УЛЬТРАЗВУКОВА УДАРНА ОБРОБКА ПОВЕРХНІ КОНСТРУКЦІЙ ТА СПОРУД

Інститут металофізики ім Г.В. Курдюмова
НАН України

ЦИКЛ РОБІТ НА ЗДОБУТТЯ ДЕРЖАВНОЇ ПРЕМІЇ УКРАЇНИ В ГАЛУЗІ НАУКИ ТА ТЕХНІКИ В 2019 р.
Висунутий Вченою радою
Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова
НАН України

А В Т О Р И

МОРДЮК Богдан Миколайович – доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, зав. відділу «Фізичних основ інженерії поверхні» Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України	ПРОКОПЕНКО Георгій Іванович – доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник відділу «Фізичних основ інженерії поверхні» Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України.
СОЛОВЕЙ Сергій Олександрович – кандидат технічних наук, с. н. с., провідний науковий співробітник відділу «Міцності зварних конструкцій» Інституту електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України.	КЛОЧКОВ Ілля Миколайович – кандидат технічних наук, Учений секретар Інституту електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України.
ВОЛОШКО Світлана Михайлівна – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри «Фізики металів» Інженерно - фізичного факультету НТУУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського	ЛИННИК Георгій Олегович – кандидат технічних наук, заступник начальника департаменту «Колій і споруд» АТ «Укрзалізниця».
КРАСОВСЬКИЙ Тарас Анатолійович – зав. лабораторією нових методів аналізу матеріалів Київського академічного університету МОН і НАН України	ВОЛОЧАЙ Валерій Володимирович – начальник лабораторії зварювання технологічного управління ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод».

Мета роботи: Збільшення несучої здатності та ресурсу промислових виробів, зварних конструкцій та споруд за рахунок формування ультразвуковою ударною обробкою (УЗУО) поверхневого шару з підвищеними фізико-механічними властивостями

Підвищення безпеки експлуатації рухомого складу залізничного транспорту і відповідальних споруд (мостів, шляхопроводів та інших)

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 втоми, з повним видаленням пошкодженого металу з тріщиною та подальшим зміцненням УЗУО для гарантованого продовження їх терміну служби;
- розробити технологічні рекомендації щодо застосування УЗУО металевих конструкцій та споруд.

НАУКОВА НОВИЗНА РОБОТИ:

Проведено систематичне дослідження структурних і фазових перетворень в металах і сплавах на основі заліза, алюмінію, титану та цирконію в процесі УЗУО та їх вплив на фізико-механічні властивості конструкційних і функціональних матеріалів.

Формування нанорозмірних зеренних структур у поверхневих шарах металевих матеріалів – один з чинників підвищення властивостей

Схема (a) і ТЕМ зображення (b-e) дислокаційних структур в армко-Fe, які еволюціонують у процесі зростання ступеню деформації при УЗУО, а також темнопольне зображення та картина електронної дифракції (ЕД) (f) сталі Ст3 при деформації e= 0.7 (час УЗУО t = 60 с).

