

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.791.754

І.З. Засядько, І.П. Корінець

ЗВАРЮВАННЯ ТОНКОЛИСТОВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Вступ

Використання тонких металів дає можливість знизити масу і габарити зварних конструкцій і, крім того, зменшити їх собівартість, особливо це відчутно при використанні кольорових металів. На даному етапі розвитку зварювальних технологій значне місце посідає питання зварювання тонколистового металу (сталі, алюмінію, міді, титану тощо) в різного роду конструкціях.

Найпоширенішими галузями, де традиційно використовується тонколистовий метал, є авіація, хімічна і харчова промисловість. В авіації — це трубопроводи, турбіни, фюзеляж тощо. Щороку в світі будуються сотні, а то й тисячі різноманітних літаків, на яких зварюються кілометри зварних швів. Хімічна промисловість — це трубопроводи, танки, цистерни, баки тощо. Металеві вироби для цієї галузі характеризуються великою протяжністю зварних швів (у танків, цистерн) та підвищеними вимогами до якості зварних з'єднань. У легкій промисловості, зокрема в харчовій, мало не всі вироби з металів є тонкостінними: холодильні установки, трубопроводи, різноманітні посудини і баки та танки, обладнання для цукрових і молокозаводів. Також тонколистові конструкції знайшли своє застосування в автомобілебудуванні, побутових виробках, будівництві, медицині і навіть у мистецтві [1, 2].

Сучасні методи і технології зварювання тонколистового металу передбачають застосування тепловідводів, різного роду формуючих підкладок [3] чи іншого обладнання, яке б запобігало пропалюванню тонкого металу. Процес характеризується досить малими швидкостями зварювання, що варіюються в діапазоні 5–40 м/год. Це, в свою чергу, негативно впливає на продуктивність, матеріальні витрати на виробництво та, зрештою, на собівартість виробу [4].

Тому на сьогодні актуальним є питання оптимізації параметрів зварювання тонколистового металу з метою забезпечення якісного зварного з'єднання при високій продуктивності процесу зварювання. У зв'язку з цим вже з'я-

вляються нові ідеї в цьому напрямку [5], що пов'язано переважно з появою на ринку нового зварювального обладнання, яке здатне забезпечити необхідні зовнішні характеристики параметрів зварювання, що дають змогу отримувати якісне зварне з'єднання в рамках поставленої задачі.

Постановка задачі

Метою статті є огляд і узагальнення літературних джерел, в яких розглядаються питання зварювання тонколистових металів, описуються способи і технології зварювання плавленням, а також формулюються подальші можливі напрямки досліджень з цієї теми.

Матеріали для тонколистових зварних конструкцій

Для виготовлення різного роду тонколистових зварних конструкцій ($S \leq 4$ мм) використовуються найрізноманітніші матеріали (рис. 1). Це, наприклад, різного роду сталі за легуванням — низько- і високолеговані, низько- і високовуглецеві, за структурним класом — перлітні, феритні, мартенситні та аустенітні, за призначенням — звичайної та високої міцності, а також різноманітні з'єднання сталей [6, 7]. Кожна група сталей має свої певні особливості зварювання плавленням. Зокрема, зварюванням тонколистової сталі типу СН та інших сталей займався А.В. Петров [7]. Сталі є поширеним і різноманітним матеріалом, який має різні механічні, фізичні та хімічні властивості, що впливають на зварюваність.

Алюміній і його сплави є одними з найпоширеніших кольорових матеріалів, які використовуються у виготовленні тонкостінних зварних конструкцій [4, 8]. Проблематикою отримання якісних зварних з'єднань із них займались В.І. Столбов, Г.А. Славін [9, 10], а також і науковці кафедри зварювального виробництва НТУУ “КПІ”: І.М. Жданов, В.В. Лисак, Б.В. Медко [3]. Основною особливістю алюмінію, з точки зору зварювання, є наявність оксидної плівки із значно вищою температурою плавлення, ніж в основного металу. Алюміній характеризується також як метал з досить високою тепло- і електропровідністю, високим коефіцієнтом лінійного розширення, що теж має значний вплив на його схильність до зварювання.

