

РЕФЕРАТ РОБОТИ

Значна частка металевих конструкцій та споруд (мости, шляхопроводи, крани, рами візків транспортних засобів та ін.), які експлуатуються в Україні, вичерпала (або близька до цього) свій призначений при проектуванні строк служби, проте об'єктивна реальність потребує їх подальшої експлуатації. Під час тривалої експлуатації дані конструкції, як правило, зазнають впливу кліматичних чинників зовнішнього середовища та змінного навантаження, що призводить до утворення корозійних пошкоджень, накопичення високих рівнів втомних пошкоджень та розвитку втомних тріщин в їх елементах. Руйнування, зазвичай, починається з робочих поверхонь виробів, які піддаються зовнішнім температурно-силовим впливам, дії агресивних рідин, або циклічному навантаженню. Тому актуальними є застосування нових рішень при проектуванні конструкцій, а також розробка нових методів модифікації поверхневих шарів, релаксації шкідливих залишкових напружень і покращення властивостей металу, у тому числі після зварювання.

Автори роботи одними з перших на початку 70-х років минулого сторіччя запропонували новий спосіб поверхневого зміцнення та релаксаційної обробки металевих матеріалів, який дістав назву ультразвукова ударна обробка (УЗУО), або високочастотна механічна проковка (ВМП). Світова наукова громадськість визнала пріоритет дослідників України і Росії в цьому науково-технічному напрямі. Згодом ця важлива для практики технологія розповсюдилась в США, ФРН, Канаді, Франції, КНР та в інших розвинутих країнах і дістала назву Ultrasonic Impact Treatment (UIT). Але найбільш масштабні дослідження структурно-фазових перетворень в поверхневих шарах металів і сплавів проведені саме в Інституті металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, про що свідчить значна кількість опублікованих робіт, авторських свідоцтв, патентів та захистів кандидатських і докторських дисертацій. Тому можна з впевненістю стверджувати що українські вчені створили наукові основи технології УЗУО.

В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона виконано значний комплекс експериментальних і теоретичних досліджень, який дозволяє прогнозувати збільшення УЗУО/ВМП ресурсу зварних металоконструкцій як на стадії виготовлення, так і після тривалої експлуатації з урахуванням впливу кліматичних чинників, наявності технологічних непроварів, поверхневих пошкоджень незначної глибини та інших. Обґрунтована ефективність застосування ремонтно-відновлювальних робіт зварюванням конструкцій і споруд з послідуочим зміцненням ремонтних швів УЗУО, що дозволяє повністю відновити цілісність і

несучу здатність та гарантовано продовжити призначений при проектуванні термін безпечної служби експлуатованих виробів і споруд, які містять тріщини втоми.

Застосування нових конструктивних рішень та матеріалів при традиційних підходах до ремонтно-відновлювальних робіт недостатньо для відновлення несучої здатності зварних вузлів та елементів конструкцій, а відповідно і подальшої безпечної експлуатації споруди в цілому. Це пов'язано з зменшенням проектної товщини листового металу внаслідок корозії та наведенням високих рівнів залишкових напружень розтягу в процесі ремонтного зварювання у жорсткому контурі. Гарантовано забезпечити подовження ресурсу металевих конструкцій та споруд дозволяє застосування розробленої авторами УЗУО, яка внаслідок поверхневого пластичного деформування поліпшує фізико-механічні властивості поверхневих шарів металу, зменшує вплив концентраторів напружень, сприяє перерозподілу зварювальних залишкових напружень і створенню напружень стиску в околі зварних з'єднань та надає унікальні властивості модифікованій поверхні. На сучасному етапі розвитку ресурсозберігаючих технологій локальне модифікування УЗУО поверхні зон концентрації напружень в елементах конструкцій є найбільш ефективним способом зміцнення виробів та споруд серед інших існуючих методів поверхневого пластичного деформування металів.