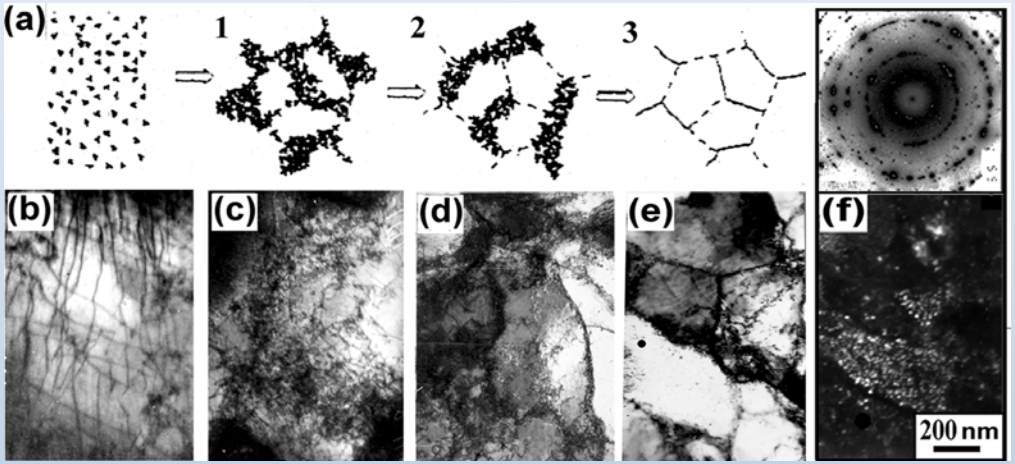
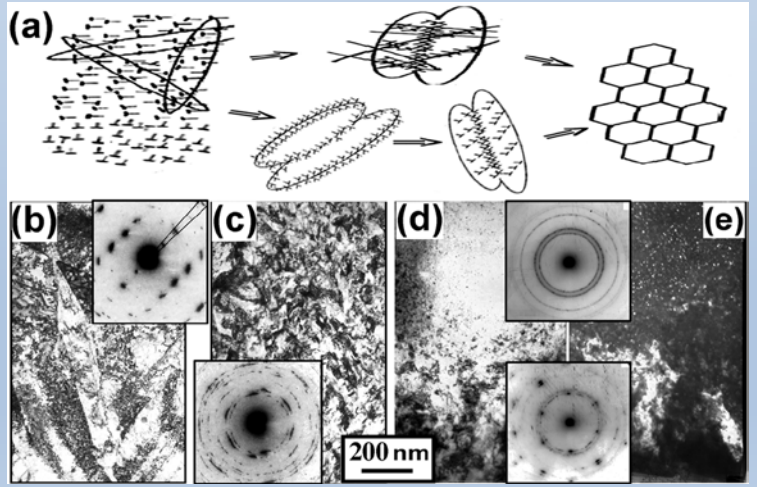
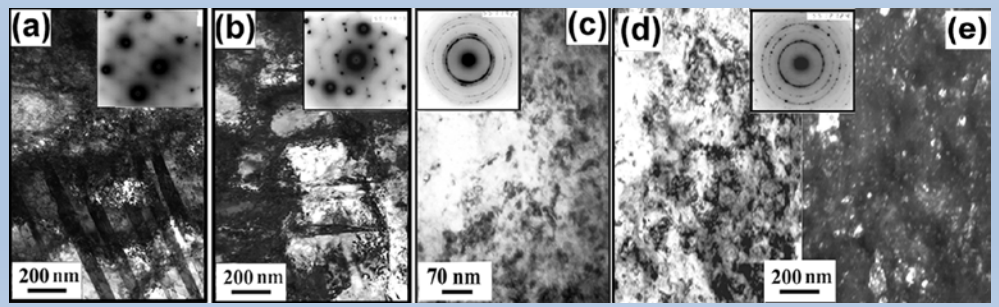


Схема структурної еволюції при УЗУО (a), ТЕМ зображення зеренних структур сплаву ВТ1-0 і ЕД (b-e) в ГЩУ титані на різній відстані від поверхні обробки: 100 (b), 60 (c) і 25 мкм (e,d), що відповідають деформаціям ē ~ 0,25, ~ 0,6 и ~ 1,0 (час УЗУО t = 30, 60, 90 с).

ВТ1-0



ТЕМ зображення і ЕД сталі 12Х18Н10Т після УЗУО до *ē* = 0,3 (a), 0.45 (b,c) и 0,8 (d,e) (час УЗУО t = 30, 60, 90 с).