Титан і його сплави [11] мають найбільш несприятливі характеристики для зварювання в

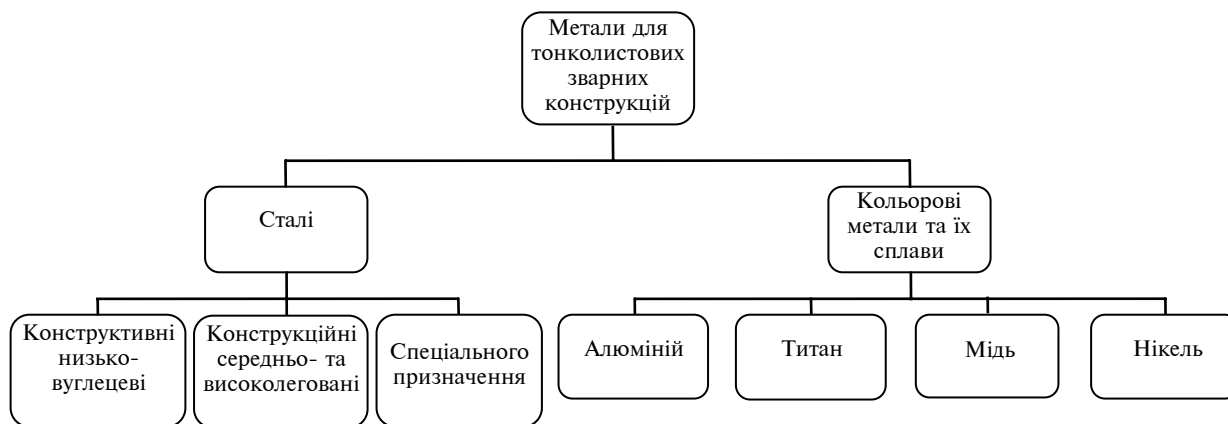


Рис. 1. Метали для тонколистових зварних конструкцій

тонколистових конструкціях. Це пов'язано з високими міцнісними характеристиками даного матеріалу, а також із значною хімічною активністю.

Для виготовлення специфічних і спеціальних тонкостінних зварних виробів використовуються також нікель [12] і мідь [13]. Часто трапляється їх використання в різномірних з'єднаннях. Метали мають свої специфічні особливості щодо зварюваності. Нікель має схожі параметри зварюваності із сталлю, тоді як мідь абсолютно вирізняється з ряду матеріалів, що підлягають зварюванню плавленням.

Способи зварювання плавленням тонколистових матеріалів

Одним із ключових моментів в отриманні якісного зварного шва є спосіб зварювання. Спосіб зварювання є основним фактором також у визначенні продуктивності виготовлення зварних конструкцій. Зварювання плавленням тонколистових матеріалів розвивається і по лінії застосування висококонцентрованих джерел тепла.

Для зварювання тонколистових матеріалів використовуються такі способи зварювання плавленням, які б забезпечували концентроване джерело нагрівання. Джерела нагріву, які відповідають даній вимозі, — це зварювальна дуга, плазма (стиснена дуга), електронний промінь та лазер (рис. 2).