Збільшення строку служби металевих конструкцій та споруд застосуванням УЗУО зварних з'єднань забезпечується комплексно на всіх стадіях розвитку втомного руйнування: збільшення за допомогою УЗУО довговічності елементів конструкцій на стадії виготовлення; подовження залишкового ресурсу споруд під час експлуатації (на стадії накопичення пошкоджень до утворення втомної тріщини); відновлення цілісності і несучої здатності конструкції з втомними тріщинами застосуванням ремонтного зварювання з подальшим зміцненням УЗУО.

Метою представленої роботи є збільшення несучої здатності та ресурсу промислових виробів, зварних конструкцій та споруд за рахунок формування ультразвуковою ударною обробкою (УЗУО) поверхневого шару металу з підвищеними фізико-механічними властивостями.

Відповідно до поставленої мети необхідно було вирішити наступні завдання:

- дослідити нові структурно-фазові стани поверхні металів і сплавів при модифікуванні поверхні ультразвуковим ударним навантаженням;

- створити портативне промислове обладнання з випромінювачами на п'єзокераміці для УЗУО деталей, виробів і споруд;

- виконати комплекс експериментальних і теоретичних досліджень, щодо прогнозування збільшення ультразвуковою ударною обробкою ресурсу зварних металоконструкцій як на стадії виготовлення, так і після тривалої експлуатації з урахуванням впливу кліматичних чинників, наявності технологічних непроварів, поверхневих пошкоджень незначної глибини та ін.;

- встановити особливості зміцнення УЗУО зварних конструкцій з тонколистових алюмінієвих сплавів;

- обґрунтувати ефективність застосування ремонтно-відновлювальних робіт зварюванням експлуатованих виробів і споруд, що містять тріщини втомні, з повним видаленням пошкодженого металу з тріщиною та подальшим зміцненням УЗУО ремонтних швів для гарантованого продовження їх терміну служби;

- розробити технологічні рекомендації щодо застосування УЗУО металевих конструкцій та споруд.

Об'єктом досліджень є модельні металеві матеріали, металеві вироби, конструкції та споруди на стадіях виготовлення та після тривалої експлуатації, в тому числі з дефектами у вигляді втомних тріщин, що загрожують подальший безпечній експлуатації об'єктів.

Предметом досліджень є встановлення ефективності модифікування за допомогою УЗУО шорсткості, структурно-фазового та напруженого стану поверхневих шарів для підвищення несучої здатності та ресурсу металевих виробів, конструкцій та споруд на всіх стадіях розвитку втомного руйнування.

Наукова новизна роботи полягає у наступному. У представленій роботі створено фізичні основи ультразвукового ударного зміцнення металевих поверхонь. Наведені результати всебічних досліджень природи процесів, що відбуваються при УЗУО поверхні металів. Вперше розроблено фізичні моделі, що пов'язують збільшення густини дислокацій і точкових дефектів із зміцненням, зниженням деформуючих зусиль, аномальним масоперенесенням атомів, а також із релаксацією та перерозподілом залишкових напружень. Вперше, на основі систематичних досліджень еволюції структурно-фазового стану металів і сплавів на основі заліза, алюмінію, титану та цирконію, що характеризуються різним типом кристалічної ґратниці та різною величиною дефектів пакування встановлені фізичні мікромеханізми структурних перебудов та формування нанорозмірних/ультрадисперсних/градієнтних зеренних структур і фазових складових в ударно деформованих поверхневих шарах за умов УЗУО. Вивчені дифузійні процеси у

нано структурованих металах і сплавах, нанокомпозитних поверхневих шарах, у тому числі одержаних в процесі УЗУО. Показано, що дифузія та механохімічні реакції (окиснення/азотування) на поверхні є важливим чинником механізму деформаційно ініційованої нано структуризації, включаючи формування «білих шарів» на сталях, і, як наслідок, сприяють підвищенню механічних та антикорозійних властивостей (твердість, опір втомі, зношуванню, корозії) сталевих, алюмінієвих, титанових виробів/конструкцій, які застосовуються у різних галузях народного господарства від транспортної інфраструктури та машинобудування до біомедичного застосування при виробництві імплантів.