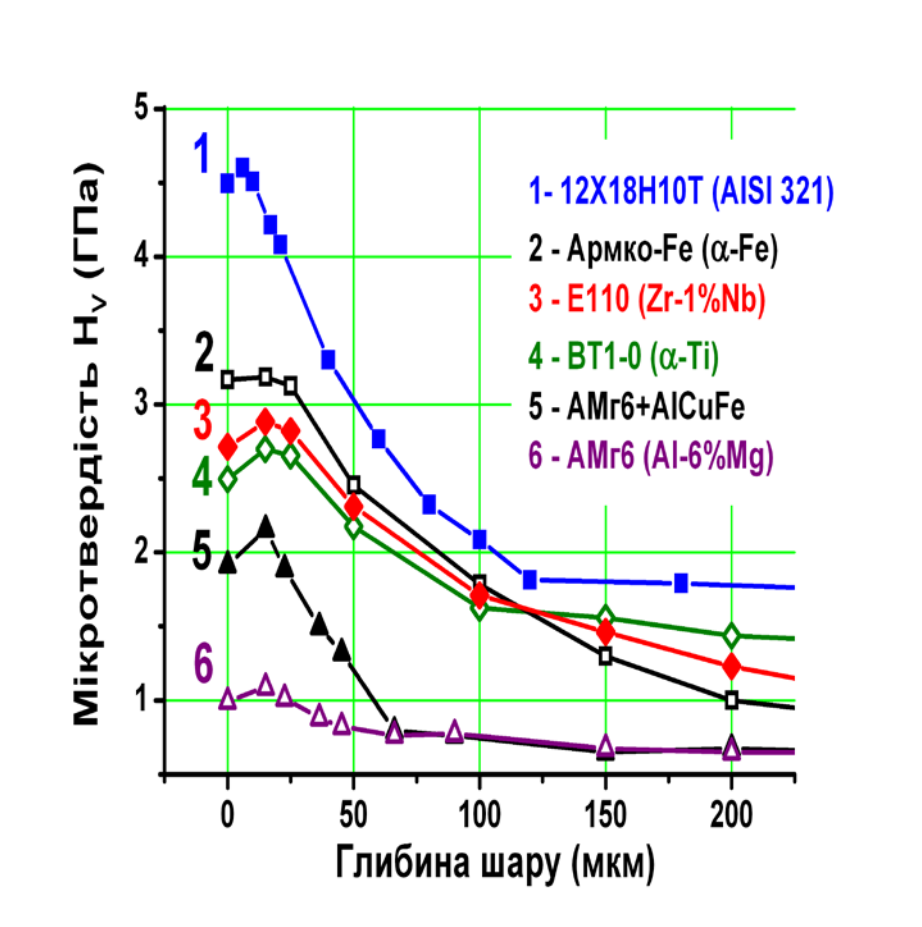


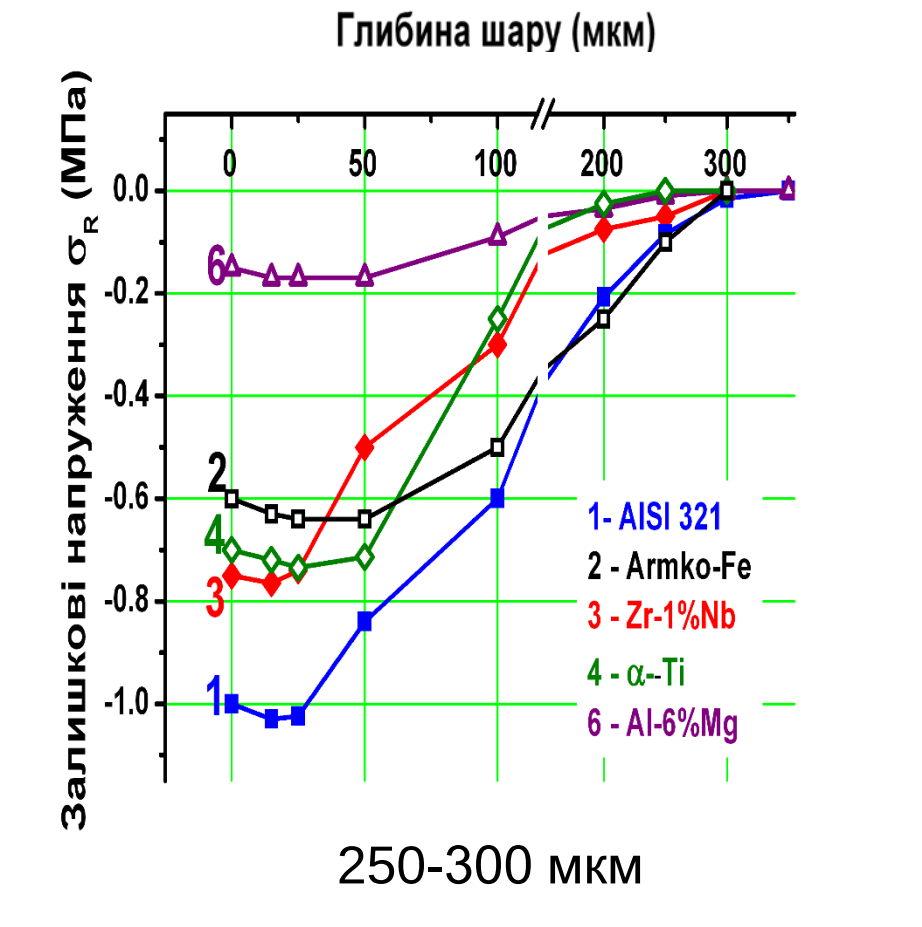
WILEY

Handbook of Mechanical Nanostructuring

Chapter: **Ultrasonic Impact Treatment – an effective method for nanostructuring the surface layers of metallic materials (B.N.Mordyuk, G.I.Prokopenko)**

