

## **РЕФЕРАТ РОБОТИ**

Ультразвукові технології, які використовують дію потужного ультразвуку на речовини в твердому та рідкому станах з метою покращення фізико-механічних характеристик, підвищення якості продукції та інтенсифікації багатьох процесів у промисловості, медицині та побуті широко розповсюджені у світовій практиці. Важливе місце в ультразвуковій обробці металів і сплавів займають методи обробки поверхонь деталей і виробів високочастотними ударами, серед яких можна виділити три основних. Перший з них, що був запропонований І.І. Мухановим (1966 р.), полягає у вигладжуванні поверхні деталей твердосплавним або алмазним інструментом, який коливається з ультразвуковою частотою. Цей метод відомий як «безабразивна ультразвукова фінішна обробка – БУФО». За допомогою такої обробки можна зміцнювати поверхню навіть загартованих деталей малих діаметрів, що неможливо здійснити за традиційною технологією обкочуванням кульками або роликами. Але це не єдина перевага БУФО. Під дією високочастотних ударів у поверхневих шарах сплавів відбуваються складні структурно-фазові перетворення, які обумовлюють формування нанорозмірних структур, або навіть утворення так званих «білих шарів» в легованих сталях. Такі шари за гранично низької шорсткості мають високу твердість і зносостійкість, значні напруження стиснення, корозійну стійкість, що обумовлює високі експлуатаційні характеристики, в тому числі втомну міцність.

На початку 70-х років запропоновано спосіб обробки деталей складної форми кульками діаметром 1...3 мм у спеціальних стаканах, стінки яких коливаються з ультразвуковою частотою (І.А. Стебельков). Під дією коливань і «ультразвукового вітру» кульки інтенсивно перемішуються в замкненому об'ємі та численними ударами здійснюють зміцнення поверхні деталі. Такий спосіб і досі застосовують у вітчизняній авіаційній промисловості для зміцнення деталей турбін двигунів.

Ще один спосіб поверхневої обробки металічних матеріалів був запропонований в ті ж роки практично одночасно у ІМФ НАН України

(Г.І. Прокопенко) та на «Севмаш»-підприємстві (Ю.Ш. Статніков). Він полягає в обробці поверхні матеріалів деформуючими елементами (кульки, стрижні), які розташовані між ультразвуковим випромінювачем і поверхнею виробу в невеликому проміжку. Інтенсивні вимушені коливання ударників з високою частотою (~1...3 кГц) призводять до суттєвої пластичної деформації поверхневого шару металу і підвищення механічних властивостей виробів, а також зварних конструкцій відповідального призначення, для яких ця технологія переважно використовується. Цей спосіб дістав назви – ультразвукова ударна обробка (УЗУО), або високочастотна механічна проковка (ВМП). Світова наукова спільнота визнала пріоритет дослідників України і Росії в цьому науково-технічному напрямі. Згодом ця важлива для практики технологія розповсюдилась у США, ФРН, Канаді, Японії, Франції, КНР під назвами Ultrasonic Impact Treatment (UIT) або High-Frequency Mechanical Impact (HFMI).

Найбільш детальні дослідження структурних перебудов і фазових перетворень у поверхневих шарах металів і сплавів проведені саме в Інституті металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України (Б.М. Мордюк) і НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського» (С.М. Волошко), про що свідчить значна кількість опублікованих робіт, авторських свідоцтв, патентів, захищених кандидатських і докторських дисертацій. Всі означені вище технології представлені в даній роботі.

В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона (С.О. Соловей, І.М. Клочков) виконано значний комплекс експериментальних і теоретичних досліджень, який дозволяє прогнозувати збільшення УЗУО 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. Обґрунтована ефективність застосування ремонтно-відновлювальних робіт зварюванням конструкцій і споруд з наступним зміцненням ремонтних швів УЗУО, що дозволяє повністю відновити цілісність і несучу здатність та гарантовано продовжити проектний термін безпечної служби експлуатованих виробів і споруд, які містять тріщини втоми. Тому можна

стверджувати, що саме українські вчені створили наукові і технологічні основи УЗУО.

