



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 60390

(13) C2

(51) 7 B24B39/04,C21D1/04

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІОПИС  
ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД(54) СПОСІБ ОБРОБКИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ ВИСОКОЧАСТОТНОЮ ПРОКОВ-  
КОЮ

1

2

(21) 2001064020

(22) 12 06 2001

(24) 15 10 2003

(46) 15 10 2003, Бюл. № 10, 2003 р

(72) Лобанов Леонід Михайлович, Міхеев Павло  
Петрович, Прокопенко Георгій Іванович, Книш Ві-  
талій Васильович, Кудрявцев Юрій Пилипович,  
Мордюк Богдан Миколайович, Клейман Яков Іса-  
кович, СА(73) Лобанов Леонід Михайлович, Міхеев Павло  
Петрович, Прокопенко Георгій Іванович, Книш  
Віталій Васильович, Кудрявцев Юрій Пилипович,  
Мордюк Богдан Миколайович, Клейман Яков  
Ісакович, СА

(56) UA 12741 C1, 28 02 97

UA 23001, 30 06 98

RU 2133282 C1, 20 07 99

Trufyakov V. I., Mikheev P. P., Kudryavtsev Yu. F.  
Fatigue strength of Welded Structures Residual  
Stresses and Strengthening Treatments Harwood  
academia publishers - Vol 3, part 2 - 1995 - 100p(57) Спосіб обробки зварних з'єднань метало-  
конструкцій високочастотною проковкою, що включає  
дію ультразвуковим ударним інструментом із за-  
даною амплітудою зміщення вихідного торця пе-  
ретворювача у зонах концентрації напружень, які  
розташовані уздовж лінії сплавлення шва з основ-  
ним металом, шляхом створення нормованих по  
величині залишкових напружень стиску  $\sigma_{ост}^{nc}$ , які  
обчислюють за формулою

$$\sigma_{ост}^{nc} = \left[ \sigma_{\tau}^{cm} + \frac{2\alpha_{\sigma} R_{\sigma} \left( \sigma_B + \frac{\sigma_{\tau}^{cm}}{\alpha_{\sigma}} \right)}{(1 - R_{\sigma}) \left[ \frac{\sigma_B - \frac{\sigma_{\tau}^{cm}}{\alpha_{\sigma}}}{\sigma_a^n} + 2 \right]} \right]$$

де  $\sigma_{ост}^{nc}$  - нормовані залишкові напруження сти-  
ску, при яких мінімальні напруження циклу від  
зовнішнього навантаження в зоні концентратора  
досягають межі плинності матеріалу  $\sigma_{\tau}^{cm}$  при  
стиску,  $\sigma_B$  - межа міцності матеріалу,  $\alpha_{\sigma}$  - тео-  
ретичний коефіцієнт концентрації напружень,  $R_{\sigma}$  -  
коефіцієнт асиметрії циклу,  $\sigma_a^n$  - гранична  
амплітуда напружень циклу зварного з'єднання у  
вихідному стані з високими залишковими напру-  
женнями розтягу, який відрізняється тим, що ре-  
жими обробки ультразвуковим ударним  
інструментом добирають на контрольних зразках  
таким чином, щоб досягти заданих значень  $\sigma_{ост}^{nc}$   
за найменший час, при цьому ширину зони оброб-  
ки вибирають такою, що дорівнює діаметру удар-  
ного інструмента, вимірюють глибину канавки, що  
утворилася на контрольному зразку в результаті  
обробки, а обробку зварних з'єднань метало-  
конструкцій проводять на вибраних режимах до досяг-  
нення необхідної глибини канавки

(13) C2

(11) 60390

(19) UA

Винахід відноситься до технологічного застосування потужних ультразвукових коливань (УЗК) для поверхневої зміцнюючої обробки металевих виробів і, насамперед, зварних з'єднань металоконструкцій ударними імпульсами, які слідує з високою частотою. Він може бути використаний в машинобудуванні, суднобудуванні, мостобудуванні та інших галузях промисловості і будівництва, які пов'язані з виробництвом і експлуатацією зварних конструкцій відповідального призначення, що працюють в умовах динамічного і особливо повторно-змінного навантаження, для запобігання передчасної появи втомних тріщин і руйнування в зоні зварних з'єднань.