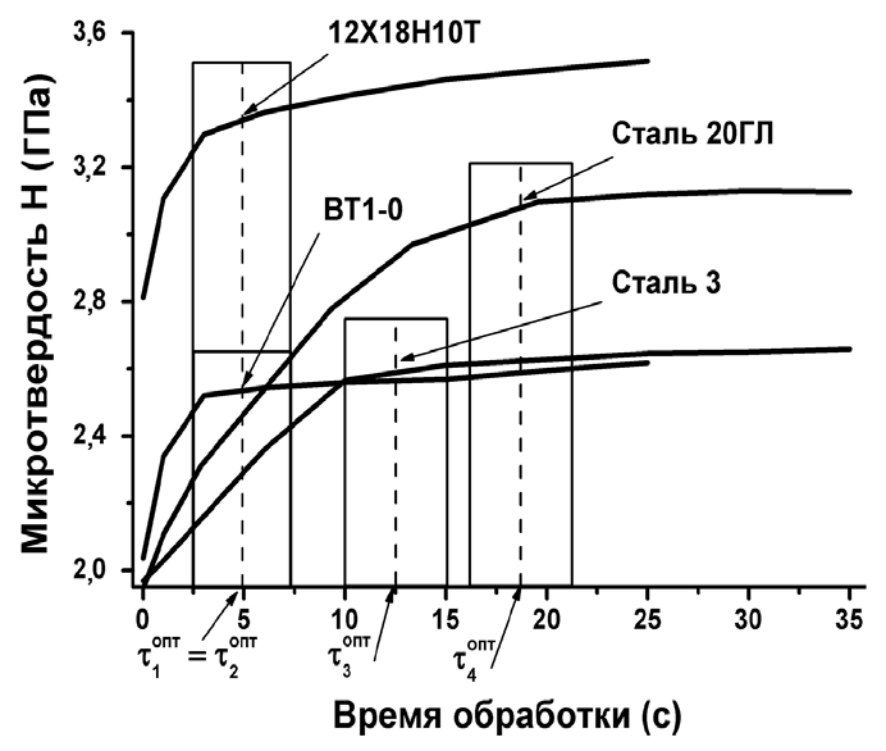
Закономірності зміни залишкових напружень і мікротвердості в поверхневих шарах металів і сплавів після УЗУО



