

НОСОВ Д.Г., к.т.н., доцент  
ПЕРЕМІТЬКО В.В., д.т.н., професор  
КОЛОМОЄЦЬ І.В., аспірант  
ТАРАН Є.С., студентка  
ХИЖНЯК І.О., студент

Дніпровський державний технічний університет, г. Кам'янське

## ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ МІЦНОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ (ЧАСТИНА І. ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ МІЦНОСТІ ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ)

**Вступ.** Широко розповсюджена думка, що найбільш ефективними заходами підвищення міцності зварних з'єднань при автоматичному зварюванні під флюсом і зварюванні в захисному газі є термообробка звареної конструкції (відпал), наклеп дробом і карбування швів. Так, ці заходи дозволяють підвищити міцність складових зварених деталей при змінних навантаженнях в 1,5...2,0 рази і навіть доводити її до міцності цілих деталей [1], але способи реалізації їх вимагають облаштування виробничої дільниці додатковим обладнанням та використання в майбутньому додаткових енергоносіїв (електроенергії, газу).

**Постановка задачі.** Розплавлення невеликої кількості основного металу і металу шва призводить до зменшення напружень на 60...70%. Одержуваний при цьому плавний перехід від шва до основного металу сприяє підвищенню міцності зварних з'єднань, особливо при динамічному навантаженні [2]. Тому існує необхідність пошуку таких умов отримання зварного з'єднання, які б, з одного боку, забезпечували високу продуктивність процесу, а з іншого – не знижували його міцнісні характеристики.

**Результати роботи.** Умови підвищення міцності зварного з'єднання, наведені у роботі [3], наступні. Для підвищення міцності зварних з'єднань у вузлах і конструкціях, які не можуть піддаватися термічній обробці після зварювання, рекомендується застосовувати підсилювальні накладки, приварені до основного матеріалу точковим зварюванням. Такий же метод конструктивного зміцнення зварного з'єднання можна застосовувати і при роликовому зварюванні [3,4].

Процес дифузії при зварюванні з підігрівом металу сприяє розширенню зони зварювання за рахунок дифузійного переміщення атомів. При зварюванні плавленням має місце кристалізація, що впливає на якість з'єднання. Зварний шов має литу структуру, іноді змінену при наступному нагріванні.

Перегрів металу призводить до отримання грубозернистої структури, що викликає погіршення властивостей зварного з'єднання. При зварюванні плавленням сталей з метою підвищення міцності зварного з'єднання в зварювальну ванну вводять модифікатор, що дозволяє поліпшити структуру металу [5].

Для підвищення міцності зварних з'єднань (рівномірного розподілу напружень в шві) шви при зварюванні виконують в певному порядку. Шви виконують поперемінно з одного і з іншого боку виробу, а, крім того, щоб уникнути викривлення, накладають послідовно в двох протилежних напрямках.

Якщо зварювання ведеться з попереднім укладанням кореневого валика, то для зміцнення зварного з'єднання додатково заварюють з боку виступаючої частини кореня. Для цього з боку кореня за допомогою розмічального різця, що має закруглену вершину, роблять невелику У-подібну канавку, яку потім заповнюють зварювальним швом [6].

Обробка поверхні швів не є засобом підвищення міцності зварних з'єднань при ударі і може призвести навіть до ослаблення з'єднання. Тому рекомендувати її для кон-

струкцій, що сприймають удар, не слід.

Деякі особливості мають заходи для підвищення міцності зварних з'єднань, що працюють при змінній напруги [6].

Міцність з'єднання в стик залежить головним чином від форми переходу шва до основного металу. Для підвищення вібраційної міцності зварних з'єднань іноді застосовуються деякі спеціальні заходи, до числа яких належить механічна обробка поверхні швів. Однак механічна обробка ускладнює технологічний процес виготовлення зварних конструкцій і неминуче призводить до підвищення їх вартості. Тому застосування її не завжди може бути визнано доцільним, тим більше, що підвищення міцності зварних з'єднань може бути досягнуто відповідним виконанням звичайних технологічних вимог без додаткової механічної обробки [6].

В конструкціях загального призначення, для яких навантаження може характеризуватися не тільки наявністю окремих змінних складових, але також і значною часткою постійної складової, застосування поверхневого наклепу не дає такого позитивного ефекту, як в машинобудуванні. Це пояснюється тим, що ступінь підвищення вібраційної міцності при наклепі проявляється головним чином при великій кількості циклів змінного навантаження, що характерно для конструкцій машинобудівного типу. При малій кількості циклів дії змінного навантаження ефект застосування наклепу знижується. Крім того, наклеп знижує пластичність металу, що є небажаним для конструкцій, працюючих в умовах низьких температур.