Для зміцнення і релаксационної обробки зварних з'єднань конструкцій використовують різноманітні ударні методи: магнітоімпульсний, низькочастотна проковка пневмоінструментом, дробоструменеву обробку та інші (Данилов Г.И., Леонов В.П., Золотое В.Ф. и др. Эффективность технологических методов повышения циклического ресурса сварных узлов ледостойких стационарных буровых установок // Вопросы материаловедения - 1996 - №2 - С 15-22). Однак вони відрізняються значною енергоємністю, невеликою продуктивністю, створюють значний шум, який часто перевищує допустимі норми. З цієї метою використовують також потужні ультразвукові коливання, які трансформуються в високочастотні ударні імпульси деформуючих елементів (кульок або стрижнів), що діють на поверхню деталей чи конструкцій (А.С. СССР №472782 Опубл. 05.06.75 Бюлл. №21). Сила удару цих елементів залежить від їх маси, амплітуди коливань вихідного торця ультразвукового перетворювача, радіусу їх заокруглення і від швидкості на момент контакту з поверхнею, що піддається обробці. Режими обробки того чи іншого матеріалу або зварного з'єднання регламентують способи ультразвукової ударної обробки (Пат. України №12741 Надрук. 28.02.97 Бюл. №1). У згаданому вище аналогу оптимальну тривалість обробки обчислюють за допомогою спеціального операційного технологічного комплексу. Для цього на магнітострикційний перетворювач подають знакозмінну електричну напругу в імпульсному режимі. При відсутності напруги перетворювач продовжує коливатись з деяким згасанням. При стабілізації цього згасання обробку закінчують. Проте очевидно, що такий спосіб можна застосовувати для обмеженої кількості матеріалів, механічні властивості яких суттєво змінюються у процесі обробки. Більш міцні матеріали, які потребують значної тривалості обробки, будуть оброблятися менше, ніж потрібно, бо згасання власних коливань перетворювача буде при цьому практично однаковим з початку обробки. Тому для кожного матеріалу та типу зварного з'єднання необхідно створювати свою оптимальну технологію обробки, яка дає максимальний корисний ефект при мінімальних енергетичних і трудових витратах. Основним критерієм, що до збільшення циклічної довговічності зварних металоконструкцій є створення нормованих по величині і характеру розподілу залишкових напружень стиснення у зоні, прилеглій до зварного шва, які виникають при пластичному деформуванні по-

верхні металів.

Найбільш близьким до способу, який пропонується, є відомий спосіб обробки зварних металоконструкцій переважно із сталі, який включає дію ультразвуковим ударним інструментом з заданою амплітудою зміщення вихідного торця ультразвукового перетворювача в зоні, яка прилягає до зварного шва, для збільшення циклічної довговічності зварних металоконструкцій шляхом створення нормованих по величині і характеру розподілу залишкових напружень стиску в зоні біля шву (Пат. України №23001 Надрук. 30.06.98 Бюл. №3). При цьому вибір амплітуди коливань вихідного торця ультразвукового перетворювача А здійснюється згідно з емпіричним виразом

$$2,24 \leq \frac{4\lambda A f^2 m}{\sigma_T R_2} \leq 3,36 \quad (1)$$

де  $f$  - частота ударних імпульсів,  $m$  - маса ударника,  $\sigma_T$  - межа плинності матеріалу, що обробляється,  $R$  - радіус ударника. При цьому в зварних конструкціях із низько-вуглецевих сталей обробку здійснюють в зоні, обмеженій лінією, по якій пройшла первинна рекристалізація, а в конструкціях із легованих і високоміцних сталей ця зона обмежена лінією, по якій пройшов низький відпуск. В якості оптимальної величини наведених залишкових напружень стиску тут прийняті значення  $1,2 \cdot 1,5\sigma_T$  в поверхневому шарі товщиною 0,1-0,2 мм при загальній глибині залягання залишкових напружень 1,0-1,2 мм.