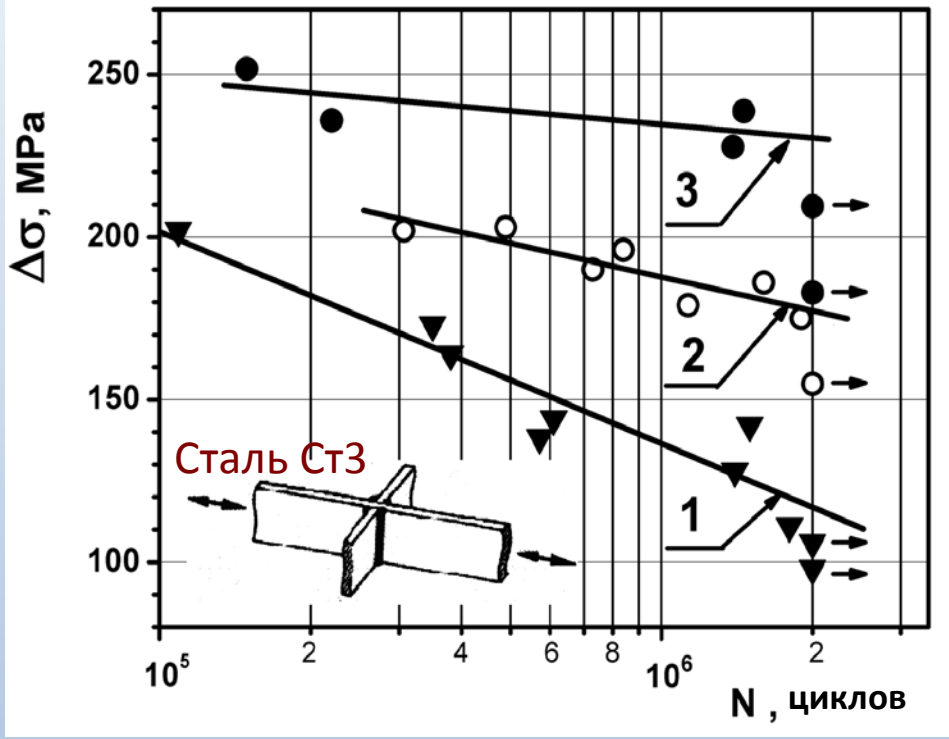


(Параметри УЗУО: амплітуда ультразвукових коливань *A = 18 мкм, час обробки t = 90с*)

Підвищення мікротвердості основного металу та втомної довговічності зварних з'єднань після УЗУО



Швидке насичення значень мікротвердості з часом УЗУО



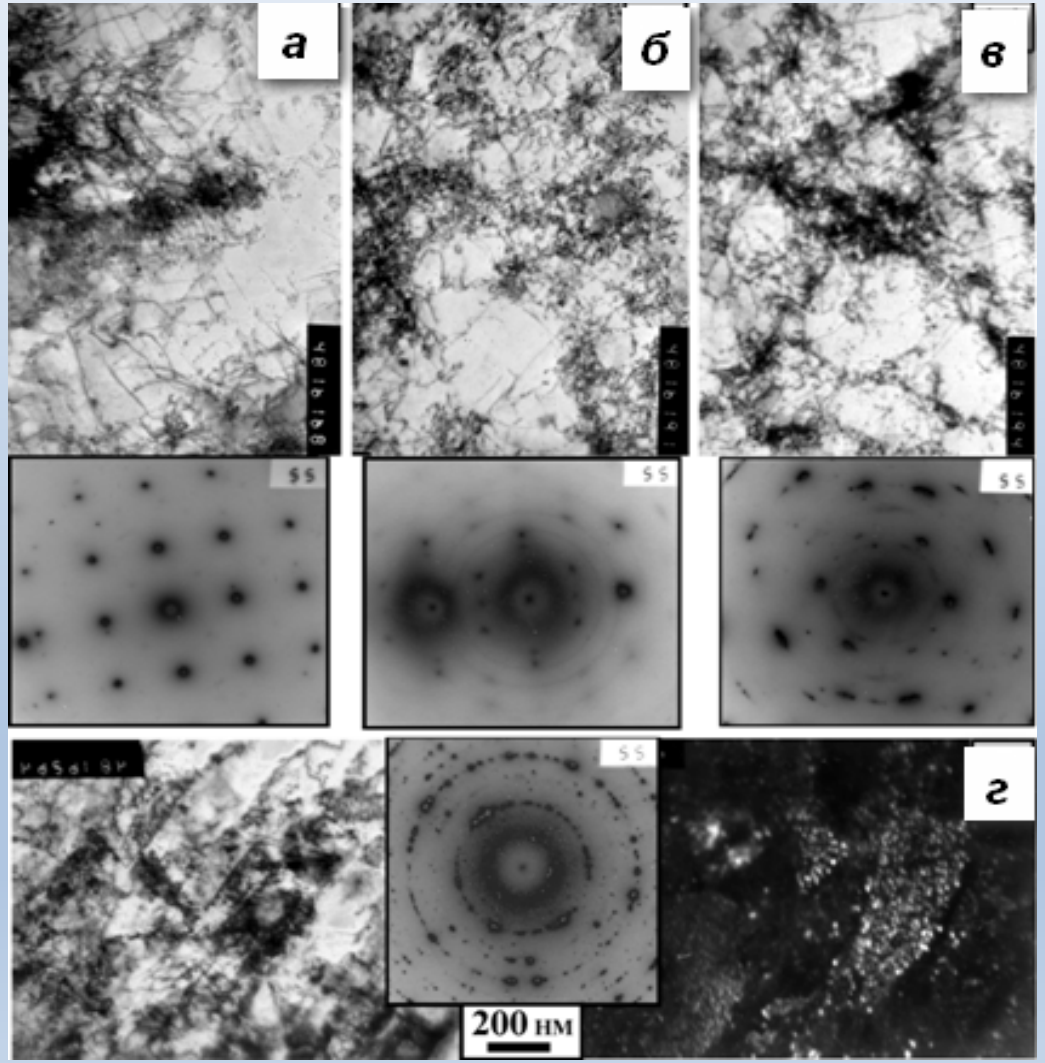
Втомні випробування зварних зразків: 1 – вихідний, після зварювання; 2 – після УЗУО; 3 – додаткова обробка ділянок швів з виявленими дефектами зварювання

