

ПІДВИЩЕННЯ СЛУЖБОВИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ ОБРОБКОЮ ВИБУХОМ

А.Г. Бризгалін, Є.Д. Пекар, П.С. Шльонський, Л.В. Царенко

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Обробка металів вибухом в сучасному розумінні являє собою різні технологічні процеси, засновані на застосуванні енергії вибуху і дозволяють поліпшувати ті чи інші службові властивості металів або зварних конструкцій. В ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблено технології обробки вибухом для підвищення корозійної стійкості, розмірної стабільності, циклічної довговічності зварних конструкцій, зниження залишкових напружень, усунення дефектів форми резервуарів, підвищення міцності, пластичності, холодостійкості низьковуглецевих сталей. Зазначені технології мають високу мобільність і оперативність, незалежність від зовнішніх джерел енергії. Їх недоліком є обмеженість застосування вибуху в населених пунктах і тривалість процесу отримання дозвільної документації. Проте, є багатий досвід застосування обробки вибухом в умовах діючого промислового виробництва. Бібліогр. 15, рис. 6.

Ключові слова: обробка вибухом, зварні конструкції, службові властивості, корозійна стійкість, міцність, пластичність, довговічність

Поняття «обробка металів вибухом» (ОВ) складається з широкого спектру технологічних процесів, заснованих на специфіці імпульсного впливу продуктів детонації вибухових речовин (ВР) на матеріал, що оброблюється. Перший патент, в якому описана технологія з'єднання труб за допомогою високошвидкісного вибухового деформування, був виданий у Англії в 1898 р. Найбільш відомою з ранніх публікацій виявилася доповідь групи американських дослідників про роботи по впливу ВР на низьковуглецеву сталь, виконані у 1919–1926 рр. У 1940-х опубліковані роботи англійських дослідників, присвячені різним аспектам проблеми обробки металів вибухом. У 1951 р. Н. Маклеодом було заявлено перший винахід – зміцнення вибухом високомарганцевистої сталі. Цей метод знайшов застосування в промисловості США, Канади та СРСР. У 1966 р. опубліковано монографію Дж. Райнхарта і Дж. Пірсона [1], що містила огляд отриманих на той час результатів досліджень по обробці металів вибухом.

Початок планомірних досліджень і використання методу імпульсної обробки металів можна віднести до 1950-х років, перш за все завдяки роботам групи вчених під керівництвом М.Л. Лаврентьєва, який відкрив явище зварювання при високошвидкісному косому зіткненні металів, цілеспрямоване вивчення якого стало основою технології зварювання вибухом. Подальші дослідження, проведені в основному вченими СРСР, США і Англії, дозволили створити ряд технологій, широко використовуваних в промисловості [2].

Серед імпульсних технологій найбільш широке поширення набуло зварювання вибухом.

Унікальні можливості цього виду зварювання дозволяють створювати міцно-щільні з'єднання різних за своїми властивостями металів, що не зварюються ніякими іншими способами, а також композиційні матеріали різного складу.

Високомарганцевисті сталі мають здатність до різкого підвищення поверхневої твердості в результаті імпульсного високошвидкісного впливу. Для підвищення ресурсу швидкозношуваних деталей залізничної колії, гірничодобувної та гірничозбагачувальної техніки і обладнання використовується поверхневе зміцнення сталей за допомогою ОВ. На відміну від інших відомих способів поверхневого зміцнення (прокатка роликми, дрібоструменева обробка, проковка та ін.), що дають збільшення твердості на глибину до 4 мм, ОВ дозволяє отримувати глибину зміцненого шару до 35 мм і більше, що підвищує зносостійкість виробів не тільки за рахунок підвищення твердості, але і за рахунок більш сприятливого розподілу створюваних обробкою залишкових напружень (ЗН) в приповерхневому шарі.

Технологія штампування вибухом використовується в тих випадках, коли неможливо застосувати традиційні способи штампування – деталі великої товщини, необхідність максимального зниження зворотних пружних деформацій.