Дугове зварювання неплавким електродом широко використовується у зварюванні тонколистових матеріалів. Для зварювання сталей, міді, нікелю та інших матеріалів використовується дуга постійного струму з різного роду за-

хистом її і зварювальної ванни. Як матеріал електрода зазвичай використовується вольфрам, чистий або з додаванням ітрію, лантану чи торію. За способом захисту дуги і зварювальної ванни цей спосіб розділяється на газовий і газ + активатор. Газовий захист, в свою чергу, ділиться на струменевий та в контрольованій атмосфері. Для струменевого захисту характерні такі гази, як Ar, He, CO₂, N₂, а також їх суміші та суміші на їх основі з додаванням незначної кількості активних газів O₂ і H₂. При зварюванні титану, алюмінію і нікелю використовуються інертні гази та їх суміші, а при зварюванні сталей можливі додавання активних газів. Як захисний газ при зварюванні міді використовується азот, який відносно неї є інертним. Варто зазначити, що склад захисної суміші істотно впливає як на якість зварного з'єднання, так і на форму дуги, що в свою чергу впливає на форму зварного шва. Зварювання в контрольованій атмосфері — дорогий, але дуже дієвий спосіб захисту. Він використовується переважно для захисту від окиснення дуже активних матеріалів — таких, як титан. Газ + активатор — цей спосіб захисту зварювальної дуги і ванни є характерним для зварювання значних товщин металу, хоч при використанні його у зварюванні тонколистових конструкцій досягається збільшення продуктивності та поліпшення хімічного чи структурного стану зварного з'єднання. Також одним з актуальних способів аргоно-дугового зварювання без присадкового матеріалу є спосіб зварювання “дуга в дугу” [5]. При імпульсно-дуговому зварюванні металу товщиною 0,3–0,5 мм рекомендуються такі параметри зварювання: струм чергової дуги — 2,5–3,5 А, витрати захисного газу — 6–

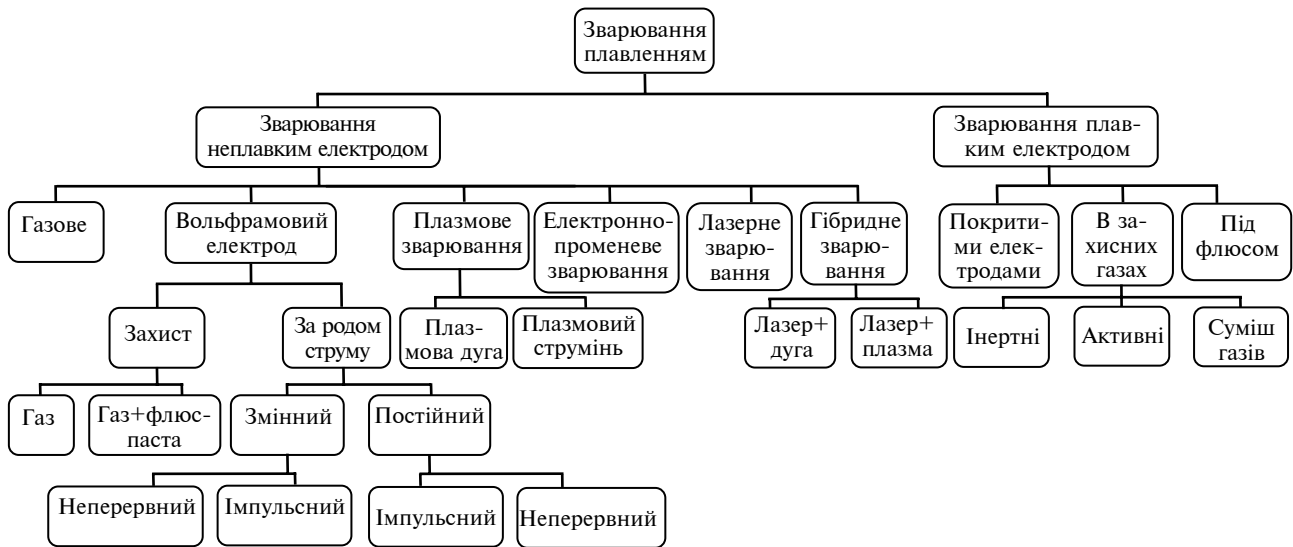


Рис. 2. Способи зварювання плавленням тонколистових металів

9 л/хв, діаметр вольфрамового електрода – 2 мм, зварювальний струм – 12,5–18 А, тривалість імпульсу – 0,16–0,22 с, тривалість паузи – 0,22–0,15 с, швидкість зварювання – 8,6–10,3 м/год.