Ультразвукова ударна обробка відрізняється від традиційних методів ударної обробки (пневмодинамічної, дробоструменевої та інших) високою продуктивністю і рекордним підвищенням втомної міцності зварних з’єднань різноманітних конструкцій, при поліпшенні умов праці операторів (зниження шуму і шкідливих вібрацій)

Зміна дислокаційної і зереної структури сталі Ст3 при збільшенні тривалості УЗУО

Встановлені закономірності формування ультрадисперсних та нано розмірних структур у поверхневих шарах металевих матеріалів за умов ультразвукової ударної обробки поверхні.

ТЕМ зображення структури та картини електронної дифракції поверхневих шарів сталі

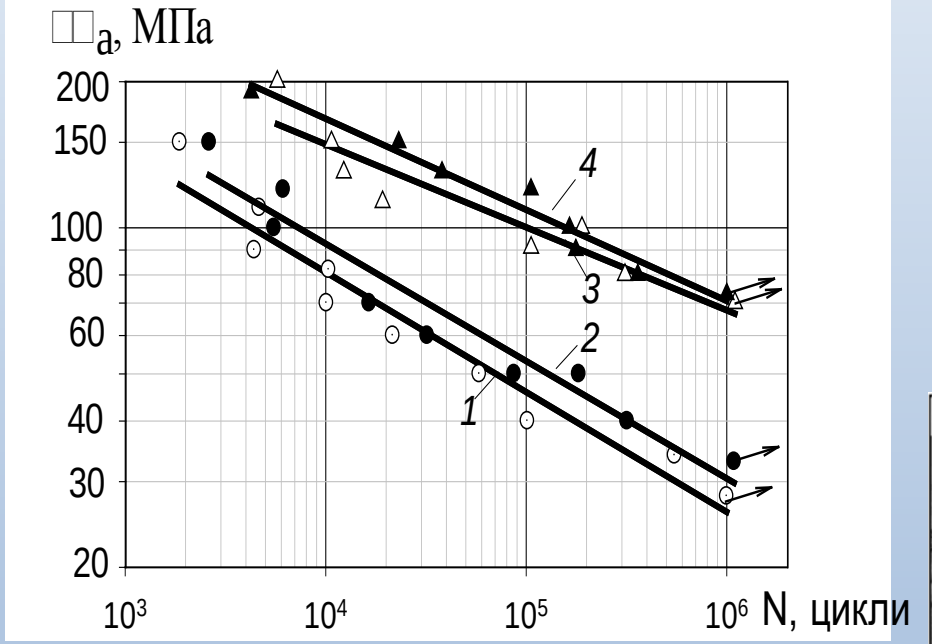


Послідовне зростання ступеню деформації з збільшенням тривалості УЗУО:

ε~3-5% (*а*); ε~10% (*б*); ε~20-25% (*в*); ε~70% (*г*).

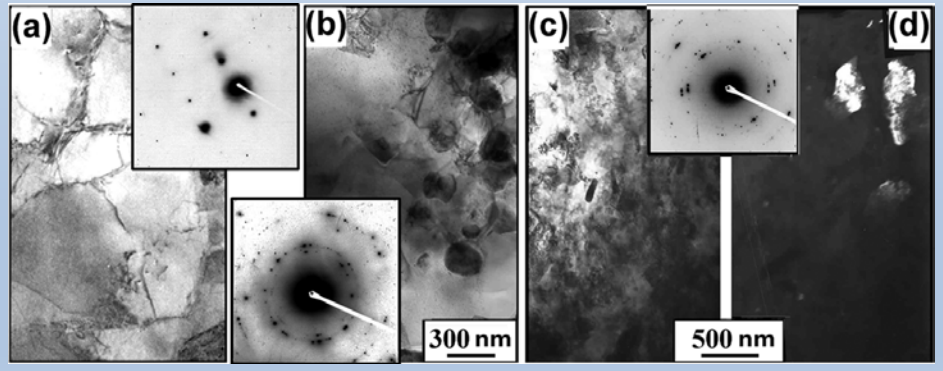
Підвищення опору втомі зварних з'єднань алюмінієвого сплаву АМг6 зміцненням УЗУО