Широко використовується ОВ в технологіях обробки порошкових і композиційних матеріалів [1]. Ударно-хвильовий вплив при вибуховому навантаженні дозволяє модифікувати властивості і обробляти високоміцні, тверді, важкопресуємі порошкові матеріали, отримувати великогабаритні високощільні заготовки і вироби складної форми, що недосяжно в традиційних технологіях.

Не так широко відомі, але знаходять своє застосування в промисловості і інші види ОВ, такі як синтез нових матеріалів, карбування, прошивка отворів, коли зусилля робочого інструмента задається за допомогою вибуху, клепка, приварка труб до трубних ґрат, брикетування стружки та ін.

У 1967 р. в ІЕЗ ім. Є.О. Патона було встановлено, що імпульсна обробка [3] здатна істотно впливати на службові властивості металоконструкцій.

Можливо умовно виділити три основні механізми впливу обробки металів вибухом на зміну службових властивостей конструкцій:

1. Зміна структури металу, що виражається в подрібненні і зміні взаємного розташування зерен та неметалевих включень, утворення двійників і ліній ковзання, істотному збільшенню кількості дислокацій, активізації рухливості яких, наприклад, нагріванням, призводить до позитивної зміни службових властивостей металу конструкцій. Цей механізм був використаний при розробці способів підвищення зносостійкості ріжучих елементів гірничодобувної техніки, що виготовляються з високоміцної марганцевистої сталі, виготовлення еталонів твердості, підвищення стійкості низьковуглецевих сталей до водневого окрихчування.

2. Зміна або створення нових полів ЗН.

Можливо виділити два способи реалізації даного механізму, один з яких відноситься до зварних вісесиметричних виробів, а інший – до плоских зварних листів [4].

Перший полягає в метанні стінки труби, що призводить до роздачі (експандування) металу в зоні дії кільцевих зварювальних пружних деформацій розтягування, зазвичай застосовуваний при ОВ кільцевих швів переважно великогабаритних оболонок, а також трубопроводів, з вільним доступом всередину, або, навпаки, до обтиснен-

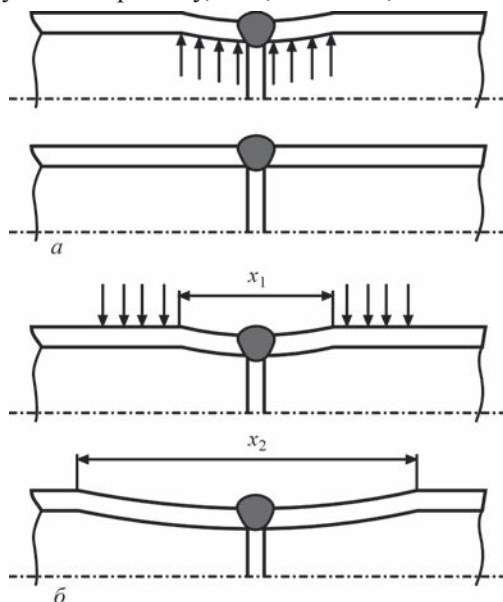


Рис. 1. Принципові схеми ОВ кільцевих швів циліндричних конструкцій: а – внутрішнім зарядом; б – зовнішнім

ня (осадці) стінки труби в зонах дії стискаючих пружних деформацій. На рис. 1 схематично зображено «метальні» варіанти ОВ кільцевих швів в конструкціях типу циліндричних резервуарів і трубопроводів.

Параметри зовнішніх кільцевих зарядів можуть бути підібрані таким чином, що радіус труби в зоні розташування заряду після ОВ буде менше радіуса кільцевого шва, що призведе до створення в шві ЗН стиснення.

Другий зі згаданих вище способів, застосовуваний при ОВ листових конструкцій, складається в додаванні до металу зварного з'єднання нормального тиску, створюваного вибухом, яке призводить до утворення пластичних деформацій в площині оброблюваного металу – так званого напружено-деформованого сліду з двохвісними напруженнями стиску. Їх значення може досягати межі плинності металу, воно мало залежить від вихідного напруженого стану зварного з'єднання [4]. Утворення в металі такого «сліду» призводить до релаксації вихідних розтягуючих напружень. На рис. 2 наведено принципові схеми розташування зарядів ВР при обробці плоских зварних з'єднань.