При застосуванні мідної підкладки важливо забезпечити щільне її прилягання до зварювальних кромки по всій довжині. У місцях, де між підкладкою і кромкою залишаються зазори, процес зварювання супроводжується пропалюванням та просіданням зварного шва [14]. При зварюванні гартівних сталей технологія двостороннього зварювання не забезпечує достатньої стійкості з'єднань проти утворення гарячих та холодних тріщин. Автори визнали доцільною технологією одностороннього зварювання у два шари. В даному випадку повністю використовується одна з істотних переваг зварювання в середовищі аргону – можливість забезпечення стабільної якості зворотного одностороннього шва “на вису” без підкладки.

Стиснена дуга як джерело нагрівання при зварюванні характеризується високою концентрацією тепла, що позитивно впливає на продуктивність процесу, хоч і підвищує собівартість. Розробкою технології і впровадженням мікроплазмового зварювання в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона займався Б.І. Шнайдер [15]. Важливими параметрами цього способу зварювання є склад плазмоутворювальної суміші і захисту. При зварюванні тонколистових матеріалів також важливим є саме концентрація тепла джерела нагрівання, що позитивно впливає не тільки на формування зварного

шва, а й на зону термічного впливу. У праці [16] відзначено порівняно низьку витрату аргону при зварюванні тонколистових матеріалів.

Електронний промінь як джерело нагрівання при зварюванні тонколистового металу застосовується дуже рідко – переважно при зварюванні дорогіших металів або високоточних зварних з'єднань.

Лазерне зварювання на рівні з гібридними (лазер + плазма) джерелами нагрівання показало себе як один із перспективних способів зварювання тонколистових матеріалів. Це пов'язано з фізичною особливістю лазерного променя, а саме характерною малою шириною проплавлення. Якісне формування шва забезпечується комбінуванням лазерного променя з дугою або плазмою.

Значну роль у процесі зварювання тонколистового матеріалу відіграє присадний матеріал. При зварюванні неплавким електродом присадний матеріал зазвичай подається в зону зварювання зовні у вигляді суцільного металевого прутка або зварювання ведеться без присадки. У статті [17] описується як можливий спосіб зварювання тонколистових матеріалів автоматичне зварювання під флюсом. При зварюванні тонколистових матеріалів також використовуються і плавкі штучні електроди. Їх номенклатура надзвичайно різноманітна. Можна зазначити, що цілком очевидним є лише їх досить малі діаметри, які не перевищують зазвичай 3 мм. Звісно ж, їх можна розділити на дві категорії: суцільний зварювальний дріт та порошковий. Наприклад, для зварних конст-

рукцій із сталі хромансиль (30 ХГСА) використовується як захисний газ CO_2 та зварювальні дроти як суцільного перерізу, так і порошкові. До того ж, вони мають діаметр 2 мм, а порошковий – 3 мм, а також різний хімічний склад. Це марки – Св-12 ХМА, Св-10 ГСМ, ЭИ-681, 10 ХЗГНМ, 18 ХГСА. Досліди проводились на сталі 30 ХГСА товщиною 4 мм [6].

За рівнем можливого запровадження механізації і автоматизації в зварюванні тонколистових матеріалів їх можна розділити на ручне – до нього входить ручне зварювання неплавким електродом в захисних газах, ручне дугове покритим електродом, механізоване зварювання плавким електродом, автоматичне лазерне і електронно-променеве, а також автоматичне чи роботизоване дугове зварювання плавким і неплавким електродами.

Загальне уявлення про способи зварювання дає класифікація, наведена на рис. 1 і 2.

Проблеми, які виникають при зварюванні тонколистового металу

Просторова стабільність дуги (блукання дуги).

