



**МОРДЮК**

**Богдан Миколайович** — доктор фізико-математичних наук, завідувач відділу фізичних основ інженерії поверхні Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України

## УЛЬТРАЗВУКОВІ МЕТОДИ МОДИФІКУВАННЯ ПОВЕРХНІ ТА ДІАГНОСТИКИ НОВІТНІХ МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ

**За матеріалами доповіді на засіданні  
Президії НАН України 23 лютого 2022 року**

*У доповіді наведено аналіз ефективності методу високочастотного ударного проковування ультразвуковим інструментом (УЗУО, або ВМП). Розглянуто механізми формування нанорозмірних зерених структур і композитів, перерозподілу напружень, можливості усунення дефектів і поруватості в поверхневих шарах металевих матеріалів, отриманих за допомогою традиційних і новітніх адитивних технологій 3D-друку і призначених для виробництва зварних конструкцій і споруд, а також методології ультразвукових прецизійних вимірювань і неруйнівного контролю. Окреслено перспективи впровадження цих методів у транспортному машинобудуванні та медицині для забезпечення підвищеного ресурсу, опору втомі, корозії та зношуванню.*

**Ключові слова:** фізика металів, інженерія поверхні, високочастотна ударна обробка, деформаційні наноструктури та композити, перерозподіл напружень, зварні з'єднання, біоматеріали, адитивні технології 3D-друку, ультразвукові прецизійні вимірювання, неруйнівний контроль.

Розвиток техніки потребує виробництва великих обсягів традиційних і новітніх конструкційних матеріалів, від високих фізико-механічних характеристик яких залежать службові властивості та довговічність продукції, насамперед відповідальних виробів і конструкцій. Максимально можливе подовження робочого ресурсу деталей, машин і конструкцій, підвищення безпеки їх експлуатації, зменшення кількості техногенних аварій і катастроф є одними з найголовніших технічних завдань сьогодення.

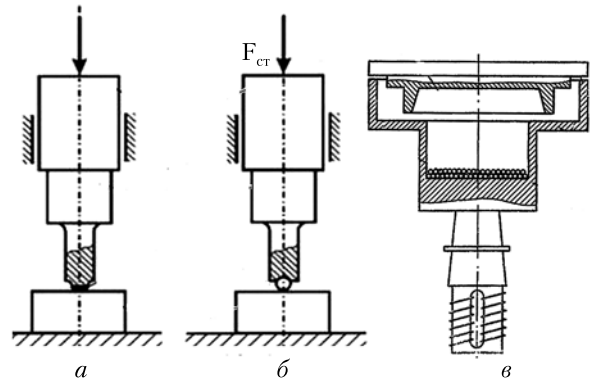
У цьому аспекті дуже важливою є обробка поверхні, оскільки опір корозії, зношуванню та втомі значною мірою зумовлений шорсткістю поверхні, структурним і напруженим станом поверхневих шарів металевих матеріалів [1–4]. Саме тому розроблення й удосконалення нових методів модифікування металевих поверхонь — один з тих напрямів сучасного мате-

ріалознавства, які сьогодні перебувають у полі особливої уваги світової наукової спільноти.

Аналіз динаміки економічних показників провідних країн світу свідчить про щорічне істотне зростання ринку інженерії поверхні захисних покриттів та фінішної обробки металевих виробів. Інтенсивні дослідження в цій галузі проводять у багатьох світових наукових центрах. В Україні також є зацікавленість підприємств транспортного машинобудування у впровадженні сучасних методів модифікування поверхні металевих виробів. Серед українських наукових центрів, які працюють за цим напрямом досліджень, можна відзначити Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Національну металургійну академію України та ін.

Незалежно від технології виготовлення матеріалів (традиційні методи «віднімання», застосовані після литва, чи новітні адитивні технології 3D-друку) важливою умовою для досягнення їх високих фізико-механічних характеристик є усунення дефектів у поверхневих шарах, а саме: розмірної та орієнтаційної неоднорідності зерен, залишкових пор, тріщин, непроварів, залишкових напружень розтягу, надмірної шорсткості поверхні тощо [1, 5–9]. Ефективним способом усунення таких дефектів може бути додаткове модифікування/оздоблення поверхні методами інтенсивної пластичної деформації, в тому числі за допомогою високочастотного механічного проковування (ВМП) ультразвуковими ударними інструментами [7–16].

Українські вчені одними з перших у світі започаткували роботи за цим науковим напрямом ще в 70-х роках ХХ ст. [10, 17, 18]. На сьогодні активно досліджуються і розвиваються три основні ультразвукові методи модифікування поверхневих шарів металевих матеріалів для поліпшення їх властивостей.



**Рис. 1.** Схеми ультразвукового ударного навантаження поверхні: *а* – БУФО; *б* – УЗУО (ВМП); *в* – обробка кульками в УЗ-стакані

1) Безабразивна ультразвукова фінішна обробка (БУФО) полягає у вигладжуванні поверхні деталей твердосплавним або алмазним інструментом, що вібриє з ультразвуковою частотою (рис. 1*а*) [3, 8, 19, 20].

2) Ультразвукова ударна обробка з високочастотним механічним проковуванням (УЗУО, або ВМП) (рис. 1*б*). Розробники – П.П. Міхєєв, Г.І. Прокопенко, К. Графф та ін. [10, 12–16, 22–24]. Інтенсивні вимушені коливання ударників з високою частотою (~1–3 кГц) спричиняють значну пластичну деформацію поверхневого шару металу, перерозподіл та формування залишкових напружень стиснення і текстури в ньому, а також підвищення механічних характеристик виробів, зварних конструкцій відповідального призначення.

3) Обробка сталевими кульками в ультразвуковому стакані. Під дією коливань та «ультразвукового вітру» кульки інтенсивно переміщуються в замкнутому об'ємі стакана, і завдяки численним ударам відбувається зміцнення поверхні деталі (рис. 1*в*). Розробники – І.А. Стебельков (Україна) [18], К. Lu, J. Lu (Китай) [21]. Цей спосіб застосовують в авіаційній промисловості для зміцнення деталей газотурбінних двигунів як в Україні, так і в усьому світі.

Слід зазначити, що метод УЗУО (ВМП) є найбільш контрольованим та ефективним для досягнення зумовленого деформацією по-



**Рис. 2.** Сучасне ультразвукове обладнання та змінні ударні головки

дрібнення зеренної структури до наномасштабного рівня, деформаційного зміцнення та підвищення функціональних характеристик матеріалів, серед яких основними є опір втомі [24–30], опір корозії [30–35] та опір зношуванню [36–41].