Широке поширення в практиці ОВ придбали порівняно дешеві й доступні детонуючі шнури (ДШ), широко використовувані, зокрема, в гірничодобувній промисловості. Поперечні розміри «сліду» залежать від кількості і геометрії розміщення шнурів на оброблюваній поверхні, завдяки чому конфігурація «сліду» легко регулюється, а глибина «сліду» може бути досить значною, досягаючи десятків міліметрів, тому виявляється можливим ефективно знімати ЗН в з'єднаннях товщиною до 50 мм. На рис. 3 зображені смуги

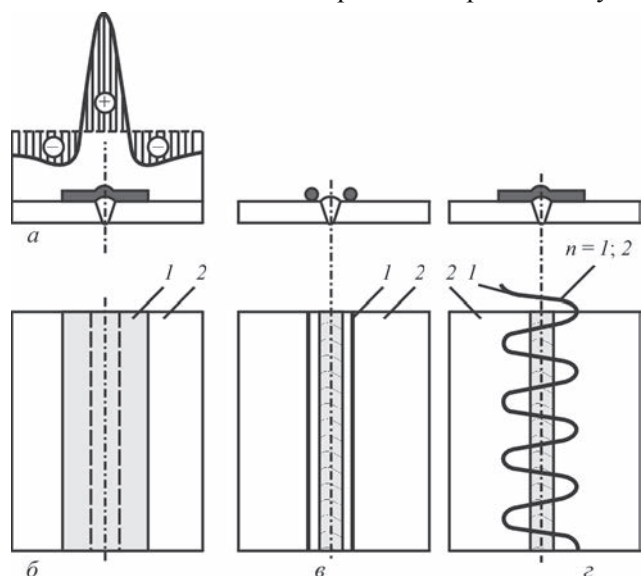


Рис. 2. Принципові схеми ОВ зварних з'єднань листових конструкцій: а – епюра зварювальних ЗН; б – лінійна схема на основі смугового заряду; в – на основі шнурових зарядів; г – схема «змійка» (1 – заряд В; 2 – зварне з'єднання)

плинності, що характеризують конфігурацію і розміри поперечного перерізу реального «сліду» типових розмірів, утвореного в низьковуглецевій сталі детонацією на її поверхні шнура ДШ-А.

Більшість практично застосовуваних технологічних процесів ОВ засновані на використанні саме цього механізму, що пояснює необхідність більш глибокого вивчення процесів, що відбуваються в металі на момент проходження ударної хвилі і взаємозв'язку між параметрами навантаження та напружено-деформованим станом зварних конструкцій.

3. Створення макропластичних деформацій в тілі конструкції, що дозволяють регулювати або змінювати її форму. Такі завдання виникають, як правило, при необхідності усунути будь-які дефекти форми великогабаритних листових конструкцій, наприклад, так званої вуглуватості монтажних стиків циліндричних резервуарів, що виготовляються методом розгортання заготовок, що були зрулоніровані.

Подальші дослідження впливу ОВ на властивості металів і зварних з'єднань [5, 6] показали, що ОВ дозволяє вирішувати досить широке коло завдань, пов'язаних з підвищенням якості та продовження ресурсу зварних конструкцій. Пріоритет в цьому напрямку досліджень на сьогоднішній день належить ІЕЗ ім. Є.О. Патона, де не тільки вивчені механізми вибухового впливу на структуру, напружений стан і властивості зварних з'єднань, але розроблені і знайшли досить широке промислове застосування різні технологічні процеси ОВ [7, 8]. Наведемо найбільш характерні приклади використання ОВ для підвищення надійності, довговічності зварних конструкцій і надання їм нових службових властивостей.