Фотографія зразка напускового з'єднання для випробувань на втому

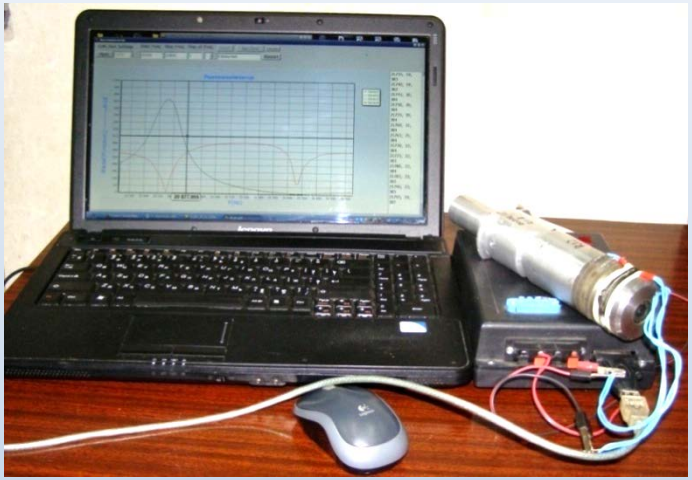


Криві втоми напускових з'єднань сплаву **АМг6** товщиною 2 мм: 1 і 2 - початковий стан з напуском 2δ і 5δ відповідно; 3 і 4 - після УЗУО з напуском 2δ і 5δ відповідно.

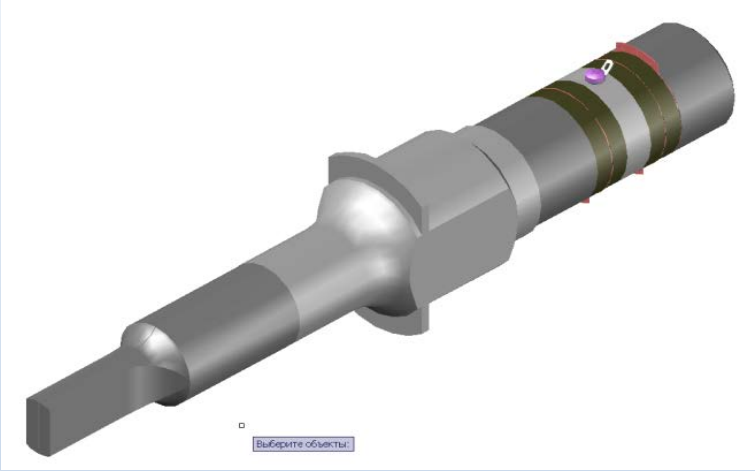
ТЕМ зображення та картини електронної дифракції алюмінію (a), сплаву **АМг6** (b), та зміцненого УЗУО сплаву **АМг6** (c,d).



Розробка і виготовлення ультразвукового обладнання для УЗУО



Цифровий аналізатор резонансних режимів перетворювача



Ультразвукова коливальна система

Прилад УЗГ-300 (1994 р.)

Прилад ULTRAPEEN-4 (2001 р.)

Різні модифікації розроблених ультразвукових установок

USTREAT-1.0 (2006 р.)

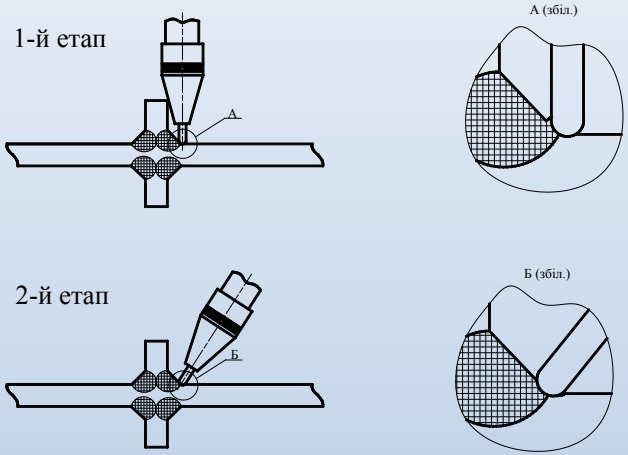
USTREAT-2.0 (2010 р.)

USTREAT-3.0 (2013 р.)