Упродовж останніх 20 років в Інституті металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України із залученням науковців НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського» було проведено систематичні дослідження структурних перебудов, фазових перетворень і мікромеханізмів деформаційної наноструктуризації в поверхневих шарах металів і сплавів [7, 13, 14, 34, 42–44]. Спільно з Київським академічним університетом МОН України і НАН України виготовлено низку зразків ультразвукового обладнання (рис. 2) (Т.А. Красовський, Г.І. Прокопенко) [45, 46]. Запропоновано методика розрахунку і способи виготовлення ультразвукових випромінювачів різного призначення на основі останніх досягнень у мікропроцесорній техніці, розроблено нові принципові схеми з цифровим регулюванням електричних параметрів і керування.

В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України виконано великий комп-

лекс експериментальних і теоретичних досліджень. Отримані результати дозволяють 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 тощо. Обґрунтовано ефективність проведення ремонтно-відновлювальних робіт зварюванням конструкцій і споруд з подальшим зміцненням ремонтних швів ВМП (УЗУО), що дає змогу повністю відновити цілісність, несучу здатність та гарантовано подовжити проєктний термін безпечної експлуатації виробів і споруд з тріщинами втомі [47–54]. Отже, можна стверджувати, що саме українські вчені створили наукові й технологічні основи УЗУО. Розроблено рекомендації щодо поліпшення наявних технологій обробки металевих конструкційних матеріалів та зварних з'єднань відповідальних конструкцій, що є необхідною умовою підвищення безпеки на транспорті (залізниця, трубопроводи тощо), а також у мосто-, судно-, авіабудуванні.

Рішенням Міжнародного інституту зварювання (МІЗ) від 2007 р. технологію УЗУО було внесено до переліку рекомендованих способів обробки зварних з'єднань. Цьому передували неодноразові доповіді на засіданнях МІЗ про результати роботи українських вчених щодо відпрацювання технології УЗУО (керівники робіт – Л.М. Лобанов, В.В. Книш, Г.І. Прокопенко та ін.) як одного з найбільш перспективних способів значного підвищення опору втомі зварних конструкцій, поліпшення умов праці та економічності виконання робіт [11–15, 47–59].

В Інституті металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України створено фізичні основи ультразвукового ударного зміцнення металевих поверхонь. Уперше розроблено фізичні моделі, що пов'язують збільшення густини дислокацій і точкових дефектів зі зміцненням, зниженням деформуючих зусиль, аномальним масопереносом атомів, а також з релаксацією та перерозподілом залишкових напружень. Проведено систематичні дослідження еволю-

ції структурно-фазового стану металів і сплавів із застосуванням широкого кола поверхнево чутливих методів аналізу, які дозволяють отримувати інформацію на атомно-молекулярному рівні про будову найтонших поверхневих шарів (завтовшки кілька нанометрів), у комплексі з мікроскопічними методами, що дають картину структурно-фазових перебудов у процесі модифікації поверхневих шарів мікронної товщини. Встановлено фізичні мікро-механізми структурних перебудов та формування нанорозмірних, ультрадисперсних і градієнтних зеренних структур [7, 13, 14, 60–63], а також нано- і мікрокомпозитів та шаруватих структур в ударно деформованих поверхневих шарах [64–69].

Встановлено кореляційні залежності «параметри обробки – структура – властивості», а також параметри УЗУО, які відіграють вирішальну роль у формуванні нанорозмірних зеренних структур у тонких поверхневих шарах, а саме: високі ступінь і швидкість деформації; наявність багаторазових різноспрямованих ударних імпульсів і зсувної компоненти навантаження; деформаційне розігрівання, що сприяє динамічній рекристалізації або фазовим перетворенням. Загалом структурні перебудови відбуваються в кілька циклів у такій послідовності:

1) фрагментація за умов інтенсивної пластичної деформації (ІПД) унаслідок дислокаційних перебудов, двійникування або фазових перетворень;

2) динамічне повернення або рекристалізація за умов деформаційного розігрівання.

Докладно вивчено дифузійні процеси у наноструктурованих металах і сплавах, у тому числі одержаних методом УЗУО. Показано, що дифузія та механохімічні реакції (окиснення/азотування) на поверхні відіграють важливу роль у процесах, ініційованих інтенсивною деформацією [70–75], зокрема у формуванні «білих шарів» на сталях [35, 39, 40]. Ці процеси сприяють підвищенню фізико-механічних характеристик (твердість, опір втомі, зношуванню та корозії) традиційних конструкційних матеріалів на основі заліза, алюмінію, нікелю й

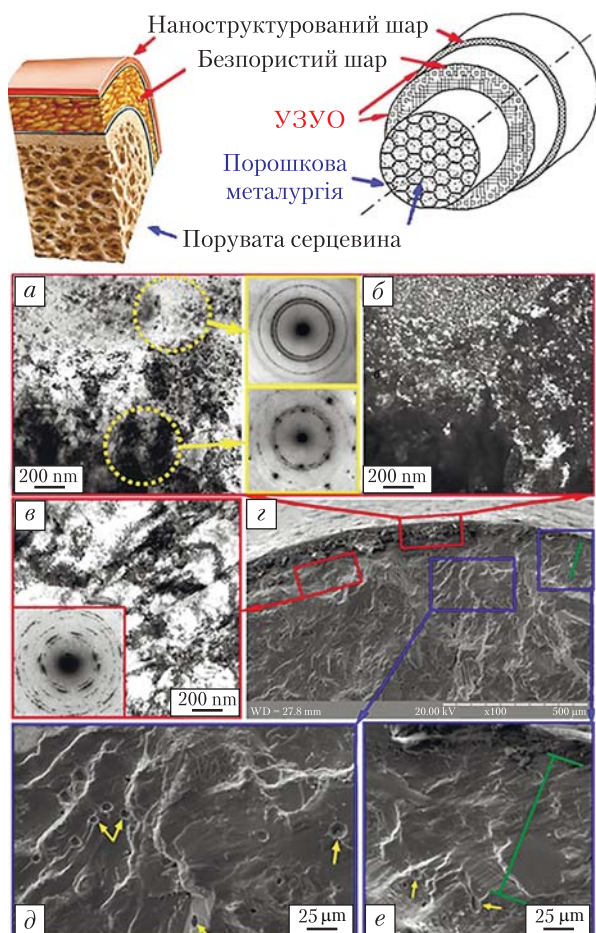
титану, а також новітніх високо(середньо)ентропійних та спеціальних багатокомпонентних сплавів [77, 78], отриманих з використанням сучасних адитивних технологій 3D-друку, які все ширше застосовують в аерокосмічній та автомобілебудівній промисловості, а також у медицині [79–82].