1. Металеві конструкції з високим рівнем робочих або ЗН схильні до небезпеки особливого виду спонтанного руйнування металу, відомого як корозійне розтріскування під напругою. Воно проявляється як в лужних, так і в кислих середовищах. Схильність металевих конструкцій до руйнувань

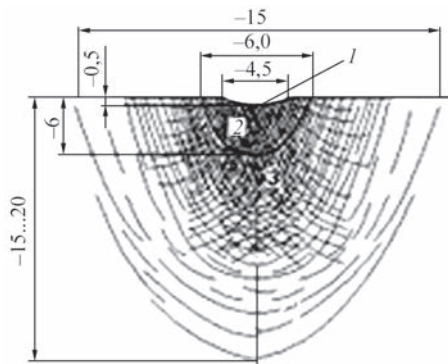


Рис.3. Смуги Чернова–Людерса від вибуху ДШ на поверхні зразка зі сталі Ст3 (інтенсивність смуг відповідає величині пластичної деформації) [5]

в активних робочих середовищах визначається трьома основними умовами [6]: 1) властивостями металу; 2) напруженим станом; 3) впливом середовища. Залежно від конкретних умов можливі різні види руйнування конструкцій: від механічного руйнування, коли роль середовища незначна, до видів руйнування, коли незначна роль напруг, наприклад, при загальній корозії.

Наявність в металевій конструкції зварних з'єднань істотно знижує її довговічність при впливі агресивного середовища. Специфічні особливості, які визначають причини, характер, кінетику і механізм руйнувань зварних з'єднань, залежать в основному від теплофізичного і хіміко-металургійного впливу зварювання, тому що воно викликає несприятливі зміни властивостей металу і напруженого стану, що підсилює негативний вплив середовища.

Напружений стан впливає на корозійну поведінку металу внаслідок наступних явищ [6]:

передача металу додаткової енергії, що викликає зменшення його термодинамічної стійкості;

порушення під дією відповідної деформації суцільності і, отже, захисних властивостей оксидних плівок, що призводить до градієнтного розподілу поверхневого потенціалу;

підвищення ступеня неоднорідності, пов'язаної з появою під дією деформацій дефектів кристалічної решітки і утворенням додаткових анодних потенціалів.

В цілому, небезпека впливу напруженого стану на активізацію корозійних процесів полягає не в збільшенні швидкості загальної корозії, а в зміні її характеру, перетворення її з рівномірної в локальну. Незначно впливаючи на загальну корозію, напруги інтенсифікують місцеві види корозії, найбільш небезпечним з яких є розтріскування.

Встановлено [6], що корозійні тріщини викликаються розтягуючими компонентами тензора напружень незалежно від методу навантаження. Для всіх металів час до руйнування безперервно зменшується з ростом величини напружень. Разом з тим, у більшості випадків існує поріг напруги, нижче якого розтріскування не настає протягом тривалого часу або не відбувається зовсім. Величина порогових напружень залежить від конкретних умов: властивостей металу, напруженого стану, корозійного середовища. При цьому існування порогових напружень характерно як для напружень, викликаних зовнішнім навантаженням, так і для залишкових.

Найбільш небезпечні руйнування зварних конструкцій в агресивних середовищах – це руйнування, пов'язані з наводнюванням металу в процесі експлуатації [9]. Це руйнування характерно для конструкційних сталей, особливо сталей під-

вищеної міцності. Причинами переважного наводнювання зварних з'єднань є структурна неоднорідність зварного з'єднання і наявність ЗН першого і другого роду.

Зниження ЗН в зварних з'єднаннях, які працюють в контакт з середовищем, що наводнює метал, є необхідною умовою підвищення їх довговічності. У більшості випадків таке зниження досягається проведенням термообробки в режимі високого відпуску. Операція термообробки вимагає великих витрат коштів і часу. Альтернативою термообробці може бути застосування ОВ.

У лужних середовищах ОВ дає можливість забезпечити «абсолютну» корозійну стійкість [9] шляхом зниження ЗН нижче порогових.

На рис. 4 показано криві довговічності в киплячих розчинах нітратів зварних стикових з'єднань низьковуглецевої сталі [9].