У цьому випадку, як показали результати низки досліджень, вельми корисним для міцності конструкцій виявляється їх попереднє навантаження, яке повинне проводитися при плюсовій температурі. Попереднє навантаження виявляється також корисним і для конструкцій, що працюють в умовах вібраційного навантаження, тому його можна рекомендувати як міру підвищення міцності зварних з'єднань при будь-яких умовах експлуатації. В якості такого попереднього навантаження цілком доцільним є пробне випробування конструкцій, проведене при здачі їх в експлуатацію. [6].

Ефективним засобом підвищення міцності зварного з'єднання є збільшення ширини зони посилення винесення концентратора (лінії контакту) за межі оброблення [7].

Для підвищення міцності зварних з'єднань в промисловості використовують різні способи зварювання: в умовах жорсткого закріплення з'єднуються крайок одностороннім двошаровим дуговим зварюванням із застосуванням вібрації електрода; прокатку металу шва; розкочування звареного виробу. В зазначених способах за рахунок зміни умов кристалізації металу шва, теплового впливу або поліпшення структури литого металу досягають деякого підвищення механічних властивостей [7].

Ще одним способом підвищення міцності зварних з'єднань при змінних навантаженнях є наклеп дробом і карбування. У дослідях на зварних лабораторних зразках дробоструминною обробкою вдавалося підвищити міцність більш ніж в 1,5 рази і навіть довести міцність до міцності цілих зразків, міцність з'єднань електрошлаковим зварюванням вдавалося підвищити в 2 рази. [8].

У деяких випадках рекомендується проводити зварювання за методом гвинта. Цей метод забезпечує підвищення міцності зварного з'єднання, але зовнішній вигляд його погіршується. Щоб отримати шов за методом гвинта, зварювальним швам необхідно надавати обертальний рух і одночасно вдавлювати в основний матеріал [8]. Додатковий прошарок в різній мірі сприяє підвищенню міцності зварного з'єднання. Зварне з'єднання виникає в тонкому шарі, зона зварювання має плівковий характер. Збільшенню товщини шару зварювання і підвищенню міцності зварного з'єднання можуть сприяти процеси взаємного розчинення, дифузії і кристалізації металу поєднаних частин, що протікають більш повільно [9].

До числа інших процесів, що поліпшують зчеплення металів, слід віднести дифу-

зію, розчинення, змочування, рекристалізацію та ін. Розвиток цих процесів сприяє збільшенню поверхні зчеплення і сил зв'язків, підвищенню міцності зварного з'єднання [10].

Проте найбільшим недоліком застосування механічної обробки зварного з'єднання – це ризик утворення тріщин. Холодні поздовжні тріщини – найбільш поширений дефект навколошовної зони при зварюванні середньолегованих сталей перлітного і мартенситного класу. Причини появи цих тріщин тут ті ж, що і у низьколегованих термозміцнених сталей, проте чутливість значно більша і, до того ж, різко зростає з підвищенням міцності зварних з'єднань [11].

Все більше уваги приділяють підвищенню міцності зварних конструкцій, що працюють при динамічних і, зокрема, змінних навантаженнях, в умовах низької і нормальній частоті, різних середовищ. Головну увагу приділяють підвищенню міцності зварних з'єднань і конструкцій, що працюють при змінних навантаженнях, визначенню методів термообробки, що підвищують межу текучості матеріалу, усуненню концентраторів при проектуванні, шляхом технологічної обробки. В ІЕЗ ім. Е.О.Патона розроблено різні методи механічної поверхневої обробки зварних з'єднань (дробом, пучком дротів, вибухом), що підвищують межу витривалості зварних з'єднань при дуговому зварюванні в 2 рази, при точковому – більш ніж в 3 рази [12].

Термомеханічна обробка (ТМО) може бути використана з метою підвищення міцності зварних з'єднань в основному вуглецевих і низьколегованих сталей. Для цього доцільно застосовувати проковку або плющення зварного шва, нагрітого до 850...950°C. При подальшому охолодженні підвищується міцність металу шва, і певною мірою успадковується підвищена щільність дислокацій, створена в процесі деформації. Якщо метал містить елементи, здатні викликати дисперсійне зміцнення (ванадій, азот, титан і ін.), то ефект зміцнення збільшується. Як правило, деяке збільшення товщини шва сприяє підвищенню міцності зварних з'єднань, що працюють під статичними навантаженнями.