При зварюванні тонколистового металу важливо вести процес при концентрованому джерелі нагрівання та мінімальних погонних енергіях. Малоамперна дуга, що використовується для зварювання титанових сплавів малих товщин, проявляє схильність до блукання по з'єднуваних деталях, до того ж, незначна зміна її товщини значно впливає на якість зварного з'єднання. Для усунення дефектів від блукання дуги використовують спосіб зварювання в три дуги, коли електроди розміщені один за одним у спільному корпусі. Але це питання, на наш погляд, вивчено недостатньо.

Формування зварного шва "на вису". Варто особливо загострити увагу на значній кількості проблем, пов'язаних саме із зварюванням тонколистових матеріалів. Форма зварного з'єднання та процес кристалізації є ключовими у визначенні механічних властивостей зварного з'єднання. На форму зварного з'єднання впливає низка різноманітних факторів.

В умовах зварювання для конкретних зварювальних матеріалів не існує визначених величин крайових кутів змочування. Кут переходу від поверхні шва до основного металу змінюється в широких межах і не може використовуватись як вихідний параметр при розрахунку форми і розмірів зварних швів. Фундаментальними факторами, що визначають форму

шва, у всіх просторових положеннях є ширина зони проплавлення та кількість наплавленого металу.

Основною складністю зварювання тонколистових матеріалів є пропалювання, однією з причин якого є поява короблення кромки у процесі зварювання. Як показали експерименти, періодично діюча дуга забезпечує більш концентроване введення тепла, ніж неперервно діюча. У статті [8] проводились заміри короблення кромки індуктивним датчиком, а пропалююча дія імпульсної дуги визначалась за допомогою замірів площі проплавленого металу.

У статті [18] відзначалось, що для отримання доброякісних зварних з'єднань при зварюванні швів, які мають кривизну у вертикальній площині, необхідно автоматично регулювати такі основні параметри режиму, як довжина дуги, швидкість зварювання та кут нахилу електрода відносно профілю деталі. Коли неможливо регулювати цей кут, то вплив його можна компенсувати корекцією швидкості зварювання чи струму.

При імпульсному мікроплазмовому зварюванні метал нагрівається і плавиться плазмовою дугою при прямій полярності протягом імпульсу струму. Під час паузи ванночка рідкого металу охолоджується, метал кристалізується і формується зварна точка. Співвідношення часу імпульсу і паузи вибирають так, щоб із врахуванням швидкості зварювання забезпечувалось необхідне перекриття точок.

При зварюванні двохшарових швів тонколистових конструкцій, таких, як труби, наприклад, було відзначено, що при товщині в 1,5 і 2,2 мм при формуванні першого проходу вдається добре формування зворотної сторони шва в межах регулювання сили струму, напруги та швидкості зварювання. А от при 4 мм виникла вгнутість зворотної сторони шва. Позбутися її вдалося за допомогою присадки. Для збільшення ширини другого проходу використовували магнітне керування дугою [14].

При зварюванні тонколистових матеріалів дуже часто виникає проблема утворення пропалювань. У статті В.І. Столбова [19] зроблено висновок: підвищення стабільності зварювальної ванни досягається стабілізацією положення зварних кромки, а також зменшенням тиску дуги і більш рівномірним його розподіленням по площі нагріву.

Щодо самої моделі формування зварного валика, то це питання детально розкрито в [20]. Зокрема, доведено, що лицьова та корене-

ва поверхні шва формуються у хвостовій частині зварювальної ванни, де тиск дуги можна не враховувати. Провисання проплаву значною мірою залежить від ширини шва, і тиск дуги мало впливає на даний параметр. У висновках зазначено, що запропонована математична модель формування шва з наскрізним проплавленням “на вису” задовільно описує основні закономірності цього процесу як в якісному, так і в кількісному відношенні.