Видно, що зниження ЗН нижче порогового рівня повністю виключає можливість корозійного розтріскування зварного з'єднання. ЗН порогового рівня, як виявилось, залежать від товщини металу. Запобігання корозійного розтріскування під напругою в лужних середовищах вельми актуально, зокрема, в алюмінієвій промисловості при виробництві глинозему. В ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблена і знайшла застосування на найбільших алюмінієвих і глиноземних заводах СРСР і Югославії технологія ОВ зварних з'єднань бакового обладнання та технологічних трубопроводів відділень декомпозиції [10].

2. Позитивний ефект у вигляді підвищення втомної довговічності зварних з'єднань на стадії зародження тріщини в багатоциклічній області навантаження досягається при ОВ, по-перше, за рахунок

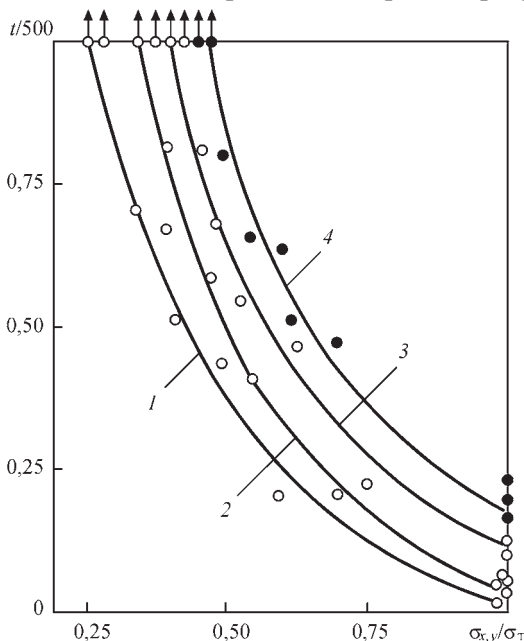


Рис. 4. Залежність довговічності в киплячих розчинах нітратів стикових зварних з'єднань сталі Ст 3 від величини ЗН, віднесених до межі пластичності: 1 – товщина металу 6...8 мм; 2 – 10...14; 3 – 16...22; 4 – 24...30

зняття зварювальних ЗН розтягування і, по-друге, завдяки наведенню в місцях концентраторів напружень ЗН стиснення. В ІЕЗ накопичений великий теоретичний та експериментальний матеріал, який свідчить про високу ефективність цього виду обробки [11]. Встановлено, зокрема, що збільшення опору втоми може бути досить значним і залежить головним чином від схеми та інтенсивності вибухового навантаження, а також від характеристики циклу.

На рис. 5 приведені криві втоми зразків з низьколегованої високоміцної сталі з поперечним ребром, випробуваних при симетричному циклі навантаження.

3. Одним з важливих показників міцності металів і зварних з'єднань, що піддаються впливу змінних навантажень, є їх здатність чинити опір розвитку вже існуючих втомних тріщин. Значимість цього показника полягає в тому, що стадія розвитку тріщини, яка визначається числом циклів до руйнування, може становити 70...90 % загальної довговічності виробу. За допомогою ОВ можна створити в металі інтенсивні «напружено-деформовані сліди» з наперед заданим розподілом і величиною двовісних напружень стиску, які служать бар'єром на шляху поширення тріщин і здатні сповільнювати або зовсім запобігати їх розвитку, а також перешкоджати їх переходу в крихкі тріщини [5].

4. Необхідність зняття ЗН виникає і в тих випадках, коли їх природна релаксація при впливі змінних навантажень може призвести до неприпустимих змін розмірів, геометрії або взаємного положення деталей або частин конструкції, порушення посадочних місць і т.п. Використання ОВ в цьому випадку дозволяє уникнути виникнення поводок, що впливають на експлуатаційні характеристики відповідальних конструкцій. Рис. 6 ілюструє зміну ЗН в результаті ОВ замикаючого стику водоводу діаметром близько 6 м Ташлицької гідроакумулюючої електростанції [5].