Спільно з фахівцями Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України та НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського» було показано можливість одночасного підвищення твердості, опору корозії та зношуванню сплавів алюмінію [64, 65] і титану [36, 67, 68, 71] внаслідок формування захисних окисновмісних і шаруватих композитних покриттів упродовж УЗУО із застосуванням пластичних ударних елементів [34] або введенням у зону інтенсивної пластичної деформації зміцнювальних нано- і субмікророзмірних порошків з подальшим окисненням [68]. Наноструктурований або аморфний поверхневий шар і проміжний шар з градієнтом твердості за рахунок композитного та матричного зміцнення забезпечують високу стійкість до зовнішніх впливів в умовах довготривалого використання. Модифіковані в такий спосіб матеріали мають кращі перспективи для використання в авіа- та автомобілебудуванні.

Застосування УЗУО для деформації поверхневих шарів пористих титанових напівфабрикатів, одержаних методами порошкової металургії з порошку гідриду титану (О.М. Івашишин, Д.Г. Саввакін), дає змогу отримувати задані пружні властивості та підвищений опір втомі завдяки формуванню пористої серцевини, безпористого прошарку та наноструктурованого поверхневого шару [82] (рис. 3).

Додатковим позитивним фактором, який забезпечує підвищені антикорозійні властивості, є ініційоване високочастотною ударною деформацією механохімічне окиснення поверхні та формування тонкого оксидного шару, яке спостерігалося на різних сплавах біомедичного призначення – CoCrMo [70], Ti6Al4V [71], ZrTiNb [72], ZrNb [74–76], TiZrHfNbTa [78]. Така шарувата структура повторює будову кістки, тому перспективним є використання цього





**Рис. 3.** Схема шаруватої структури кістки та поруватого титанового матеріалу після УЗУО, придатного для біомедичного застосування; ТЕМ- і РЕМ-зображення структури його поверхневого (а, б) та проміжного (в, з, д) шарів і поруватої серцевини (е)

матеріалу для імплантів з високою біомеханічною сумісністю з тканинами людського організму (низький модуль пружності, високі корозійна стійкість і втомна довговічність) [78, 82]. Високу ефективність щодо підвищення зносостійкості та корозійної стійкості сталей різного класу показали комбіновані методи модифікування поверхні із залученням електроіскрового легування [28, 30, 67] або лазерної термічної дії [35, 39, 61–63] та фінішної УЗУО.

На основі аналізу бінарних систем перехідних металів VI-B і VIII-B груп із залізом, їх схильності до формування твердих розчинів,

інтерметалідних фаз і карбідів, що впливає на співвідношення «міцність – пластичність», їх електрохімічних характеристик, зумовлених атомною будовою (кількість валентних електронів і розмір атомів), що забезпечує певні корозійні властивості системи «модифікований шар – залізна основа», запропоновано науково обґрунтовані критерії вибору легувальних елементів для використання в процесі електроіскрової модифікації сталевих поверхонь, які сприятимуть зміцненню та підвищенню опору зношуванню, корозії та корозійній втомі.

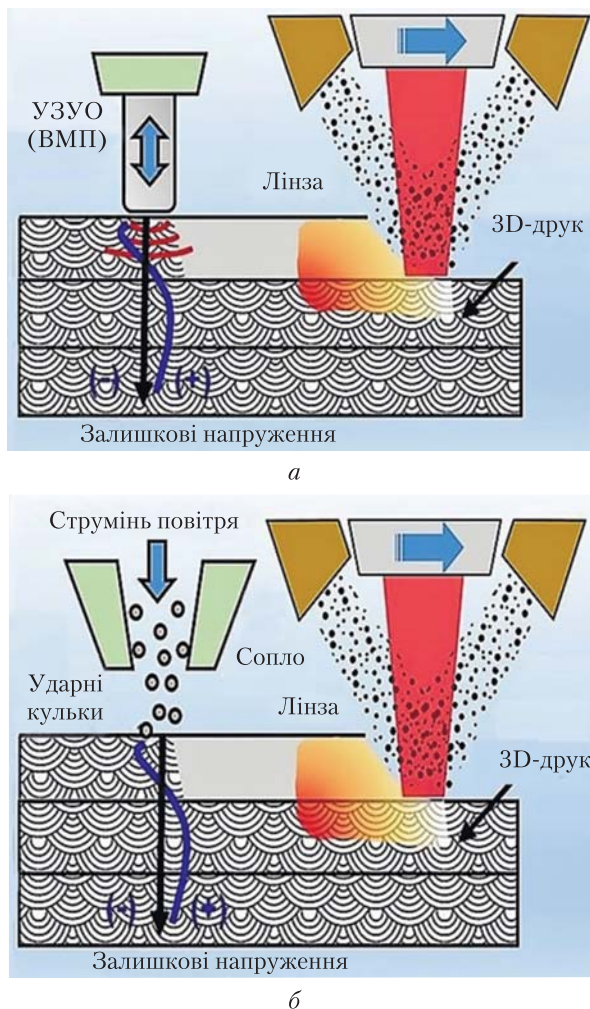
Експериментально досліджені механічні та корозійні властивості, а також характеристики корозійної втоми зразків маловуглецевих низьколегованих сталей після електроіскрового легування (ЕІЛ) хромом, нікелем і молібденом з наступною фінішною УЗУО показали прийнятність висунутих критеріїв. Встановлено, що утворення дисперсних карбідних і інтерметалідних фаз у твердих розчинах Fe-Cr і Fe-Mo, сформованих за умов ЕІЛ ливарної сталі 20ГЛ, забезпечує зростання її твердості (у 3–4 рази) та зносостійкості (на 40 %), а додаткова ІПД модифікованих шарів методом УЗУО приводить до підвищення втомної міцності (на 30 %) на базі  $10^7$  циклів [28, 30]. Використання як легувального елемента хрому замість нікелю при комбінванні ЕІЛ+УЗУО зварних з'єднань мостової сталі 15ХСНД є більш ефективним з огляду на підвищення втомної довговічності зварних зразків у корозійному середовищі [47–51], що пов'язано з вищою антикорозійною дією модифікованого хрому шару (більш від'ємним електрохімічним потенціалом хрому порівняно з потенціалом заліза) навіть у разі його пошкодження за умов циклічного навантаження. Отримані результати підтверджено випробуваннями реальних виробів на втомну міцність. Бокові рами залізничного вагону – критичні місця найбільш імовірного зародження втомних тріщин, які було оброблено методом УЗУО, показали збільшення довговічності на 60 %.