Однією з особливостей дії ультразвуку на речовину, як у твердій, так і в рідкій фазі, вважається аномально високе прискорення  $a_0$  поверхні випромінювача, що коливається. За амплітуди коливань  $A_{\max} = 10$  мкм і частоти  $f = 20$  кГц, прискорення сягає  $a_0 = 1,57 \cdot 10^5$  м/с<sup>2</sup>, що в 16000 разів перевищує гравітаційне прискорення  $g = 9,80665$  м/с<sup>2</sup>. Такі властивості ультразвуку обумовлюють унікальну специфіку його дії на тверді та рідкі речовини. Наприклад, дія ультразвуку може впродовж декількох хвилин розігріти стрижень з тугоплавкого металу в пучності напружень до температур вище 2000<sup>0</sup>С. Ця особливість ультразвуку використовується в процесі зварювання металів і пластмас. Розробки в цьому напрямі проводяться авторами даної роботи в НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського» (О.Ф. Луговський) і у Київському академічному університеті МОН і НАН України (Т.А. Красовський) в плані модернізації обладнання із заміною імпорتنих ультразвукових генераторів та інструментів високої вартості та впровадженні його на вітчизняних підприємствах.

Аномально високе прискорення поверхні ультразвукового випромінювача, який занурено у рідину, обумовлює явище кавітації. Процес кавітації супроводжується виникненням ударних імпульсів тиску, які досягають 10<sup>3</sup> МПа одночасно з підвищенням температури до 1000<sup>0</sup>С, потужними кумулятивними струменями поблизу поверхонь деталей, які підлягають очищенню, інтенсивними мікротечіями та електричними розрядами. Ефект кавітації широкого використовують в різних галузях промисловості. Ультразвукове кавітаційне обладнання дозволяє підвищити ефективність багатьох технологічних процесів у машинобудуванні, хімічній промисловості, сільському господарстві, харчовій промисловості та медицині.

**Наукова новизна роботи.** У представленому циклі робіт створено фізичні основи ультразвукового ударного зміцнення металевих поверхонь. Наведені

результати всебічних досліджень природи процесів, що відбуваються в процесі 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. На основі систематичних досліджень еволюції структурно-фазового стану металів і сплавів встановлені фізичні мікромеханізми структурних перебудов та формування нанорозмірних, ультрадисперсних та градієнтних зерених структур в ударно деформованих поверхневих шарах. Докладно вивчені також дифузійні процеси у наноструктурованих металах і сплавах, в тому числі одержаних в процесі УЗУО. Показано, що дифузія та механо-хімічні реакції (окиснення/азотування) на поверхні грають важливу роль в процесах, ініційованих інтенсивною деформацією, включаючи формування «білих шарів» на сталях, які сприяють підвищенню фізико-механічних властивостей (твердість, опір втомі, зношуванню та корозії) конструкційних матеріалів на основі заліза, алюмінію і титану, які застосовуються в різних галузях народного господарства.

Нові знання отримані також при вивченні кавітаційних процесів у рідині. Були проведені теоретичні та експериментальні дослідження взаємодії ультразвукового поля з кавітаційними рідинними камерами різної форми та об'єму. Вивчені негативні ефекти, пов'язані з проблемами введення в рідину ультразвукових коливань високої інтенсивності. Знайдені конкретні шляхи суттєвого збільшення ефективності кавітаційних технологій за рахунок досягнення високого ККД введення пружних коливань в рідину. Теоретично обґрунтовані та підтверджені експериментально шляхи суттєвого збільшення продуктивності ультразвукового розпилення в тонкому шарі, що дозволяє значно підвищити ефективність технологій, які використовують дрібнодисперсний рідинний аерозоль.

**Науково-технічні результати.** Фундаментальні теоретичні і експериментальні дослідження впливу ультразвуку на металеві матеріали дозволили встановити

взаємозв'язок мікроструктури з механічними властивостями матеріалів, а також розробити інструментальні методи оцінки якості та завершеності УЗУО.

В процесі виконання роботи розроблено і виготовлено ряд лабораторних установок з випромінювачами на п'єзокераміці для УЗУО деталей, виробів і споруд, для БУФО робочих поверхонь деталей, зварювання пластмас, а також обробки рідин. З урахуванням останніх досягнень в галузі електроніки проведено модернізацію схеми ультразвукового генератора (УЗГ) з цифровим фазовим автопідстроюванням частоти, яку виконано шляхом прямого цифрового синтезу з підвищеним діапазоном утримання резонансного режиму за умов дії різних дестабілізуючих чинників на п'єзокерамічний випромінювач при УЗУО, зварюванні пластмас, або кавітаційній обробці рідин, що забезпечує високий рівень точності і повторюваності результатів. Розроблено низку конструкцій мобільних та стаціонарних варіантів УЗГ із забезпеченням довготривалої роботи на відкритому повітрі і в заводських умовах при забрудненні промисловим пилом.

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 залежно від рівнів прикладених навантажень.