5. У практиці в спорудах великогабаритних резервуарів, що виготовляються індустріальним способом з рулонованих заготовок і призначених

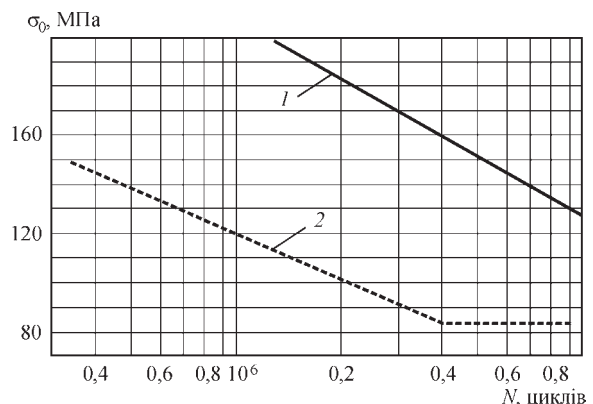


Рис. 5. Криві втомної довговічності зразків з поперечним ребром зі сталі типу АК: 1 – після ОВ; 2 – вихідний стан

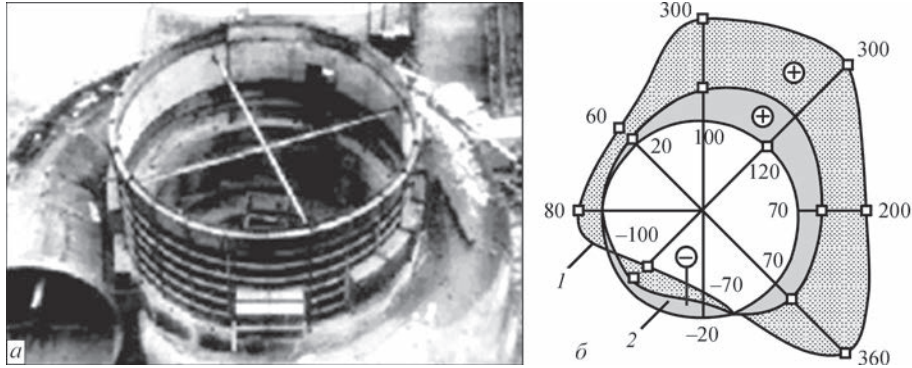


Рис. 6. Загальний вигляд «равлика» водоводу гідроагрегату гідроакumuлюючої електростанції (а) та епюри кільцевих ЗН в замикаючому стику (б): 1 – в початковому стані; 2 – після ОВ

для зберігання нафтопродуктів, в області замикаючих вертикальних монтажних швів часто виникають характерні дефекти форми, так звані вуглуватості, які в процесі експлуатації резервуарів при їх заповненні та спорожненні грають роль концентраторів напружень і викликають пошкодження стінки в результаті малоциклової втоми. В даний час розроблена і промислово використовується технологія ОВ монтажних стиків резервуарів об'ємом до 10...50 тис. м³, що дозволяє в 5...10 разів підвищити довговічність конструкції [12]. Зазначені вище розробки вже доведені до стадії промислово-використовуваних технологій.

У 1980-і роки в ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблено нові технології комбінованої вибухо-термічної та попередньої ОВ крайок, що підлягають зварюванню, так звана вибухо-зварювальна обробка [13, 14]. В основі пакета запропонованих технологій покладена можливість покращувати механічні властивості і структуру металу шляхом зміни його тонкої структури в результаті інтенсивного навантаження під час вибуху та подальшої гомогенізації структури в процесі термообробки або зварювання.

Більшість технологій ОВ, що знайшли на сьогоднішній день практичне застосування, засновані на здатності даного виду післязварювальної обробки істотно знижувати і перерозподіляти ЗН. Як було показано [15], цього ефекту можливо досягти для досить широкого класу конструкцій з товщиною стінки до 50 мм.