Досліджено кореляцію між структурно-фазовим станом, твердістю і зносостійкістю поверхні конструкційних (сталь 45) [40, 61] та

інструментальних (X12MФ, 9Г2Ф) [39, 41, 63] сталей після лазерного термозміцнення і комбінованої лазерної обробки (ЛО) та УЗУО. В інструментальних сталях спостережуване збільшення твердості зумовлене, відповідно, нанодвійниками (ЛО), щільними дислокаційними сітками (УЗУО) та дислокаційними комітками/нанозернами, зафіксованими дисперсними карбідами (ЛО + УЗУО), що утворюються в поверхневих шарах сталі. Зміцнення після комбінованої обробки завдяки фазовим перетворенням у зоні надшвидкого термоциклювання під час лазерного опромінювання та послідовним змінам дислокаційної структури, виділення вторинних карбідів  $(Cr,Fe)_7C_3$  і подрібнення кристалітів (до  $\sim 100$  нм) в процесі УЗУО забезпечує високу зносостійкість сталі X12MФ. На поверхні конструкційних сталей формуються «білі шари», що містять нанорозмірні мартенсит і ферит, пересичений вуглецем. Показано, що у підвищенні зносостійкості матеріалу шорсткість поверхні відіграє визначальну роль на стадії припрацювання, а твердість поверхні стає вирішальним фактором в умовах довгострокових випробувань або експлуатації.

В Інституті електрозварювання Є.О. Патона НАН України проведено систематичні дослідження ефективності застосування ВМП (УЗУО) за допомогою ультразвукового інструменту для підвищення опору втомі зварних з'єднань сталей різного класу міцності та алюмінієвих сплавів. Встановлено загальні закономірності зміни опору втомі зварних з'єднань у результаті ВМП, що визначаються механічними властивостями матеріалу, рівнем концентрації робочих напружень, асиметрією циклу зовнішнього навантаження, величиною та знаком формованих обробкою залишкових напружень у зоні концентраторів. Розроблено методіку розрахункового прогнозування ефективності ВМП залежно від зазначених вище факторів [23].

Показано, що ВМП (УЗУО) є продуктивним та економічним способом підвищення опору втомі зварних з'єднань сталей різного класу міцності та алюмінієвих сплавів. Ефек-



**Рис. 4.** Схеми комбінованого застосування ультразвукових методів модифікування поверхні для змінення властивостей 3D-друкованого матеріалу: *а* – УЗУО (ВМП); *б* – ультразвукова обробка кульками, або дробоструминна обробка [5, 6]

тивність ВМП зварних з'єднань збільшується з підвищенням міцності вихідного матеріалу та зі зниженням коефіцієнта асиметрії циклу зовнішнього навантаження  $R_\sigma$ , залежить від параметрів ВМП, але практично не залежить від типу використовуваного перетворювача ультразвукових коливань (магнітострикційний або п'єзокерамічний). Локальне зміцнення металу в зоні переходу від шва до основного матеріалу в результаті пластичного деформування при ВМП не приводить до зниження

в'язкості руйнування зварного з'єднання в цілому [12].

Отримані результати експериментальних досліджень ефективності застосування ВМП для підвищення опору втомі зварних з'єднань сталей різних класів міцності та алюмінієвих сплавів, досвід його застосування в суднобудуванні, підсумки дослідно-промислових перевірок у мостобудуванні нововиготовлених та експлуатованих пролітних будов відображено в нормах проектування та виготовлення зварних конструкцій [8].

Слід також відзначити перспективність застосування деформаційних методів обробки поверхні, в тому числі УЗУО та ультразвукової обробки кульками у вібраційному стакані, для модифікації поверхні виробів, отриманих з використанням адитивних технологій 3D-друку (рис. 4). Це пов'язано з можливістю усунення або принаймні зменшення дефектності [5, 6, 79–81]. Йдеться насамперед про дефекти поверхневих шарів матеріалів, сформованих спрямованими електронними чи лазерними пучками (залишкова пористість, шорсткість, непровари, напруження розтягу, наявність значної розмірної та орієнтаційної неоднорідності зеренної структури), які значно погіршують фізико-механічні та антикорозійні властивості всього виробу. Залежно від бажаного результату доцільно використовувати модифікацію поверхні або як фінішне оздоблення виробу [79], або на проміжних етапах пошарового 3D-друку [5, 6]. Той чи інший метод модифікації поверхні обирають з огляду на ступінь дефектності та складність форми 3D-друкованого виробу, а також враховуючи співвідношення витрат енергії і часу обробки [79].

Важливим чинником поліпшення службових характеристик матеріалів для безпечної експлуатації виробів і конструкцій є можливість експрес-контролю їх дефектності та напруженого стану для корегування технологічних схем виробництва, а також діагностика в процесі експлуатації. За допомогою розробленої в Інституті металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України апаратури і методики ультразвукових досліджень вивчено вплив штатних технологічних

режимів обробки на акустичні і пружні властивості та текстурні параметри труб-оболонки ТВЕЛів і фрагментів каналних труб зі сплавів Zr-Nb, проведено аналіз температурних полів, залишкових напружень і текстуроутворення в корпусних сталях і виробах з одностороннім доступом (наприклад, корпус ядерного реактора), а також встановлено температурні залежності пружних модулів кристалічних матеріалів (О.І. Запорожець) [83–86].

Ульт्राакустичні дослідження із застосуванням розробленої апаратури дозволяють виявляти особливості критичної поведінки кристалів в околі фазових перетворень в умовах поверхневих та об'ємних зовнішніх впливів, вивчати комплексні пружні та інші властивості пружно неоднорідних та анізотропних матеріалів, у тому числі новітніх надтвердих матеріалів, високо- та середньоентропійних сплавів (TiZrNbTa, TiZrNb) і сплавів, отриманих за допомогою адитивних технологій 3D-друку (Ti6Al4V, IN718) та модифікованих поверхневими видами деформації. Вдосконалюються методи розроблення автоматизованої апаратури в мегагерцовому частотному діапазоні для прецизійних досліджень твердих тіл і неруйнівного контролю напівфабрикатів і промислових виробів.

