М.: Металлургия, 1980. — 296 с.
 7. Голованенко С.А. Диффузионное перераспределение элементов в переходных слоях биметаллов // Металловедение и термообработка металлов. — 1969. — № 2. — С. 35.
 8. Строение и свойства биметаллическим материалов. — М.: Наука. — 1975. — 123 с.
 9. Сурицев А.П., Щербединский Г.В., Голованенко С.А. Диффузия углерода в коррозионноустойчивых биметаллах с ферритным плакирующим слоем // Физика и химия обработки материалов. — 1972. — № 2. — С. 119—125.
 10. Кабацкий В.И., Кирьяков В.М., Парфессо Г.И., Дзыкович И.Я. Химическая неоднородность в зоне сплавления сварных соединений сталей перлитного класса с аустенитными швами // Автоматическая сварка. — 1989. — № 10. — С. 33—36.
 11. Голованенко С.А. Выбор системы легирования сталей, применяемых в качестве основного слоя коррозионноустойчивых биметаллов // Металловедение и термообработка металлов. — 1971. — № 1. — С. 47.

*И.М. Неклюдов, Б.В. Бори, А.Т. Лопата,
Н.Д. Рыбальченко, В.И. Сытин*

СОЗДАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ
ПЕРЕХОДНИКОВ ИЗ МАТЕРИАЛОВ 12Х18Н10Т —
СТАЛЬ 20, СВАРЕННЫХ В ТВЕРДОЙ ФАЗЕ,
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА И НАДЕЖНОСТИ
РАБОТЫ ТРУБОПРОВОДОВ АЭС

Методом сварки в твердой фазе на вакуумном прокатном стане изготовлены слоистые композиции из низкоуглеродистых сталей и нержавеющей стали 12Х18Н10Т напрямую и через барьерные прослойки никеля. Иссле-

дованы микроструктура и свойства границ соединения после прокатки и термообработки различной длительности при температуре 500 и 600 °С. Изучены механические свойства композитов в интервале температур 20—500 °С. Сохранение высоких прочностных свойств композита с прослойкой никеля позволяет рекомендовать его к использованию в качестве переходника при сварке труб из разнородных металлов.

Ключевые слова: вакуумная прокатка, слоистые композиты, микроструктура, прочность, термообработка, барьерные прослойки, переходниковые элементы.

*I.M. Neklyudov, B.V. Borts, A.T. Lopata,
N.D. Rybalchenko, V.I. Sytin*

PRODUCTION OF COMPOSITE ADAPTERS
FROM MATERIALS 12X18H10T — STEEL 20
BY WELDED IN SOLID PHASE
FOR THE INCREASE OF SERVICE LIFE
AND OPERATE RELIABILITY
OF PIPELINES OF NPS

Laminated compositions of low-carbon steels and stainless-steel 12Cr18Ni10Ti are produced by the method of welding in solid phase on vacuum rolling mill. These compositions are produced directly or through barrier interlayer of nickel. Microstructure and properties of joint boundaries are investigated after the rolling and thermal treatment at 500 and 600 °C of different duration. Mechanical properties of composites are studied in 20—500 °C temperature range. Keeping of high strength properties of composite with nickel interlayer allows recommending its use as adapters during the fusion welding of tubes of heterogeneous metals.

Key words: vacuum rolling, laminated composites, microstructure, strength, thermal treatment, barrier interlayer, transitional elements.

Надійшла до редакції 06.05.08.