Отримані пріоритетні результати, щодо впливу УЗУО на підвищення опору втомі тонколистових зварних з'єднань алюмінієвих сплавів за оптимальних параметрів обробки. Показано, що границі витривалості на базі випробувань  $2 \times 10^6$  циклів змін напружень для зміцнених з'єднань сплавів Д16Т, АМг6 і 6061-Т6 зростають відповідно на 30, 27 та 40% в порівнянні зі значеннями для з'єднань у вихідному стані після зварювання. При цьому циклічна довговічність з'єднань збільшується у 4...7 разів.

В рамках співробітництва між КАУ НАН України та КБ «Івченко-Прогрес» розроблено та виготовлено дослідний зразок нової ультразвукової коливальної

системи на 17 кГц із п'єзокерамічним перетворювачем для модернізації застарілого обладнання з магнітострикційними випромінювачами, що має значне енергоспоживання до 4 кВт·год. Нове устаткування призначене для обробки деталей авіаційних двигунів кульками в спеціальних ємностях.

В НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» розроблені та впроваджені зразки ефективного ультразвукового обладнання для обробки рідких середовищ та твердих матеріалів. Запропоновані та впроваджені технології ультразвукового безреагентного знезараження рідин, ультразвукового дисперсного розпилення рідин у складі мехатронних систем зрошування та штучного мікроклімату, ультразвукового розпилення розплавлених металів для отримання металевих нанопорошків, ультразвукового кавітаційного фільтрування рідин, отримання стійких емульсій за рахунок кавітаційного перемішування на молекулярному рівні, ультразвукового кавітаційного екстрагування тощо.

Слід зазначити, що ультразвукова обробка металевих матеріалів сприяє в основному підвищенню експлуатаційних характеристик деталей, виробів і конструкцій і, загалом, їх довговічності та надійності. В той же час кавітаційні технології дозволяють одержати більш якісну продукцію. Масштаб досліджень, проведених впродовж багаторічної діяльності авторів роботи, обіймає практично всі випадки застосування потужного ультразвуку в промисловості, медицині і побуті, тому результати роботи мають загальнодержавне значення.

Високий рівень і новизна теоретичних та експериментальних досліджень ефективності застосування ультразвуку для підвищення якості і надійності промислової продукції дозволили авторському колективу впровадити низку новітніх ультразвукових технологій в промисловість України, що має економічне, екологічне і соціальне значення. Представлені практичні розробки знаходяться на рівні зі світовими аналогами, а в деяких випадках випереджають цей рівень, про що свідчить значна кількість охоронних документів, в тому числі і зарубіжних.

Рішенням Міжнародного інституту зварювання (МІЗ) від 2007 р. технологію УЗУО було включено до переліку рекомендованих способів обробки зварних

з'єднань. Цьому передували неодноразові представлення на засіданнях МІЗ результатів даної роботи вченими України щодо технології УЗУО (6 документів МІЗ), як одного з найперспективніших способів суттєвого підвищення опору втомі зварних конструкцій, покращення умов праці та економічності виконання робіт.

### **Обсяг впровадження роботи та досягнутий ефект.**

Для відновлення безпечної експлуатації прогонових будов залізничних мостів з тріщинами втомі розроблено нормативні документи «Укрзалізниці» ЦП-0176 та ЦП-0214, в яких надані рекомендації з огляду, підсилення, ремонту та збільшення експлуатаційного ресурсу суцільностінчастих зварних прогонових будов» (Г.О. Линник, С.О. Соловей). 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 значних матеріальних втрат.

Виконано ремонтно-зварювальні роботи із 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 у верхньому поясі головної таврової балки), 2001 р.; через р. Ворскла на 333 км лінії Київ - Харків Південної залізниці (усунення 70 тріщин втомі довжиною  $\approx 100$  м), 2007 р.; через р. Тетерів на 82 км дільниці Київ - Коростень Південно-Західної залізниці, 2008 р.

У вагонобудівній галузі технологія УЗУО включена в технологічні регламенти виготовлення деяких виробів для пасажирських вагонів на ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод», м. Кременчук:

- рам візків метро (зміцнення зварних з'єднань кронштейнів кріплення двигуна та повідкового механізму на рамах візків метро на стадії виготовлення), 2010 р.;

- усунення залишкових зварювальних деформацій тонколистових панелей бічних стінок пасажирських вагонів, 2010 р.; впроваджено інструментальні методи визначення продуктивності, завершеності та якості УЗУО зварних з'єднань деталей та виробів вагонобудівної галузі, 2018 р.