Прецизійні вимірювання об'ємних швидкостей ультразвуку ( $v_{ij}$ ) в ортогональних напрямках на різних ділянках зразків зі сплавів медичного призначення (систем TiZrNb і TiZrNbTa) в литому стані та після УЗУО, а також густини ( $\rho$ ), дозволили отримати кількісні дані щодо модулів Юнга ( $E$ ), зсуву ( $G$ ), всебічного стиснення ( $B$ ), коефіцієнта Пуассона ( $\eta$ ), їх твердості за Віккерсом ( $HV$ ) та характеристики пластичності за концепцією Ю.В. Мільмана ( $\delta_H$ ) [41]. Визначено вплив концентрації Zr, Nb і Ta на досліджувані параметри. Виявлено, що, регулюючи режими УЗУО, можна керувати процесом зміцнення не лише поверхневих шарів зразка, а й його об'єму, а також корегувати поряд з іншими фізико-механічними властивостями ступінь неоднорідності та анізотропії досліджуваних сплавів, зокрема після комбінованої обробки поверхні.



Найбільш перспективною є модифікація поверхні ультразвуковими методами ПД у комплексі з дією концентрованих джерел високої енергії (лазерний, електронний промені, електроіскра), що приводить до формування поверхневих шарів і нашарувань у мікро- і наноструктурованому стані з підвищеною міцністю за достатньої пластичності, збільшеного опору до зношування, корозії та втоми, а отже, дозволяє забезпечити широке застосування новітніх металевих матеріалів на основі алюмінію, заліза, міді, нікелю, кобальту і титану в аерокосмічній промисловості, машинобудуванні, на транспорті та в медицині.

**Висновки.** Ультразвукові методи модифікування поверхні за останні 20 років набули широкого розвитку. Отримано вагомі результати щодо встановлення фізичних механізмів формування наноструктурованих поверхневих шарів і композитів, усунення поверхневих дефектів, зниження шорсткості та поруватості, сприятливого перерозподілу залишкових напружень в умовах високочастотної ударної дії на поверхню металевих матеріалів ультразвукових інструментів з проміжними ударними елементами, що дало змогу істотно підвищити фізико-механічні властивості металевих матеріалів та експлуатаційні характеристики виробів і конструкцій, створених за традиційними

технологіями зварювання або за новітніми адитивними технологіями 3D-друку.

Прецизійні методи вимірювання об'ємних швидкостей ультразвуку показали свою ефективність для визначення фізичних характеристик (пружних модулів), текстури, напруженого стану та температурних полів у неоднорідних і анізотропних матеріалах, а також для експрес-діагностики якості металевих матеріалів і виробів. У разі подальшого вдосконалення з використанням лазерів для безконтактної генерації/реєстрації ультразвукових хвиль апаратура та методологія можуть бути застосовані в різних важливих галузях промисловості та енергетики, зокрема для вимірювань в умовах підвищених температур.

В Україні за цим напрямом ефективно працюють кілька наукових груп, отримуючи результати найвищого рівня. Актуальним є подальший розвиток співпраці між фахівцями академічних інститутів і представниками закладів вищої освіти з метою ширшого впровадження ультразвукового обладнання, методів діагностики і технологій високочастотного механічного проковування (ударної обробки) зварних з'єднань і поверхні металевих виробів ультразвуковим інструментом на машинобудівних, транспортних підприємствах та в медицині.

## REFERENCES

### [СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

1. Sulima A.M., Evstigneev M.I. *Kachestvo poverkhnostnogo sloya i ustalostnaya prochnost' detaley iz zharoprochnykh i titanovykh splavov (Quality of surface layer and fatigue strength of details made of heat-resistant and titanium alloys)*. Moscow: Mashinostroenie, 1974. (in Russian).
2. Severdenko V.G., Klubovich V.V., Stepanenko A.V. *Obrabotka metallov davleniyem s ultrazvukom (Ultrasonic pressure treatment of metals)*. Minsk: Nauka i Tekhnika, 1973. (in Russian).
3. Mukhanov I.I. *Impulsnaya uprochnyayushche-chistovaya obrabotka detaley mashin ultrazvukovym instrumentom (Pulse hardening and finishing of machine parts with ultrasonic tools)*. Moscow: Mashinostroenie, 1978. (in Russian).
4. Belotsky A.V. et al. *Ultrazvukovoye uprochneniye metallov (Ultrasonic hardening of metals)*. Kyiv: Tekhnika, 1989. (in Russian).
5. Sealy M.P. et al. Hybrid Processes in Additive Manufacturing. *J. Manuf. Sci. Eng.* 2018. **140** (6): 060801. <https://doi.org/10.1115/1.4038644>
6. Pragana J.P.M. et al. Hybrid metal additive manufacturing: A state-of-the-art review. *Adv. Industr. Manuf. Eng.* 2021. **2**: 100032. <https://doi.org/10.1016/j.aime.2021.100032>
7. Prokopenko G.I., Mordyuk B.M., Vasyliiev M.O., Voloshko S.M. *Fizychni Osnovy Ul'trazvukovogo Udarnogo Zmitsnennya Metalevykh Poverkhon' (Physical Principles for Ultrasonic Impact Hardening of Metallic Surfaces)*. Kyiv: Naukova Dumka, 2017 (in Ukrainian).