Одним з недоліків даного способу є те, що обробку зварних з'єднань різних сталей треба здійснювати в зонах, обмежених відповідними ізотермами, які знаходяться на відстані 3-5 мм для низько-вуглецевих сталей та 9-15 мм для легованих і високоміцних сталей від лінії сплавлення. В той же час нормовані по величині і характеру розподілу напруження стиску приймаються такими, що дорівнюють максимально досяжним їх значенням, які перевищують межу плинності  $1,2 \cdot 1,5$  рази. Однак при цьому не враховуються умови подальшого циклічного навантаження, такі як коефіцієнт асиметрії циклу, концентрація напружень, яка обумовлена формою зварного з'єднання і способом зварювання, а також інші фактори, що суттєво змінюють опір втомі зварних з'єднань і ступінь впливу залишкових напружень на їх циклічну довговічність. Тому нормована величина створених ультразвуковою ударною обробкою залишкових напружень стиску в зонах концентраторів, при якій досягається максимально можливе підвищення межі витривалості і збільшення циклічної довговічності з'єднання, повинна встановлюватися диференційовано, тобто в залежності від вище згаданих факторів. Величина цих напружень залежить при інших рівних умовах від часу обробки одиниці площини, або продуктивності обробки. В відомому способі амплітуда  $A$  визначається із співвідношення (1), а час обробки не вказано. Але передбачається, що він повинен бути достатнім для створення напружень стиску на рівні  $1,2 \cdot 1,5\sigma_T$  у відповідних зонах. Досвід показує, що для цього потрібні значні витрати часу, тому відомий спосіб відрізняється низькою продуктивністю. Вказані недоліки не

дають можливості цілеспрямованого вибору технологічних параметрів ультразвукової ударної обробки, що ускладнює її оптимізацію і досягнення очікуваного технічного результату, який полягає в максимально можливому зростанню втомної міцності зварних з'єднань різноманітних матеріалів при значному скороченні часу їх обробки.

Важливою задачею в розвитку технології ультразвукової ударної обробки, або високочастотної проковки, є більш обґрунтована оптимізація технологічних параметрів по критерію створюваних в зонах концентраторів залишкових напружень стиску. При цьому необхідно встановити такі значення нормуючих залишкових напружень стиску для металів різної міцності, які забезпечать при інших рівних умовах максимально досягненні підвищення межі витривалості і збільшення циклічної довговічності зварних з'єднань різних типів.

В основу винаходу поставлена задача вдосконалення і значного підвищення продуктивності способу обробки зварних з'єднань металоконструкцій із сталей і сплавів високочастотною проковкою, що включає дію ультразвуковим ударним інструментом в областях концентрації напружень, які розташовані уздовж лінії сплавлення шва з основним металом, шляхом створення нормованих по величині залишкових напружень стиску, при яких амплітуда циклічних напружень від зовнішнього навантаження досягає межі плинності матеріалу при стиску -  $\sigma_{\tau}^{cm}$  у цих областях. При цьому в залежності від асиметрії циклу, типу з'єднань, коефіцієнту концентрації напружень і механічних властивостей матеріалу необхідна величина залишкових напружень стиску при обробці суттєво змінюється і може бути значно меншою ніж  $\sigma_{\tau}^{cm}$ . Окрім цього обробка зварних з'єднань сталей і сплавів будь-якої міцності провадиться за допомогою ультразвуку стрижневими ударними інструментами діаметром 2-5 мм, розташованими в один ряд, кількістю від 1-го до 5-ти і більше (в залежності від конструкції і інструменту). Обробка здійснюється в області концентрації напружень, тобто по лінії сплавлення на ширину 1-2,5 мм по обидві сторони від даної лінії. При цьому формується канавка вказаної ширини і глибиною від 0,2 до 1,0 мм.

Запропонований спосіб дозволяє забезпечити цілеспрямовану високочастотну проковку зварних з'єднань різноманітних матеріалів в залежності від типу шва, асиметрії циклу зовнішнього навантаження та інших чинників. Для досягнення максимально можливого підвищення межі витривалості зварних з'єднань виключається необхідність формування залишкових напружень стиску, які згідно з прототипом повинні дорівнювати  $1,2-1,5\sigma_{\tau}$  - межі плинності матеріалу. При цьому в області впливу знакозмінних напружень від зовнішнього навантаження необхідні рівні залишкових напружень, сформовані такою обробкою, можуть бути суттєво нижчі за  $\sigma_{\tau}^{cm}$  металів і сплавів, а їх величина встановлюється розрахунковим методом.

Так, нормуючу величину залишкових напружень стиску в зоні концентратора, в залежності від згаданих факторів для зварних з'єднань, визначають згідно з наступним співвідношенням (Trufiyakov V.I., Mikheev P.P., Kudryavtsev Yu.F. Fatigue

strength of Welded Structures Residual Stresses and Strengthening Treatments Harwood academic publishers - Vol 3, part 2 -1995,-100p )

$$\sigma_{ост}^{nc} = \sigma_{\tau}^{cm} + \frac{2\alpha_{\sigma} R_{\sigma} \left( \sigma_B + \frac{\sigma_{\tau}^{cm}}{\alpha_{\sigma}} \right)}{\left( 1 - R_{\sigma} \right) \left[ \frac{\sigma_B - \frac{\sigma_{\tau}^{cm}}{\alpha_{\sigma}}}{\sigma_a^n} + 2 \right]}$$