Встановлені закономірності деформаційного зміцнення та перерозподілу залишкових напружень у поверхневих шарах металевих матеріалів дозволили визначити параметри ударного навантаження при УЗУО, які мають вирішальний вплив на підвищення механічних властивостей поверхневих шарів і покращення експлуатаційних характеристик деталей, виробів, конструкцій та споруд. Серед цих параметрів найважливішими є наступні: висока ступінь та швидкість деформації; наявність різноспрямованих ударних імпульсів і зсувної компоненти навантаження; деформаційне розігрівання, що забезпечує перебіг динамічної рекристалізації або фазових перетворень; формування нанорозмірних зеренних структур в тонкому поверхневому шарі та залишкових макронапружень стиснення у більш глибоких шарах.

Вперше у світовій практиці ультразвукову ударну обробку проведено за криогенних температур, що дозволило забезпечити більш ефективно, порівняно із традиційним термічним обробленням та стандартними схемами УЗУО, зміцнення металевої поверхні. Показано унікальну можливість підвищення мікротвердості поверхні алюмінієвого сплаву Д16 (до ~500 %) за умов УЗУО при 77,4 К, обумовленого впливом процесів диспергування зеренної структури до наномасштабного рівня та механохімічної взаємодії алюмінію із азотом у процесі кріодеформації.

Виявлені кореляційні залежності між структурою поверхневих шарів та опором металевих матеріалів втомі, зношуванню, корозії. Отримані дані дозволили пов'язати мікроструктуру з механічними властивостями (твердість) та рівнем залишкових напружень стиснення в ударно деформованих поверхневих шарах металевих матеріалів, а також розробити інструментальні методи оцінки якості та завершеності УЗУО (ВМП).

Науково-технічні результати:

Встановлені мікромеханізми деформаційного керування шорсткістю поверхні, структурно-фазових перетворень і формування нанорозмірних зеренних структур і фазових складових у поверхневих шарах металів і сплавів за умов їх інтенсивної пластичної деформації під дією УЗУО дозволили визначити оптимальні режими високочастотного ударного навантаження, які забезпечують підвищення механічних та антикорозійних властивостей (твердість, опір втомі, зношуванню, корозії) сталей, алюмінієвих, титанових виробів/конструкцій, які застосовуються у різних галузях народного господарства від транспортної інфраструктури та машинобудування до біомедичного застосування при виробництві імплантів.

В процесі виконання роботи розроблено і виготовлено ряд лабораторних установок, а також портативне промислове обладнання з випромінювачами на п'єзокераміці для УЗУО деталей, виробів і споруд. Серед важливих нововведень слід відзначити наступні: модернізовано схему УЗГ з цифровим фазовим автопідстроюванням частоти, яка виконана шляхом прямого цифрового синтезу з підвищеним діапазоном утримання резонансного режиму при дії різних дестабілізуючих чинників на п'єзокерамічний випромінювач, що забезпечує високий рівень точності і повторюваності результатів; розроблено в електронному вигляді повний комплект конструкторської документації (КД) принципів схем та друкованих плат і креслення усіх складових частин конструкції УЗГ; розроблено та виготовлено апаратно – програмний комплекс погодження та методика налагоджування УЗГ з ПЕП; розроблено конструкцію та виготовлено корпуси, для мобільних та стаціонарних варіантів УЗГ, що забезпечує довготривалу роботу в штатному режимі на відкритому повітрі в умовах забруднення промисловим пилом.

Розроблено технологічний процес зміцнення зварних з'єднань металевих конструкцій та споруд УЗУО. Встановлено, що на відміну від інших способів поверхневого наклепу при зміцненні технологією УЗУО з метою підвищення опору втомі зварних з'єднань пластичній деформації необхідно піддавати лише зону переходу металу шва на основний метал, а процес зміцнення проводити у 2 етапи. Надані рекомендації щодо встановлення ефективних параметрів зміцнення зварних з'єднань, а відповідно і швидкості (продуктивності) обробки.