8. Prokopenko G.I. (ed.). *Ul'trazvukova Udarna Obrobka Konstruktсий i Sporud Tansportnogo Mashynobuduvannya (Ultrasonic impact treatment of constructions and structures of transport machine building)*. Sumy: Universitetska Knyga, 2020 (in Ukrainian).
9. Marquis G., Barsoum Z. Fatigue strengthening of steel structures by high-frequency mechanical impact: proposed procedures and quality assurance guidelines. *Welding in the World*. 2013. **57**: 803. <https://doi.org/10.1007/s40194-013-0075-x>
10. Kotko V.A., Prokopenko G.I., Firstov S.A. Structural changes in ultrasonic molybdenum. *Fizika Metalov Metaloved*. 1974. **37** (2): 444.
11. Gust W. et al. Ultrasonic shock treatment of welded joints. *Mater. Sci*. 1999. **35** (5): 678. <https://doi.org/10.1007/BF02359355>
12. Lobanov L.M., Kirian V.I., Knysh V.V., Prokopenko G.I. Improvement of fatigue resistance of welded joints in metal structures by high-frequency mechanical peening. *Automatic Welding*. 2006. (9): 2. (in Russian).
13. Mordyuk B.N., Prokopenko G.I. Ultrasonic impact peening for the surface properties' management. *J. Sound Vibration*. 2007. **308** (3-5): 855. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2007.03.054>
14. Mordyuk B.N., Prokopenko G.I. Ultrasonic impact treatment – an effective method for nanostructuring the surface layers in metallic materials. In: Aliofhazraei M. (ed.) *Handbook of Mechanical Nanostructuring*. 2015. **2**: 417. <https://doi.org/10.1002/9783527674947.ch17>
15. Yıldırım H.C., Marquis G. Overview of Fatigue Data for High Frequency Mechanical Impact Treated Welded Joints. *Welding in the World*. 2012. **56**: 82. <https://doi.org/10.1007/BF03321368>
16. Malaki M., Ding H. A review of ultrasonic peening treatment. *Mater. Design*. 2015. **87**: 1072. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.08.102>
17. Polotsky I.G., Nedoseka A.Y., Prokopenko G.I. et al. Reduction of residual welding stresses by ultrasonic treatment. *Automatic Welding*. 1974. (5): 74.
18. Kulemin A.V., Kononov V.V., Stebelkov I.A. Enhancement in fatigue strength of details by ultrasonic surface treatment. *Strength Mater*. 1981. (1): 70.
19. Amanov A. et al. Microstructural evolution and surface properties of nanostructured Cu-based alloy by ultrasonic nanocrystalline surface modification technique. *Appl. Surf. Sci*. 2016. **388** (A): 185. <https://doi.org/10.1016/j.apusc.2016.01.237>
20. John M. et al. Ultrasonic Surface Rolling Process: Properties, Characterization, and Applications. *Appl. Sci*. 2021. **11**(22): 10986. <https://doi.org/10.3390/app112210986>
21. Lu K., Lu J. Nanostructured surface layer on metallic materials induced by surface mechanical attrition treatment. *Mater. Sci. Eng. A*. 2004. **375–377**: 38. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.261>
22. Patent US. No. 6467321B2. Prokopenko G.I. et al. Device for ultrasonic peening of metals. Publ. 07.02.2002.
23. Patent EU. No. EP1447455A1. Lobanov L. et al. Method for processing welded metal work joints by high-frequency hammering. Publ. 18.08.2004.
24. Mordyuk B.N., Prokopenko G.I. Fatigue life improvement of  $\alpha$ -titanium by novel ultrasonically assisted technique. *Mater. Sci. Eng. A*. 2006. **437**: 396. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.07.119>
25. Vasylyev M.O. et al. Microstructure Evolution of the Carbon Steels during Surface Severe Plastic Deformation. *Progress Metal. Phys*. 2021. **22** (4): 562. <https://doi.org/10.15407/ufm.22.04.562>
26. Markovs'kyi P.E. et al. Improvement of the fatigue characteristics of VT1-0 titanium alloy by the surface mechanical and rapid thermal treatment. *Mater. Sci*. 2006. **42** (3): 376. <https://doi.org/10.1007/s11003-006-0092-7>
27. Dekhtyar A.I. et al. Enhanced fatigue behavior of powder metallurgy Ti-6Al-4V alloy by applying ultrasonic impact treatment. *Mater. Sci. Eng. A*. 2015. **641**: 348. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.06.072>
28. Mordyuk B.N. et al. Improved fatigue behavior of low-carbon steel 20GL by applying ultrasonic impact treatment combined with the electric discharge surface alloying. *Mater. Sci. Eng. A*. 2016. **659**: 119. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.02.036>
29. Mordyuk B.N., Prokopenko G.I., Milman Yu.V. et al. Enhanced fatigue durability of Al-6Mg alloy by applying ultrasonic impact peening: Effects of surface hardening and reinforcement with AlCuFe quasicrystalline particles. *Mater. Sci. Eng. A*. 2013. **563**: 138. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.11.061>
30. Mordyuk B.N. et al. Effects of ultrasonic impact treatment combined with the electric discharge surface alloying by molybdenum on the surface related properties of low-carbon steel G21Mn5. *Surf. Coat. Technol*. 2016. **309**: 969. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.10.050>
31. Mordyuk B.N., Prokopenko G.I., Vasylyev M.A. et al. Effect of structure evolution induced by ultrasonic peening on the corrosion behavior of AISI-321 stainless steel. *Mater. Sci. Eng. A*. 2007. **458**: 253. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.12.049>