Характеризуючи в цілому розглянуті ефекти, що обумовлюються ОВ зварних з'єднань, відзначимо, що з її допомогою досягається підвищення комплексу важливих властивостей зварних з'єднань до рівня, відповідного основному металу, чим забезпечується рівномірність зварних конструкцій, які експлуатуються в екстремальних умовах. Переваги та ефективність ОВ слугують підставою для її широкого промислового використання. Розробка технологічних процесів на основі використання досліджених механізмів обробки повинна здійснюватися для кожного конкретного випадку.

Список літератури

1. Райнхарт Дж.С., Пирсон Дж. (1966) *Взрывная обработка металлов*. Москва, Мир.
2. Крупин А.В., Соловьев В.Я., Попов Г.С. (1991) *Обработка металлов взрывом*. Москва, Metallurgiya.
3. Михеев П.П., Труфяков В.И., Буштетдт Ю.П. (1967) Применение импульсной обработки для повышения выносливости сварных соединений. *Автоматическая сварка*, **10**, 63–64.
4. Dobrushin, L.D., Petushkov, V.G., Bryzgalin, A.G. et al. (2008) *Explosion stress relieving in welded joints of metal structures. Shock-Assisted Materials Synthesis and Processing. Science, Innovations, and Industrial Implementation*. Moscow, Torus Press Ltd.
5. Петушков В.Г. (2005) *Применение взрыва в сварочной технике*. Киев, Наукова думка.
6. Стеклов О. И. (2005) *Прочность сварных конструкций в агрессивных средах*. Москва, Машиностроение.
7. Лобанов Л.М., Добрушин Л.Д., Брызгалин А.Г. и др. (2009) Расширение технологических возможностей обработки взрывом для снижения остаточных напряжений в сварных соединениях декомпозируемых объемом до 5000 м³. *Автоматическая сварка*, **11**, 54–56.
8. Petushkov, V.G., Bryzgalin, A.G. (1997) Improvement of service properties of welded structures by explosion treatment. *Welding and surfacing rev.*, **8**, 167–175.
9. Кудинов В.М., Петушков В.Г. (1985) Сопrotивляемость коррозионному растрескиванию сварных соединений, обработанных взрывом. *Сварочное производство*, **7**, 1–4.
10. Артемьев В.И., Пашин А.Н., Петушков В.Г. и др. (1978) Применение энергии взрыва для повышения коррозионной стойкости сварных соединений декомпозируемых. *Цветная металлургия*, **5**, 7–40.
11. Петушков В.Г., Титов В.А., Фадеенко Ю.И., Михеев П.П., Кузьменко А.З., Первой В.М., Брызгалин А.Г. (1988) *Способ обработки взрывом сварных соединений*. А. с. № 1453762 СССР.
12. Петушков В.Г., Первой В.М., Титов В.А. и др. (1991) *Способ уменьшения угловых остаточных деформаций сварных соединений*. А. с. № 1700873.
13. Петушков В.Г., Брызгалин А.Г., Локшина Е.Я., Савченко В.С., Смирнова С.Н. (1992) *Способ изготовления сварных металлоконструкций*. А. с. № 1760713 СССР.
14. Петушков В.Г., Фадеенко Ю.И., Смирнова С.Н. и др. (1988) Взрывная обработка сварных соединений низкоуглеродистой стали перед их термообработкой. *Автоматическая сварка*, **7**, 68–69.
15. Петушков В.Г., Титов В.А., Брызгалин А.Г. (2002) О предельной толщине сварных соединений, обрабатываемых взрывом. *Там же*, **1**, 22–28.

References

1. Rainhart, J.S., Pierson, J. (1966) *Explosive working of metals*. Moscow, Mir [in Russian].
2. Krupin, A.V., Soloviov, V.Ya., Popov, G.S. (1991) *Explosion treatment of metals*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].