де  $\sigma_{ост}^{nc}$  - нормовані залишкові напруження стиску, при яких мінімальні напруження циклу від зовнішнього навантаження в зоні концентратора досягають межі плинності матеріалу  $\sigma_{\tau}^{cm}$  при стиску,  $\sigma_B$  - межа міцності матеріалу,  $\alpha_{\sigma}$  - теоретичний коефіцієнт концентрації напружень,  $R_{\sigma}$  - коефіцієнт асиметрії циклу,  $\sigma_a^n$  - гранична амплітуда напружень циклу зварного з'єднання у вихідному стані з високими залишковими напруженнями розтягу.

Таким чином, на відміну від прототипу, ударна обробка зварних з'єднань металоконструкцій всіх типів провадиться не в зонах шириною 3-15 мм, а лише по лінії сплавлення, де концентрація напруг найбільша. Ширина області, яка формується в процесі обробки, пов'язана виключно з діаметром ударних інструментів і дорівнює, як правило, 2-5 мм. В ній локалізовані концентратори напружень і максимальні розтягуючі залишкові напруги 1-го роду, а також накопичуються різноманітні дефекти зварювання. Тому обробка більш широких зон, як у прототипі, не дає корисного ефекту, а тільки збільшує час обробки. Режимі обробки (амплітуда коливань ультразвукового випромінювача, розмір і кількість ударників, швидкість переміщення інструменту уздовж шва, сила притиснення інструменту до конструкції) добираються такими, щоб забезпечити необхідний рівень залишкових напружень стиснення  $\sigma_{ост}^{nc}$ .

В той же час після обробки залишається канавка шириною 2-5 мм і глибиною від 0,2 до 1 мм. Розміри канавки в різних матеріалах приблизно пов'язані з величиною напружень стиснення. Тому оцінка цих розмірів і візуальний огляд канавки значно спрощують аналіз якості і завершеності процесу обробки, що може бути використано для експрес-контролю її режимів замість вимірювань  $\sigma_{ост}^{nc}$ , які здійснюються переважно на контрольних зразках. Створення залишкових напружень стиску  $\sigma_{ост}^{nc}$  високочастотною проковкою в області концентрації напружень забезпечує максимально можливе підвищення межі витривалості зварних

з'єднань при суттєвому скороченні часу обробки

На Фіг 1 показано графік залежності нормованих залишкових напружень стиску  $\sigma_{ocm}^{nc}$  від коефіцієнту асиметрії циклу зовнішнього навантаження для стикових з'єднань сталей, згрупованих по трьом класам міцності: низько-вуглецева -  $\sigma_T \sim 300 \text{ МПа}$  (1), легована -  $\sigma_T \sim 400 \text{ МПа}$  (2), високоміцна -  $\sigma_T \sim 600 \text{ МПа}$ . На Фіг 2 показано такий самий графік залежності  $\sigma_{ocm}^{nc}$  від  $R_\sigma$  для сталей, розташованих у тому ж порядку: 1 - низько-вуглецева, 2 - легована і 3 - високоміцна, але для зварних з'єднань з поперечними кутовими швами. Наведені дані свідчать про суттєвий вклад асиметрії циклу на оптимальну величину залишкових напружень стиску, які треба сформувати в зонах концентраторів високочастотною проковкою. Вони повинні забезпечити максимально можливе підвищення межі витривалості і збільшення циклічної довговічності зварних з'єднань. З графіків на Фіг 1 і Фіг 2 видно, що необхідні рівні залишкових напружень, які треба досягти за допомогою поверхневої деформації, можуть бути значно нижчі межі пластичності  $\sigma_T^{cm}$  відповідного матеріалу і лише при відношенні  $R_\sigma = 0$  вони дорівнюють  $\sigma_T^{cm}$ . На практиці такі залежності оброблюються за допомогою комп'ютерних програм для конструкційних матеріалів різноманітних марок і різних типів зварних з'єднань і зберігаються в пам'яті комп'ютера. При потребі ці дані використовуються для вибору режимів високочастотної проковки зварних швів.