Зварюваність

У [21] звернуто увагу на особливості зварювання селеновмісних сталей, зокрема залежність утворення пор від швидкості зварювання – чим вищий вміст селену, тим нижча швидкість зварювання, за якої утворюються пори.

При зварюванні тонколистових високоміцних сталей типу СН має місце розміщення навколошовної зони та металу зварного шва [7]. У статті [4] також вказується на проблему утворення досить широкого прошарку розміщеного металу в зоні термічного впливу при аргонодуговому зварюванні нагартованого сплаву АМг 6 БН. Для вирішення цієї проблеми рекомендують плазмове зварювання.

Недостатньо досліджено також залежність фізико-механічних властивостей тонколистових з'єднань від теплових процесів, які в свою чергу визначають, в основному, спосіб зварювання. У [22] вивчено і зіставлено теплові процеси при різних способах зварювання маловуглецевої тонколистової сталі, а також визначено вплив теплових процесів на деякі фізико-механічні властивості зварних з'єднань. Дослід було проведено на сталі 10кп товщиною 0,9 мм.

Тимчасові і залишкові деформації

Окремою віхою в цьому питанні стоїть проблема деформацій. При зварюванні велику роль відіграє підготовка зварного з'єднання під зварювання. Такі параметри, як зазор, співвідношення, рівність кромок при зварюванні тонколистових матеріалів відіграють чи не вирішальну роль у формуванні якісного зварного з'єднання [15]. Поперечне й поздовжнє скорочення є головною проблемою при зварюванні габаритних тонколистових конструкцій. Для боротьби із зусиллями, що викликають поперечні скорочення, використовують тепловідвідні прижими. Також свою роль у поперечних дефор-

маціях грає зазор: чим він більший, тим більші деформації. Форма тепловідводу впливає на поширення поперечних напружень. У місцях, де між тепловідвідними елементами існує розрив, одразу відзначається ріст напружень поперечного скорочення. Таким чином, підтверджується, що на утворення деформацій в алюмінії, титані та сталі значний вплив має струм, товщина, зазор та кількість проходів.

Поздовжні та поперечні деформації досить істотно залежать від форми зварювальної ванни, швидкості зварювання, зони термічного впливу, швидкості охолодження та, звісно, фізичних властивостей матеріалу. З праць В.І. Махненко [18] випливає, що поняття “тонка пластина” відносне. При цьому припускається, що напружений стан при зварювальному нагріванні близький до плоского. Практично можна вважати, що вказана умова виконується при односторонньому зварюванні, якщо середня ширина шва не менша товщини пластини.

При застосуванні тепловідвідних прижимів змінюється концентрація тепла, що вноситься в зону зварювання. Так, при зменшенні відстані між тепловідвідними прижимами та використанні теплоелектроізолюючого шару на них вдається знизити затрати енергії при зварюванні [3].

Основна ефективність використання тепловідвідних прижимів полягає у збільшенні інтенсивності тепловідведення із зони зварювання, що затримує в часі початок розвитку поперечного скорочення і сприяє швидшому його завершенню на нижчій швидкості. До того ж, відведення тепла із зони зварювання локалізує поперечне скорочення в прилеглій до шва ділянці. Керуючи параметрами охолоджуючого пристрою, можна ефективно впливати на характер термічного циклу і тим самим регулювати кінцеві властивості зварного з'єднання, а вони визначаються як власне структурою металу з'єднання, так і характером розподілення залишкових деформацій.

Значну роль у проблемі деформацій має розрахункове визначення деформацій тонколистових матеріалів у конструкціях, що дає змогу будувати певні прогнози з досить високою точністю [23], а також визначати граничні значення зварювальних деформацій та усадочної сили для різних марок сталей та сплавів.

У статті [23] звернуто увагу на те, що при зварюванні металевих конструкцій, які складаються з листових елементів та ребер жорсткості, часто спостерігається поява хвилястості і

випуклості листових елементів під дією залишкових стискальних напружень.