Проведено ремонтно-відновлювальні роботи із 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 від 150 до 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 у 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.;

- резервуару для зберігання нафти об'ємом 10000 м<sup>3</sup> на ПАО «ЛУКОЙЛ-Одеський НПЗ» (усунення дефектів у зварних швах нижнього поясу, зміцнення перетину зварного шва приймального патрубку діаметром 400 мм з вертикальним зварним швом), 2009 р.

- обладнання для ультразвукового зварювання пластмасових вентиляторів впроваджені на ТОВ «ЄВРОВЕТС» (м. Боярка), корпусів фільтрів для води на ТОВ «ECOSOFT» (м. Ірпінь), конвеєрних стрічок на ряді птахофабрик «Наша ряба», 2010–2012 рр.

Кавітаційні технології пройшли дослідно-промислову перевірку, а в деяких випадках і впровадження на багатьох підприємствах України: ДП ПАТ «Оболонь» «Красилівське», Інститут біоорганічної хімії та нафтохімії НАНУ, Інститут



мікробіології і вірусології НАНУ, Інститут хімії поверхні НАН України ім. О.О. Чуйка, ТОВ НМЦ «Медінтех», Корпорація «Сварог Вест Груп», ТОВ «Агрохім Груп», ТОВ «ЕНЕРГОМЕХКОМПЛЕКТ», ТОВ «Джола Голд», ПП «Кондитерський дім «Санкруа», ПАТ «Дрогобицький завод автомобільних кранів», НГВУ «Чернігівнафтогаз», АТ «Коростенський фарфор», АТ «КВАЗАР», «Центр мікрохірургії ока».

В процесі роботи розроблено і виготовлено нове ультразвукове обладнання, різні модифікації якого були пристосовані для вирішення конкретних завдань:

- *Ультразвукове кавітаційне обладнання для обробки пластової води в технологічному процесі видобування нафти.* Відновлення продуктивності свердловини вдалося завдяки впровадженню установки, що забезпечує обробку пластової води ультразвуковим та магнітним полями.

- *Ультразвукові кавітаційні пристрої для фармацевтичної промисловості.* Для отримання особливо чистих лікарських екстрактів була розроблено модифікацію технологічного обладнання, в якому кавітаційна обробка рідини відбувається в резонансній камері з кварцового скла.

- *Ультразвукове обладнання для реалізації технології розпилення в тонкому шарі.* Розроблені ультразвукові диспергатори малої потужності, диспергатор до мехатронних систем штучного мікроклімату, диспергатор для отримання дрібнодисперсних порошків металів, диспергатор з можливістю зміни форми факелу розпилення у складі мехатронних систем зрошування в сільському господарстві, диспергатор для отримання аерозолу у складі мехатронних систем опріснення, отримання сухого молока та пектинового порошку.

- *Обладнання для ультразвукової технології боротьби з інкрустацією на теплообмінних поверхнях.* Дослідна експлуатація розроблених приладів у реальних умовах тепломережі показала, що навіть на значній відстані від ультразвукового перетворювача відбувається суттєве зменшення відкладень на теплообмінних поверхнях.


- *Мобільне ультразвукове кавітаційне обладнання для отримання питної води в польових умовах.* В запропонованому ультразвуковому обладнанні висока інтенсивність ультразвуку досягається за рахунок акустичного трансформатора тиску, що необхідно для інактивації шкідливих для здоров'я людини мікроорганізмів.


- *Ультразвукове кавітаційне обладнання для польових шпиталів.* Можливості ультразвукової кавітації щодо інактивації мікроорганізмів та очищення твердих і еластичних поверхонь були використані при створенні кавітаційного приладу для знезараження та очищення медичного інструментарію в польових шпиталях.

Таким чином, значна кількість накопичених результатів відносно ефективності застосування ультразвукових технологій для підвищення надійності та якості промислової продукції у різних галузях господарства, дозволяє зробити висновок щодо важливості розвитку цього науково-технічного напрямку для економіки України.


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: 379, у т.ч. 10 монографій, 2 нормативних документи, 367 статей (58 - у міжнародних виданнях). Новизну та конкурентоспроможність технічних рішень захищено 76 діючими патентами. Згідно бази SCOPUS загальне число посилань на публікації авторів складає 1122, h-індекс – 16; згідно бази Google Scholar загальна кількість посилань – 2133, h-індекс – 22.

 Б.М. Мордок

 О.Ф. Луговський

 І.М. Ключков

 Г.О. Линник

 В.І. Прокопенко

 С.М. Волошко

 С.О. Соловей

 Т.А. Красовський