Реалізація способу обробки зварних з'єднань металоконструкцій базується в першу чергу на розрахунках нормованих залишкових напружень стиску  $\sigma_{ocm}^{nc}$ , які треба створити в зоні концентраторів уздовж шва, щоб забезпечити максимально можливе підвищення межі втомної витривалості. Після визначення  $\sigma_{ocm}^{nc}$  необхідно вибрати оптимальний режим обробки за допомогою ультразвукового генератора і магніострикційного або п'єзокерамічного перетворювачів, коливання яких трансформуються в високочастотні ударні імпульси за допомогою стрижнів-ударників різного діаметру. В залежності від міцності матеріалу, який обробляється, провадиться вибір потужності ультразвукового обладнання  $P$  у межах 0,25 - 1,0 кВт, амплітуди ультразвукових коливань ( $L = 20 - 35 \text{ мм}$ ) і діаметру бойків (2-5 мм). Потужність і амплітуда прямо пропорційні  $\sigma_T$ , а діаметр бойків потрібно вибирати більшим для менш міцних матеріалів. Основними параметрами режиму обробки є: діаметр бойків -  $d$ , кількість бойків -  $n$ , радіус заокруглення кінцевої частини бойків -  $R$ , продуктивність обробки  $Q = L/T$ , де  $L$  - довжина ділянки шва, яка обробляється,  $T$  - час обробки,  $F_{cm}$  - зусилля притискання інструменту до деталі,  $V$  - швидкість про-

сування інструмента уздовж шва.  $F_{cm}$  дорівнює 40-50 Н і є постійною для всіх режимів обробки. Оптимізація режимів здійснюється експериментально на зразках, щоб досягти заданих значень  $\sigma_{ocm}^{nc}$  за найменший час. Ці залишкові напруги вимірюють рентгеновським, ультразвуковим, голографічним або іншим неруйнівним методом і визначають час обробки. Потім роблять виміри розмірів канавки, що утворюється уздовж лінії сплавлення шву з основним металом. Ширина і глибина канавки пов'язані зі ступенем деформації і відповідно з  $\sigma_{ocm}^{nc}$ , тому в подальшому при обробці конструкцій орієнтуються на ці параметри.

Приклад. Для високочастотної проковки вибираємо сталь середньої міцності (наприклад 15ХСНД) і по формулі (2) розраховуємо  $\sigma_{ocm}^{nc}$  для стикового з'єднання та симетричного циклу. Для цього випадку  $\sigma_{ocm}^{nc} = 180 \text{ МПа}$ . Дане напруження може бути визначене також за допомогою кривих (Фіг 1). Потім обираємо амплітуду коливань  $A = 25 \text{ мм}$ . Беремо діаметр бойків  $d = 3 \text{ мм}$ , їх кількість  $n = 4$  в один ряд, а радіус заокруглення  $R = 3 \text{ мм}$ . Швидкість обробки  $V$  підтримується постійною і складає приблизно 1 м за хвилину. Довжина ділянок шва, які обробляються, складає  $L = 0,28 \text{ м}$ . Обробці піддаються вузькі зони по лінії сплавлення шва з основним матеріалом за декілька проходів із швидкістю  $V$  і з послідовним вимірюванням  $\sigma_{ocm}^{nc}$ . Коли ці значення співпадають з розрахованими, або дещо перевищують їх (на 3-5%), обробку припиняють і фіксують загальну тривалість обробки  $T$ . В даному прикладі  $T = 1,12$  хвилини, тоді продуктивність обробки даного зразка складає  $Q = 0,25 \text{ м/хв}$ . В подальшому конструкції з цієї сталі обробляються з такою самою продуктивністю. Після обробки на поверхні зразка залишається канавка шириною  $b \sim 3 \text{ мм}$  і глибиною  $h \sim 0,5 \text{ мм}$ . І візуальний огляд дозволяє контролювати рівномірність і якість обробки і при необхідності дає можливість повторити обробку тієї ділянки, де канавка звужена, або де залишається якийсь дефект зварювання.

Вихідні (після зварювання) і оброблені зразки випробовувались на вібраційній машині ЦДМ-10 по схемі знакопереминого згину ( $R_\sigma = -1$ ) з частотою 12 Гц і при рівні напружень, який складав 0,25  $\sigma_T$ . Середні значення довговічності для вихідних і оброблених зразків були  $10^5$  і  $7 \cdot 10^5$  циклів відповідно, тобто вона підвищилась у 7 разів.

Техніко-економічна ефективність способу виражається підвищенням циклічної довговічності і збільшенням гарантованого строку служби зварних металоконструкцій при одночасній оптимізації процесу високочастотної проковки швів за рахунок суттєвого зниження часу обробки у порівнянні із відомим способом.