32. Petrov Yu.N., Prokopenko G.I. et al. Influence of microstructural modifications induced by ultrasonic impact treatment on hardening and corrosion behavior of wrought Co-Cr-Mo biomedical alloy. *Mater. Sci. Eng. C*. 2016. **58**: 1024. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.09.004>
33. Khripta N.I. et al. Surface Layers of Zr-18% Nb Alloy Modified by Ultrasonic Impact Treatment: Microstructure, Hardness and Corrosion. *J. Mater. Eng. Perform.* 2017. **26** (11): 5446.
34. Vasylyev M.A. et al. Corrosion of 2024 alloy after ultrasonic impact cladding with iron. *Surf. Eng.* 2018. **34**: 324. <https://doi.org/10.1080/02670844.2017.1334377>
35. Lesyk D.A. et al. Influence of combined laser heat treatment and ultrasonic impact treatment on microstructure and corrosion behavior of AISI 1045 steel. *Surf. Coat. Technol.* 2020. **401**: 126275. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126275>
36. Mordiyuk B.N. et al. Ti particle-reinforced surface layers in Al: Effect of particle size on microstructure, hardness and wear. *Mater. Characterization*. 2010. **61** (11): 1126. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2010.07.007>
37. Mordiyuk B.N. et al. Structure and wear of Al surface layers reinforced with AlCuFe particles using ultrasonic impact peening: Effect of different particle sizes. *Surf. Coat. Technol.* 2011. **205**: 5278. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.05.046>
38. Mordiyuk B.N. et al. Wear assessment of composite surface layers in Al–6Mg alloy reinforced with AlCuFe quasicrystalline particles: Effects of particle size, microstructure and hardness. *Wear*. 2014. **319**: 84. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.07.011>
39. Lesyk D.A. et al. Microstructure related enhancement in wear resistance of tool steel AISI D2 by applying laser heat treatment followed by ultrasonic impact treatment. *Surf. Coat. Technol.* 2017. **328**: 344. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.08.045>
40. Lesyk D.A. et al. Combining laser transformation hardening and ultrasonic impact strain hardening for enhanced wear resistance of AISI 1045 steel. *Wear*. 2020. **462**: 203494. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203494>
41. Milman Yu.V. et al. New Opportunities to Determine the Rate of Wear of Materials at Friction by the Indentation Data. *Progress Phys. Met.* 2020. **21**: 554. <https://doi.org/10.15407/ufm.21.04.554>
42. Mordiyuk B.N., Prokopenko G.I. et al. Characterization of ultrasonically peened and laser-shock peened surface layers of AISI 321 stainless steel. *Surf. Coat. Technol.* 2008. **202**: 4875. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.04.080>
43. Lesyk D.A. et al. Mechanical Surface Treatments of AISI 304 Stainless Steel: Effects on Surface Microrelief, Residual Stress, and Microstructure. *J. Mater. Eng. Perform.* 2019. **28**: 5307. <https://doi.org/10.1007/s11665-019-04273-y>
44. Vasylyev M.A. et al. Influence of microstructural features and deformation-induced martensite on hardening of stainless steel by cryogenic ultrasonic impact treatment. *Surf. Coat. Technol.* 2018. **343**: 57. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.11.019>
45. Patent of Ukraine. No. 109975. Prokopenko G.I., Krasovsky T.A., Cherepin V.T., Mordiyuk B.N. Ultrasonic hand tool for deformation hardening and relaxation treatment of metals. Publ. 26.10.2015. (in Ukrainian).
46. Prokopenko G.I., Mordiyuk B.N., Krasovsky T.A., Knysh V.V., Solovej S.O. Creation of industrial equipment for high-frequency mechanical impact on railway car building products and methods for assessing the quality of treatment. *Science and Innovations*. 2019. **15**(2): 25. <https://doi.org/10.15407/scin15.02.027>
47. Knysh V. et al. Influence of hardening by high-frequency mechanical impacts of butt-welded joints made of 15KhSND steel on their atmospheric corrosion and fatigue fracture resistance. *Mater. Sci.* 2018. **54**(3): 421. <https://doi.org/10.1007/s11003-018-0201-4>
48. Knysh V. et al. Influence of the accelerated corrosion exposure on the fatigue behaviour of welded joints treated by high frequency mechanical impact. *Int. J. Fatigue*. 2021. **149**: 106272. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106272>
49. Knysh V.V., Solovej S.O., Nyrkova L.I., Osadchuk S.O. Influence of marine media on the fatigue strength of butt-welded joints of 15KhSND steel hardened by high-frequency mechanical impacts. *Mater. Sci.* 2020. **55**(6): 812. <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00374-5>
50. Knysh V.V., Solovej S.O. et al. Influence of high-frequency peening on the corrosion fatigue of welded joints. *Mater. Sci.* 2017. **53**: 7. <https://doi.org/10.1007/s11003-017-0036-4>
51. Knysh V.V. et al. Increasing Corrosion Fatigue of Welded Joints of Steel 15KhSND with Construction Defects by Electric Discharge Surface Alloying and High Frequency Mechanical Impact. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2019. **41**(12): 1631. <https://doi.org/10.15407/mfint.41.12.1631>
52. Knysh V. et al. Influence of the atmosphere corrosion on the fatigue life of welded T-joints treated by high frequency mechanical impact. *Proc. Struct. Integrity*. 2019. **16**: 73. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.07.024>
53. Knysh V.V., Solovej S.A., Lynnyk G.O. et al. Application of welded studs for fastening the floor of railway bridges. *Automatic Welding*. 2015. (1): 40. <https://patonpublishinghouse.com/as/pdf/2015/pdfarticles/01/7.pdf>