Експериментально обґрунтована ефективність застосування УЗУО для підвищення характеристик опору втомі зварних з'єднань елементів конструкцій і споруд як на стадії їх виготовлення, так і в процесі тривалої експлуатації.

Враховано вплив багатоступеневого та блокового навантажень на циклічну довговічність зварних з'єднань металоконструкцій до та після зміцнення. Встановлено ефективність зміцнення за технологією УЗУО зварних з'єднань в залежності від різних варіантів прикладення навантажень до і після зміцнення, а також від рівня накопичених втомних пошкоджень до зміцнення.

Показано, що обробку за технологією УЗУО високо навантажених зварних з'єднань елементів металоконструкцій доцільно проводити після введення їх в експлуатацію. Напрацювання зварними з'єднаннями до 10% їх довговічності у не зміцненому стані підвищує ефективність зміцнення за технологією УЗУО до 3,2...3,7 разів у порівнянні з зміцненням на стадії виготовлення. Довговічність таких зварних з'єднань після зміцнення при 70% рівні накопичених втомних пошкоджень не поступається довговічності з'єднань, зміцнених на стадії виготовлення.

Обґрунтовано багаточисельними втомними випробовуваннями зразків конструкційних сталей, що УЗУО зварних з'єднань з експлуатаційними поверхневими втомними тріщинами глибиною до 1 мм та непроварами в корені кутового шва дозволяє не тільки відновити довговічність зварного з'єднання до вихідного рівня, але і суттєво її збільшити.

Вперше встановлена ефективність застосування УЗУО для підвищення характеристик опору втомі зварних з'єднань металоконструкцій, які під час експлуатації зазнають тривалого впливу кліматичних чинників зовнішнього середовища, характерних для території України: морського та помірною клімату. Показано, що застосування технології УЗУО збільшує циклічну довговічність зварних з'єднань в 2...10 разів в залежності від рівнів прикладених навантажень.

Отримані пріоритетні результати, щодо впливу УЗУО на підвищення опору втомі тонколистових зварних з'єднань алюмінієвих сплавів при встановлених ефективних параметрах обробки. Показано, що границі витривалості на базі випробувань 2×10^6 циклів змін напружень для зміцнених з'єднань сплавів Д16Т, АМг6 і 6061-Т6 зросли відповідно на 30, 27 та 40% у порівнянні із значеннями для з'єднань у вихідному після зварювання стані. При цьому циклічна довговічність з'єднань збільшилась у 4...7 разів. Встановлено, що УЗУО не знижує статичну міцність досліджених тонколистових з'єднань.

Запропоновано нові підходи до застосування процесу УЗУО, як способу холодної правки для усунення конструкційного ексцентриситету передачі силового навантаження в тонколистових напускових зварних з'єднаннях, що

дозволило збільшити їх границю витривалості на базі довговічності $10^4 \dots 10^6$ циклів змін напружень у 2...3 рази.

Системний підхід при експериментальних та теоретичних дослідженнях ефективності застосування УЗУО для збільшення ресурсу зварних метало-конструкцій дозволив впровадити дану технологію в промисловість України.

Практична значимість одержаних результатів полягає в наступному:

Створено та впроваджено в промисловість України ультразвукову ударну обробку, яка забезпечує найбільш високі фізико-механічні показники зміцненого шару металу і на сучасному етапі розвитку ресурсозберігаючих технологій є найбільш ефективним способом зміцнення виробів та споруд.

Вперше розроблено та створено портативне ультразвукове обладнання з інструментами на п'єзокераміці та цифровими ультразвуковими генераторами на сучасній елементній базі, окремі елементи якого перевищують зарубіжні аналоги або знаходяться на рівні світових зразків.