При змінних навантаженнях зазначені методи призводять до підвищення міцності зварних з'єднань. При зварюванні легованих термічно оброблених сталей, наприклад, хромансиль і ін., найменшу міцність при змінних навантаженнях в зварному з'єднанні має основний метал в зоні відпускання. Аналогічне зниження межі витривалості в зоні відпускання має місце в зварних з'єднаннях термічно оброблених кольорових сплавів (алюмінієвих, магнієвих і ін.). Руйнування, як правило, відбувається близько стикових швів при знижених значеннях межі витривалості в порівнянні з межею витривалості основного металу в термічно обробленому стані. Заходом, що підвищує міцність зварних з'єднань легованих сталей при змінних навантаженнях, є застосування термічної обробки зони зварювання. Термічна обробка часто повністю не відновлює міцність елемента, яка була до зварювання, але все ж часткове відновлення досягається. Розроблено також спосіб підвищення міцності при змінних навантаженнях для з'єднань з низьковуглецевих сталей. Для підвищення міцності зварні з'єднання піддаються поверхневій механічній обробці, обкатці роликми або, що є більш простим і зручним, обдуванню дробом.

Ще одним способом підвищення міцності зварного з'єднання при виготовленні металоконструкцій є установка шпильок. Цим досягається збільшення площі зчеплення наплавленого металу з деталлю. Кількість шпильок вибирається з таким розрахунком, щоб отвори під них не послабили міцність деталі. Проте, на деяких ділянках виникають окремі (досить слабкі) вузли. Збільшення часу зварювання призводить до надмірної деформації, виникнення тріщин. Останні свідчать про досить інтенсивні теплові процеси, що протікають в зоні зварювання. Зміна режиму зварювання, наприклад, збільшення часу зварювання, до підвищення міцності зварних з'єднань не призводить.

Відомі способи обробки зварних швів ультразвуком для підвищення їх механічних властивостей.

Ефективність ультразвукової обробки підвищується зі збільшенням міцності сталі за умови використання одного і того ж режиму проковки. Однак і при ультразвуковій обробці основних типів зварних з'єднань конструкційних сталей відносно низької міцності спостерігається істотне підвищення межі витривалості. Ці дані показують, що при обробці зазначених сталей підвищення межі витривалості сягає 100%.

Відомі способи підвищення міцності зварних з'єднань після відпуску з температур нижче 600°C. При зварюванні конструкційних сталей (вуглецевих і середньолегованих), щоб уникнути гартування, утворення тріщин, зміни структури необхідно застосувати в залежності від хімічного складу сталі попередній нагрів до 300°C з подальшим після зварювання відпалом чи відпуском. Але так само, як і характер деформування металу в процесі зварювання, в зоні з'єднання утворюються зони нерівномірного напруженого стану, що характеризується нестабільністю і здатністю внаслідок цього релаксувати [13].

При дуговому зварюванні слід застосовувати переважно постійний струм та використовувати електроди, що забезпечують метал шва необхідними властивостями. Для підвищення міцності зварного з'єднання в метал, що наплавляється, вводять легуючі елементи (марганець, кремній, хром, титан), які сприяють отриманню дрібнозернистої структури, проводять пошарове проковування шва, накладають валики малого перетину, виконують місцеве охолодження наплавленого металу тепловідвідними мідними прокладками або водою для уникнення перегріву зони зварювання [14].

Ще одним способом підвищення механічних властивостей зварного з'єднання є застосування електродного дроту, який за хімічним складом відрізняється від основного металу. Наприклад, електродний дріт марки Св-18ХМА доцільно застосовувати з метою підвищення міцності зварних з'єднань при статичних, вібраційних і повторних статичних навантаженнях при зварюванні таких сталей, як 09Г2С, 15ХГСА [16].

Відомою причиною руйнування зварних конструкцій є залишкові внутрішні напруження. Одним із заходів зняття зварювальних напружень є розплавлення ділянки переходу від шва до основного металу. При цьому порушується рівновага внутрішніх сил напруженого поля внаслідок переходу частини металу в рідкий і пластичний стан. Природно, що при кристалізації розплавленого металу буде знову виникати напруження, проте воно порівняно мале, так як кількість цього металу у багато разів менша, ніж металу шва. Розплавлення невеликої кількості основного металу і металу шва призводить до зменшення напружень на 60...70%. Одержуваний при цьому плавний перехід від шва до основного металу сприяє значному підвищенню міцності зварних з'єднань при змінних навантаженнях [15].