На боротьбу з виникненням пластичних деформацій при зварюванні тонколистових матеріалів беруть і механічні способи впливу на заготовку. Цією проблемою займалися свого часу С.А. Куркін і В.А. Винокуров [11] із МВТУ. Суть їх полягає у створенні деформацій чи зусиль, протилежних за знаком зварювальним у зоні термічного впливу. Такими способами може бути статичне обжимання заготовок або ж прокатка. Крім того, після зварювання, якщо не вдалося уникнути зміщення кромок, для зменшення негативного впливу від цього застосовують і прокатку зварного з'єднання. Позитивний результат також дають термообробка [11] та ізотермічний відпал у випадку високоміцних сталей.

Позитивний вплив, з точки зору зменшення залишкових зварювальних деформацій, має застосування імпульсної дуги при дуговому зварюванні в захисних газах.

Висновки

Як бачимо, питання зварювання тонколистових матеріалів є багатограним та комплексним. Тому і підхід до покращення технології виготовлення зварних виробів повинен бути так само комплексним і глибоким. Проведений аналіз літературних джерел показав, що існуючі методи зварювання істотно відрізняються за

рекомендаціями, мають значну відмінність даних у рекомендаціях при виборі режимів зварювання, що свідчить про недостатнє вирішення проблеми зварювання тонколистового матеріалу. Більшість із них вимагає модернізації та уточнень. Тому актуальною є задача створення методик оптимізації зварювання та програмного забезпечення для автоматизованого розрахунку параметрів зварювального процесу та їх оптимізації. Це сприятиме створенню нових моделей сучасних джерел живлення та їх систем керування.

Напрямами подальших досліджень з удосконалення процесу зварювання тонколистового металу є:

- 1) удосконалення технології зварювання з використанням доступного дугового зварювання неплавким електродом в аргоні на базі сучасного обладнання з інверторним джерелом живлення;
- 2) дослідження просторової стабільності дуги при зварюванні на високих швидкостях;
- 3) формування шва при зварюванні на високих швидкостях;
- 4) вивчення напружено-деформованого стану в умовах швидкісного зварювання тонколистового металу;
- 5) оцінка доцільності застосування пристроїв для тепловідведення;
- 6) розробка моделі потоків струму і тепла навколо зварювальної ванни.

И.З. Засядько, И.Ф. Коринец

СВАРКА ТОНКОЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Обзорная статья посвящена вопросу сварки тонколистовых металлов и их сплавов. Рассмотрены вопросы способов сварки плавлением, их преимущества и недостатки, проблемы, что возникают при сварке разных металлов. Установлены пути их решения и направления возможных дальнейших исследований.

I.Z. Zasyad'ko, I.P. Korinecy

WELDING OF THIN-SHEET CONSTRUCTIONS

The review paper under scrutiny deals with welding of thin-sheet metals and their alloys. Specifically, we consider advantages and disadvantages of welding melting methods. Also we pay special heed to possible problems at welding of various metals. Moreover, we propose some ways of these problems solving and outline promising research avenues.

1. Петров В.Н. Сварка тонкостенных труб в среде защитных газов // Свароч. пр-во. — 1960. — № 4. — С. 25–27.

2. Синдюкаев Н.П., Кречетов А.Д. Импульсно-дуговая сварка тонкостенных сосудов из нержавеющей стали // Там же. — 1975. — № 5. — С. 38.