54. Knysh V.V., Klochkov I.N., Pashulya M.P., Motrunich S.I. Increase of fatigue resistance of sheet welded joints of aluminum alloys using high-frequency peening. *Paton Welding Journal*. 2014. (5): 21. <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.05.04>
55. Degtyarev V.A. Assessment of the high-frequency mechanical forging mode effect on fatigue strength of welded joints. *Strength Mater*. 2011. **43**: 154. <https://doi.org/10.1007/s11223-011-9281-1>
56. Statnikov E.S. et al. Physics and mechanism of ultrasonic impact. *Ultrasonics*. 2006. **44**: e533. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2006.05.119>
57. Gao W. et al. Enhancement of the fatigue strength of underwater wet welds by grinding and ultrasonic impact treatment. *Mater. Proc. Tech*. 2015. **223**: 305. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.04.013>
58. Abdulah A., Malaki M., Eskandari A. Strength enhancement of the welded structures by ultrasonic peening. *Mater. & Design*. 2012. **38**: 7. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.01.040>
59. Daavary M., Sadough Vanini S.A. The effect of ultrasonic peening on service life of the butt-welded high-temperature steel pipes. *J. Mater. Eng. Perform*. 2015. **24**: 3658. <https://doi.org/10.1007/s11665-015-1644-5>
60. Volosevich P.Yu., Prokopenko G.I., Mordyuk B.M. Evolution of a dislocation structure under shock impulse loading with different frequencies. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol*. 2000. **22**: 61.
61. Lesyk D.A. et al. Effects of laser heat treatment combined with ultrasonic impact treatment on the surface topography and hardness of carbon steel AISI 1045. *Optics & Laser Technol*. 2019. **111**: 424. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.09.030>
62. Lesyk D.A. et al. Combined Laser-Ultrasonic Surface Hardening Process for Improving the Properties of Metallic Products. In: Ivanov V. et al. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 2019. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-93587-4\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-93587-4_11)
63. Lesyk D.A. et al. Surface microrelief and hardness of laser hardened and ultrasonically peened AISI D2 tool steel. *Surf. Coat. Technol*. 2015. **278**: 108. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.07.049>
64. Mordyuk B.N. et al. Structure, microhardness and damping characteristics of Al matrix composite reinforced with AlCuFe or Ti using ultrasonic impact peening. *Surf. Coat. Technol*. 2010. **204**: 1590. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.10.009>
65. Vasylyev M.A. et al. Synthesis of Deformation-Induced Nanocomposites on Aluminium D16 Alloy Surface by Ultrasonic Impact Treatment. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol*. 2016. **38**(4): 545. <https://doi.org/10.15407/mfint.38.04.0545>
66. Burmak A.P. et al. Synthesis of Composite Layers on Cu–39Zn–1Pb Brass Using Ultrasonic Impact Treatment. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol*. 2020. **42**(9): 1245. <https://doi.org/10.15407/mfint.42.09.1245>
67. Vasylyev M.A. et al. Ultrasonically Nanostructured Electric-Spark Deposited Ti Surface Layer on Ti6Al4V Alloy: Enhanced Hardness and Corrosion Resistance. *Int. J. Surf. Sci. Eng*. 2020. **14**(1): 1–15. <https://doi.org/10.1504/IJSURFSE.2020.10027541>
68. Mordyuk B.N., Voloshko S.M., Zakiev V.I. et al. Enhanced Resistance of Ti6Al4V Alloy to High-Temperature Oxidation and Corrosion by Forming Alumina Composite Coating. *J. Mater. Eng. Perform*. 2021. **30**: 1780. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05492-y>
69. Burmak A.P. et al. Formation of Composite Layers by Ultrasonic Impact Treatment of Cu-39Zn-1Pb Brass Using Silicon Carbide Reinforcing Particles. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol*. 2022. **44** (1): 97. <https://doi.org/10.15407/mfint.44.01.0097>
70. Chenakin S.P. et al. Ultrasonic impact treatment of CoCrMo alloy: Surface composition and properties. *App. Surf. Sci*. 2017. **408**: 11. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.03.004>
71. Vasylyev M.A. et al. Ultrasonic impact treatment induced oxidation of Ti6Al4V alloy. *Acta Mater*. 2016. **103**: 761. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.10.041>
72. Chenakin S.P. et al. Surface characterization of a ZrTiNb alloy: Effect of ultrasonic impact treatment. *Appl. Surf. Sci*. 2018. **470**: 44. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.11.116>
73. Mordyuk B.N., Prokopenko G.I. Mechanical alloying of powder materials by ultrasonic milling. *Ultrasonics*. 2004. **42**: 43. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2004.01.001>
74. Mordyuk B.N. et al. Ultrafine-grained textured surface layer on Zr–1% Nb alloy produced by ultrasonic impact peening for enhanced corrosion resistance. *Surf. Coat. Technol*. 2012. **210**: 54. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.08.063>
75. Mordyuk B.N. et al. Structurally induced enhancement in corrosion resistance of Zr–2.5% Nb alloy in saline solution by applying ultrasonic impact peening. *Mater. Sci. Eng. A*. 2013. **559**: 453. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.08.125>
76. Mordyuk B.M. et al. Structural Dependence of Corrosion Properties of Zr–1.0% Nb Alloy in Saline Solution. *Metallofiz. Noveish. Tekhnol*. 2014. **36**(7): 917. <https://doi.org/10.15407/mfint.36.07.0917>

77. Firstov G.S. Functional metallic shape memory materials: state of the art and application prospects. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2019. (4): 19. <https://doi.org/10.15407/visn2018.06.019>
78. Khripta N.I. The problem of biomedical compatibility of metallic materials and ways of solving it. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2019. (4): 42. <https://doi.org/10.15407/visn2019.04.042>
79. Lesyk D.A. et al. Post-processing of the Inconel 718 alloy parts fabricated by selective laser melting: Effects of mechanical surface treatments on surface topography, porosity, hardness and residual stress. *Surf. Coat. Technol.* 2020. **381**: 125136. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125136>
80. Lesyk D.A., Dzhemelinskyi V.V., Martinez S. et al. Surface Shot Peening Post-processing of Inconel 718 Alloy Parts Printed by Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing. *J. Mater. Eng. Perform.* 2021. **30**: 6982. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06103-6>
81. Lesyk D.A., Martinez S., Pedash O.O. et al. Nickel Superalloy Turbine Blade Parts Printed by Laser Powder Bed Fusion: Thermo-Mechanical Post-processing for Enhanced Surface Integrity and Precipitation Strengthening. *J. Mater. Eng. Perform.* 2022. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-06710-x>
82. Mordyuk B.N., Dekhtyar A.I., Savvakina D.G. et al. Tailoring Porosity and Microstructure of Alpha-Titanium by Combining Powder Metallurgy and Ultrasonic Impact Treatment to Control Elastic and Fatigue Properties. *J. Mater. Eng. Perform.* 2022. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-06633-7>
83. Zaporozhets O.I. et al. Ultrasonic studies of texture inhomogeneities in pressure vessel steel subjected to ultrasonic impact treatment and shock compression. *Surf. Coat. Technol.* 2016. **307**: 693. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.09.053>
84. Zaporozhets O.I. et al. Influence of surface ultrasonic impact treatment on texture evolution and elastic properties in the volume of Zr1Nb alloy. *Surf. Coat. Technol.* 2020. **403**: 126397. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126397>
85. Zaporozhets O.I., Dordienko M.O., Mykhailovskyy V.A. Acoustic and Elastic Properties of Components of a Wall of the VVER-440 Vessel. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2016. **38**(6): 795. <https://doi.org/10.15407/mfint.38.06.0795>
86. Mykhailovskyy V.A., Dordienko M.O., Zaporozhets O.I. Choice of Model of Reconstruction of a Temperature Profile for the Ultrasonic Non-destructive Testing of the Closed Construction of Unilateral Access in Non-Stationary Thermal Conditions. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2015. **37**(8): 1027. <https://doi.org/10.15407/mfint.37.08.1027>

*Bohdan M. Mordyuk*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6025-3884>

G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

#### ULTRASONIC METHODS FOR SURFACE MODIFICATION AND DIAGNOSIS OF ADVANCED METAL MATERIALS

According to the materials of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, February 23, 2022

Analysis of the efficiency of high-frequency mechanical impact treatment by ultrasonic tools (UIT/HFMI), the formation mechanisms of nanoscale grain structures and composites, stress redistribution, elimination of defects and porosity in the surface layers of metallic materials manufactured by traditional and by latest additive technologies of 3D printing as well as methodology of ultrasonic precision measurements and non-destructive testing is presented. Prospects for the introduction of the methods in transport, engineering and medicine to ensure increased operation life, fatigue life, resistance to corrosion and wear are outlined.

**Keywords:** metal physics, surface engineering, high-frequency impact treatment, deformation-induced nanostructures and composites, stress redistribution, welded joints, biomaterials, additive 3D printing technologies, ultrasonic precision measurements, non-destructive testing.