Однак, нами не було знайдено конкретних методик та рекомендацій з впровадження даної технології.

**Висновки.** Таким чином, міцність зварних з'єднань може бути підвищена механічною, термічною або термомеханічною обробкою, ультразвуковою обробкою, а також шляхом застосування відмінних за складом від основного металу зварювальних дротів.

При їх перевагах значним недоліком є ускладнення технологічного циклу виготовлення зварної металоконструкції, що невід'ємно призводить до збільшення собівартості її виготовлення.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Березовский Б.М. Математические модели дуговой сварки: в 3-х томах. Т. 1 / Березовский Б.М. – Челябинск: изд-во ЮУрГУ, 2002. – 625с.
2. Березовский Б.М. Математические модели дуговой сварки: в 3-х томах. Т. 2 /

- Березовский Б.М. – Челябинск: изд-во ЮУрГУ, 2003. – 584с.
3. Березовский Б.М. Математические модели дуговой сварки: в 3-х томах. Т. 3 / Березовский Б.М. – Челябинск: изд-во ЮУрГУ, 2004. – 573с.
  4. Березовский Б.М. Математические модели дуговой сварки: в 7 т. Том.4. Основы тепловых процессов в свариваемых изделиях / Березовский Б.М. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. – 547с.
  5. Ковалев И.М. Аргонодуговая сварка труб из стали 1X18H10T неплавящимся электродом с формированием шва в поперечном магнитном поле / И.М.Ковалев, Е.М.Кричевский, В.М.Львов // Сварочное производство. – 1975. – №5. – С.15-17.
  6. Измельчение структуры металла шва при сварке дуговой, колеблющейся в поперечном магнитном поле / А.М.Болдырев, Ю.С.Ткаченко, М.П.Талаконников, Е.Б.Дорофеев, С.Д.Никитин // Автоматическая сварка. – 1975. – №7. – С.70-71.
  7. Рыжов Р.Н. Внешние электромагнитные воздействия в процессах дуговой сварки и наплавке (обзор) / Р.Н.Рыжов, В.Д.Кузнецов // Автоматическая сварка. – 2006. – № 10. – С.36-44.
  8. Nosov D.G. Effect of Some Overlay Welding Regime with Longitudinal Magnetic Field on Hardness, Phase Composition and Welded Layer Wear by Arc Method with Flux Metal Wire / D.G.Nosov, V.V.Peremitko, M.H.Barashkin // OP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016. – P.8-16.
  9. Рыжов Р.Н. Применение комбинированных электромагнитных воздействий для улучшения качества швов при сварке / Рыжов Р.Н. // Автоматическая сварка. – 2005. – №7. – С.159-161.
  10. Размышляев А.Д. Влияние управляющих магнитных полей на геометрические размеры шва при дуговой сварке под флюсом А.Д. Размышляев, В.Р.Маевский // Сварочное производство. – 1996. – №2. – С.17-19.
  11. Иофинов П.А. Влияние внешнего электромагнитного поля на скорость плавления электродной проволоки при автоматической наплавке под флюсом / П.А.Иофинов, В.С.Ибрагимов, А.К.Дмитриенко // Сварочное производство. – 1991. – №1. – С.34-35.
  12. Nosov D.G. Influence of Frequency and Induction of Longitudinal Magnetic Field on the Electrode Metal Loss and its Spattering during MAG-Welding / D.G.Nosov, V.V.Peremitko / OP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2015. – P.46-51.
  13. Сварка и свариваемые материалы: в 3-х т. Т. 1. Свариваемость материалов: справ. изд. / под ред. Э.Л.Макарова. – М.: Металлургия, 1991 – 528с.
  14. Сварочная ванна: Википедия: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Сварочная\\_ванна](https://ru.wikipedia.org/wiki/Сварочная_ванна).
  15. Визначення механічних властивостей металу та зварних з'єднань: Diex: URL <http://ua.tuev-dieks.com/services/technical-diagnosis/methods-of-survey/opredelenie-mexanicheskix-svoystv-metalla/>.
  16. Повний факторний експеримент: Мелітопольський державний педагогічний університет: URL [http://lib.mdpu.org.ua/e-book/teor\\_plan/Lecture1/Lecture1.html](http://lib.mdpu.org.ua/e-book/teor_plan/Lecture1/Lecture1.html).

*Надійшла до редколегії 16.10.2018.*