3. *Жданов И.М., Медко Б.В., Нифантов В.Н. и др.* Изменение концентрации нагрева с применением теплоотводов // Автомат. сварка. – 1985. – № 5. – С. 51–54.
4. *Соснин Н.А., Щипков М.Д.* Исследование сварки сжатой дугой тонколистовых соединений из сплава АМг6 // Там же. – 1977. – № 12. – С. 19–20.
5. *Мебиус В., Кише М., Шримпф Г. и др.* Аргоно-дуговая сварка тонколистовых конструкций без присадочного металла // Там же. – 1987. – № 12. – С. 46–48.
6. *Каховский Н.И.* Сварка тонколистовой стали хромансиль с защитой углекислым газом // Там же. – 1957. – № 6. – С. 55–58.
7. *Петров А.В., Штрикман М.М.* Свойства сварных соединений тонколистовых сталей типа СН // Там же. – 1961. – № 8. – С. 25–30.
8. *Славин Г.А., Петров А.В., Смирнова С.В. и др.* Автоматическая сварка неплавящимся электродом тонколистовых алюминиевых сплавов импульсной дугой // Свароч. пр-во. – 1965. – № 12. – С. 18–20.
9. *Славин Г.А., Трохинская Н.М., Рязанцев В.И. и др.* Оптимизация параметров режимов ручной и автоматической сварки тонколистовых алюминиевых сплавов с наложением на дугу кратковременных импульсов тока // Там же. – 1986. – № 1. – С. 14–15.
10. *Столбов В.И., Осянкин Г.В.* Свойства соединений тонких листов из алюминиевых сплавов при сварке трехфазной дугой // Там же. – 1973. – № 10. – С. 25–27.
11. *Куркин С.А., Цяо Гуань.* Снятие остаточных сварочных напряжений в тонколистовых элементах из титановых сплавов // Там же. – 1962. – № 10. – С. 3–5.
12. *Казаков Ю.В., Ощев А.О., Бельский А.М. и др.* Структура и свойства соединений тонкостенных деталей из никелевых сплавов при сварке импульсной дугой // Там же. – 1971. – № 4. – С. 35–36.
13. *Куликов Ф.Р., Мишенкова Т.А.* Сварка тонколистовых разнородных материалов медь–константан // Там же. – 1969. – № 8. – С. 44–45.
14. *Мандельберг С.Л., Гордонный В.Г.* Односторонняя двухслойная аргоно-дуговая сварка тонколистовой легированной стали // Автомат. сварка. – 1961. – № 9. – С. 68–73.
15. *Эсибян Э.М., Шнайдер Б.И.* Аргоно-дуговая сварка продольных швов тонкостенных обечаек малого диаметра // Там же. – 1964. – № 12. – С. 65–67.
16. *Дудко Д.А., Лазика С.П.* Сварка тонколистовой стали 1Х18Н9Т сжатой дугой // Там же. – 1961. – № 7. – С. 79–80.
17. *Любавский К.В., Сорокина М.И.* Автоматическая сварка тонколистовых разнородных сталей под флюсом // Свароч. пр-во. – 1959. – № 11. – С. 3–6.
18. *Махненко В.И., Великоиваненко Е.А., Рыбаков А.А.* Деформации в высокотемпературной зоне свариваемых тонких пластин // Автомат. сварка. – 1974. – № 5. – С. 31–35.
19. *Столбов В.И., Масаков В.В.* Образование прожога при сварке плавлением тонких листов // Свароч. пр-во. – 1977. – № 10. – С. 20–22.
20. *Березовский Б.М., Суздаев И.В., Крамаренко А.Г. и др.* Оптимизация формирования швов при дуговой сварке со сквозным проплавлением на весу // Там же. – 1988. – № 3. – С. 29–31.
21. *Ющенко К.А., Высоцкий Ю.Г., Наконечный А.А. и др.* Особенности дуговой сварки полос толщиной 2...4,5 мм из селенсодержащей стали 12Х18Н10Е // Автомат. сварка. – 1987. – № 2. – С. 51–53.
22. *Луневский И.И., Богданов Ю.Г.* Тепловые процессы при сварке деталей из малоуглеродистой тонколистовой стали // Там же. – 1969. – № 6. – С. 5–10.
23. *Жданов И.М., Трочун И.П., Чертов И.М.* Расчетное определение деформаций тонколистовых элементов сварных конструкций // Там же. – 1964. – № 12. – С. 17–23.