Експериментально обґрунтовано застосування ремонтного зварювання з подальшим зміцненням ремонтних швів УЗУО для споруд, що містять тріщини втоми. Даний підхід до подовження залишкового ресурсу прогонових будов залізничних мостів виявився найбільш ефективним у порівнянні з традиційним свердленням отворів $\varnothing 23$ мм з послідуєчим встановленням високоміцного болта з затягуванням 20 тс, локальним нагрівом та ремонтним зварюванням без УЗУО.

Розроблено технологію зміцнення, релаксації та перерозподілу залишкових макронапружень у оброблених поверхневих шарах і зварних з'єднаннях металевих виробів, конструкцій та споруд. Встановлені оптимальні режими обробки (УЗУО/ВМП) зварних з'єднань, виробів вагонобудування (для усунення відхилень від розмірів бокових панелей та подовження строку служби візків залізничних вагонів), мостових перекриттів, які лягли в основу технології, впровадженої на багатьох промислових підприємствах України, включаючи АТ «Укрзалізниця», ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод».

Рішенням Міжнародного інституту зварювання (МІЗ) від 2007 р. технологію УЗУО було включено до переліку рекомендованих способів обробки зварних з'єднань. Цьому передували і неодноразові представлення на засіданнях МІЗ результатів даної роботи щодо технології УЗУО (6 документів МІЗ), як одного з найперспективніших способів суттєвого підвищення опору втомі зварних конструкцій, покращення умов праці та економічності виконання робіт.

Врахування ефектів деформаційного зміцнення та перерозподілу залишкових напружень, а також аналізу режимів проведення УЗУО дозволило розробити

критерії та інструментальні методи оцінки якості та завершеності УЗУО. Вони впроваджені на ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» і за умови належного застосування можуть значно підвищити ефективність використання УЗУО в технологічних процесах виготовлення ряду виробів і конструкцій вагонобудування з метою підвищення ресурсу їх роботи. Серед потенційних користувачів результатів роботи є й інші підприємства транспортного машинобудування (авто-, авіа- ракетобудування), медицини (виробництво сучасних металевих імплантів), будівельної галузі народного господарства (мостобудування та ін.), а також підприємства військово-промислового комплексу України.

Обґрунтована ефективність застосування ремонтно-відновлювальних робіт зварюванням з послідуочим зміцненням ремонтних швів УЗУО, які дозволяють повністю відновити цілісність і несучу здатність та гарантовано продовжити призначений при проектуванні термін служби експлуатованих виробів і споруд, що містять тріщини втоми. Для відновлення безпечної експлуатації прогонових будов залізничних мостів з тріщинами втоми розроблено нормативні документи «Укрзалізниці» ЦП-0176 «Рекомендації з огляду, підсилення, ремонту та збільшення експлуатаційного ресурсу суцільностінчатих зварних прогонових будов» від 03.04.2007 р. та ЦП-0214 «Експлуатація залізничних мостів. Технологічний регламент із ремонту зварюванням пошкоджених тріщинами втоми елементів прогонових будов залізничних мостів» від 01.12.2009 р. Слід зазначити, що використання технології УЗУО в рамках вказаних нормативних документів дає не тільки значний економічний ефект, але й підвищує безпеку руху на залізничному транспорті, запобігає виникненню аварійних ситуацій, які призводять до матеріальних втрат.

Обсяг впровадження роботи та досягнутий ефект

Виконано ремонтно-зварювальні роботи з застосуванням УЗУО для відновлення несучої здатності та подовження ресурсу прогонових будов залізничних мостів ПАТ «Укрзаліниця»:

- через р. Дніпро на 16 км перегону Святошин-Дарниця (усунення тріщини довжиною 1.5 м в верхньому поясі головної таврової балки), 2001 р.;
- через р. Ворскла на 333 км лінії Київ - Харків Південної залізниці (усунення 70 тріщин втоми довжиною \approx 100 мм), 2007 р.;
- через р. Тетерів на 82 км дільниці Київ-Коростень Південно-Західної залізниці (проведена модернізація місць кріплення вертикальних ребер жорсткості з

метою виключення появи тріщин втоми у вертикальній стінці повздовжньої балки прогонової споруди), 2008 р.