3. Mikheev, P.P., Trufiyakov, V.I., Bushtedt, Yu.P. (1967) Application of pulsed treatment for improvement of reliability of welded joints. *Avtomatich. Svarka*, **10**, 63-64 [in Russian].
4. Dobrushin, L.D., Petushkov, V.G., Bryzgalin, A.G. et al. (2008) *Explosion stress relieving in welded joints of metal structures. Shock-Assisted Materials Synthesis and Processing. Science, Innovations and Industrial Implementation*. Moscow, Torus Press Ltd.
5. Petushkov, V.G. (2005) *Application of explosion in welding technology*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
6. Steklov, O.I. (2005) *Strength of welded structures in aggressive media*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
7. Lobanov, L.M., Dobrushin, L.D., Bryzgalin, A.G. et al. (2009) Widening of technological capabilities of explosion treatment for reducing residual stresses in welded joints on up to 5000 m³ decomposers. *The Paton Welding J.*, **11**, 46-48.
8. Petushkov, V.G., Bryzgalin, A.G. (1997) Improvement of service properties of welded structures by explosion treatment. *Welding and Surfacing Rev.*, **8**, 167-175.
9. Kudinov, V.M., Petushkov, V.G. (1985) Resistance to corrosion cracking of welded joints treated by explosion. *Svarochn. Proizvodstvo*, **7**, 1-4 [in Russian].
10. Artemiev, V.I., Pashchin, A.N., Petushkov, V.G. et al. (1978) Application of explosion energy for improvement of corrosion resistance of welded joints of decomposers. *Tsvetnaya Metallurgiya*, **5**, 7-40 [in Russian].
11. Petushkov, V.G., Titov, V.A., Fadeenko, Yu.I. et al. (1988) Method of explosion treatment of welded joints. USSR author's cert. 1453762 [in Russian].
12. Petushkov, V.G., Pervoj, V.M., Titov, V.A. et al. (1991) *Method of reducing of angular residual deformations of welded joints*. USSR author's cert. 1700873 [in Russian].
13. Petushkov, V.G., Bryzgalin, A.G., Lokshina, E.Ya. et al. (1992) *Method of manufacture of welded metal structures*. USSR author's cert. 1760713 [in Russian].
14. Petushkov, V.G., Fadeenko, Yu.I., Smirnova, S.N. et al. (1988) Explosion treatment of low-carbon steel welded joints before their heat treatment. *Avtomatich. Svarka*, **7**, 68-69 [in Russian].
15. Petushkov, V.G., Titov, V.A., Bryzgalin, A.G. (2002) Limiting thickness of welded joints to be explosion treated. *The Paton Welding J.*, **1**, 20-26.

IMPROVEMENT OF SERVICE PROPERTIES OF METAL STRUCTURES BY EXPLOSION TREATMENT

A.G. Bryzgalin, Ye.D. Pekar, P.S. Shlonskyi, L.V. Tsarenko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

Explosion treatment of metals in the modern sense is represented by different technological processes based on application of the energy of explosion, and allowing improvement of certain service properties of the metals or welded structures. PWI developed technologies of explosion treatment to improve the corrosion resistance, dimensional stability, cyclic fatigue life of welded structures, lower the residual stresses, eliminate defects of tank shape, and increase the strength, ductility, and cold resistance of low-carbon steels. The above technologies have high mobility and responsiveness, and are independent of the external energy sources. Their disadvantage is limited applicability of explosion in settlements and long-term process of obtaining permits. However, there is extensive experience of application of explosion treatment under the conditions of operating industrial production. 15 Ref., 6 Fig.

Keywords: explosion treatment, welded structures, service properties, corrosion resistance, strength, ductility, fatigue life

Надійшла до редакції 11.02.2020

ЖУРНАЛИ для професіоналів



Видається з 1989 р.
Виходить 4 рази на рік
ISSN 0235-3474
doi.org/10.15407/tdnk
Передплатний індекс 74475



Видається з 1948 р.
Виходить 12 разів на рік
ISSN 0005-111
doi.org/10.15407/as
Передплатний індекс 70031



Видається з 1985 р.
Виходить 4 рази на рік
ISSN 2415-8445
doi.org/10.15407/sem
Передплатний індекс 70693

Журнали входять до Переліку наукових фахових видань України

(380-44) 200-8277
journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com