У вагонобудівній галузі включено УЗУО в технологічні процеси виготовлення пасажирських вагонів на ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод», м. Кременчук:

- рам візків метро (зміцнення зварних з'єднань приварки кронштейнів кріплення двигуна та повідкового механізму на рамах візків метро на стадії виготовлення), 2010 р.;
- пасажирські вагони (усунення залишкових зварювальних деформацій тонколистових панелей бічних стінок пасажирських вагонів), 2010 р.;
- впроваджено інструментальні методи визначення продуктивності, завершеності та якості високочастотного механічного проковування (ВМП - УЗУО) зварних з'єднань деталей та виробів вагонобудівної галузі, 2018 р.

Розроблено технологічні інструкції 19.06 «Комплект документів на типовий технологічний процес ремонту надресорної балки візка моделі 18-100 з тріщинами в зоні приливка мертвої точки» з метою експлуатаційних випробовувань відремонтованих з застосуванням УЗУО надресорних балок в спеціальних вантажних вагонах металургійної промисловості, 2006 р.

Проведено ремонтно-відновлювальні роботи з застосуванням УЗУО з метою відновлення несучої здатності та збільшення ресурсу наступних металевих конструкцій та споруд:

- станини преса з зусиллям 10000 тс на Нижньодніпровському трубному заводі в м. Дніпро (усунення 5 тріщин загальною довжиною 4 м в станині з товщиною металу 160...220 мм), 2001 р.;
- автодорожньої естакади через шлюзи Дніпровської ГЕС в м. Запоріжжя (відновлення та включення в роботу обірваної низової тяги), 2013 р.;
- несучої рами вібропресового обладнання AMEthus 1500 HS (усунення 4 тріщин довжиною 150...600 мм), 2016 р.;
- рам візків вантажних вагонів для гірничо-збагачувальних комбінатів (зміцнення зварних з'єднань двох рам на стадії виготовлення), 2007 р.;
- рам візків вагонів КП «Київський метрополітен» (усунення тріщин критичних розмірів в вузлах кріплення тягового двигуна і зонах приварювання повідкових кронштейнів), 2005 р.;
- металоконструкції галереї подачі вугілля Черкаської ТЕЦ (усунення тріщин втоми в місцях приварки поперечних в'язей до повздовжніх балок нижнього поясу ферми), 2006 р.;

- резервуар для зберігання нафти об'ємом 10000 м³ на ПАО «ЛУКОЙЛ-Одеський НПЗ» (усунення дефектів в зварних швах нижнього поясу, зміцнення перетину зварного шва приймального патрубку діаметром 400 мм з вертикальним зварним швом), 2009 р.

Таким чином, значна кількість накопичених результатів щодо ефективності застосування УЗУО для підвищення опору втомі зварних з'єднань різних конструкційних матеріалів і досвід використання цієї технології в суднобудуванні, вагонобудуванні та в інших галузях промисловості є підставою для подальшого включення даного виду обробки в нормативні документи з проектування і виготовлення зварних конструкцій та споруд в Україні.

Сумарний порівняльний і прямий економічний ефекти від впровадження УЗУО металевих виробів, конструкцій та споруд відповідно становлять 2000 млн. грн. та 225,53 млн. грн.

Кількість публікацій: 258, у т.ч. 5 монографій, 2 нормативних документи, 230 статей (44 - у міжнародних виданнях). Новизну та конкурентоспроможність технічних рішень захищено 21 патентом. Згідно бази SCOPUS загальне число посилань на публікації авторів складає 903, h-індекс – 16; згідно бази Google Scholar загальна кількість посилань – 1561, h-індекс – 20.

_____ Б.М.Мордюк

_____ Г.І.Прокопенко

_____ С.О.Соловей

_____ І.М.Клочков

_____ С.М.Волошко

_____ Г.О.Линник

_____ Т.А.Красовський

_____ В.В.Волочай