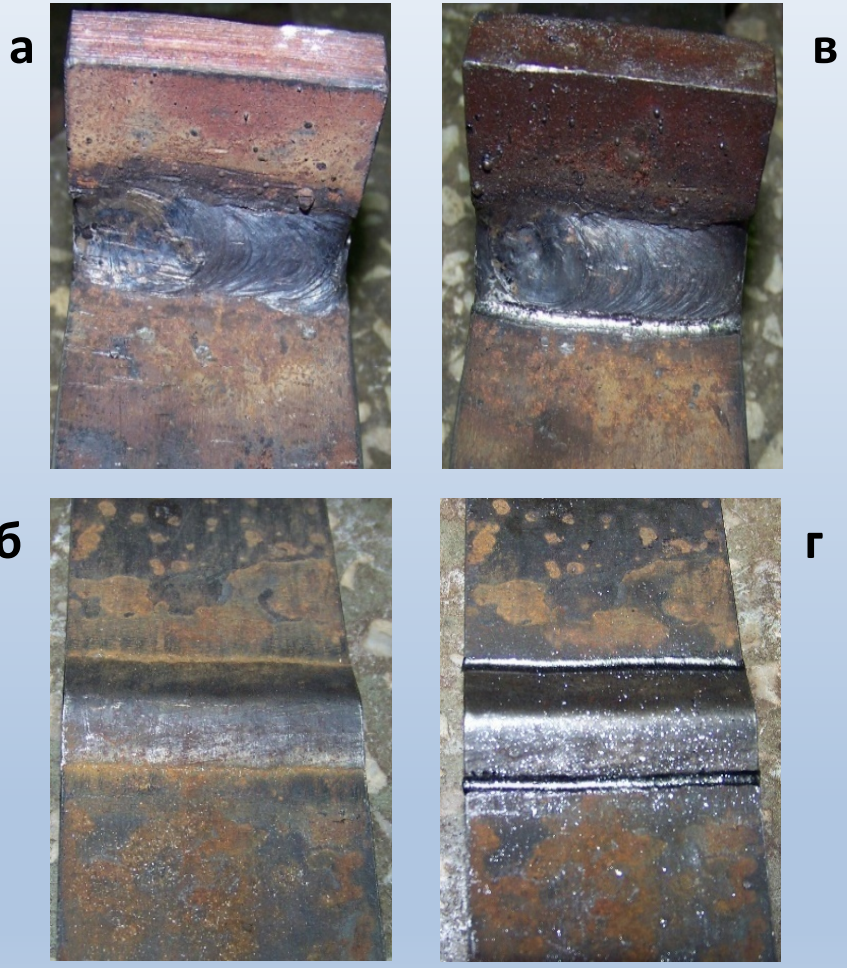
USTREAT-4.0 (2017 р.)

Зміцнення зварних з'єднань УЗУО по зоні переходу метала шва на основний метал

Послідовність обробки

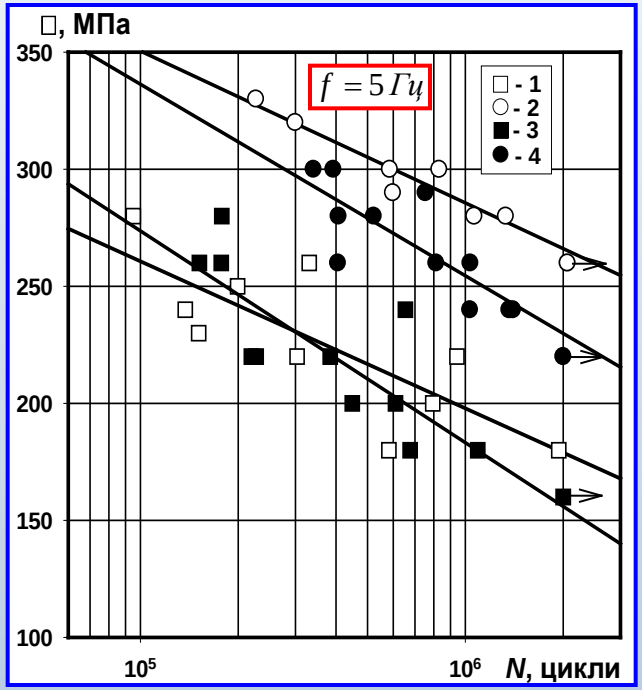


Процес обробки УЗУО зразків таврового зварного з'єднання ручним ударним інструментом

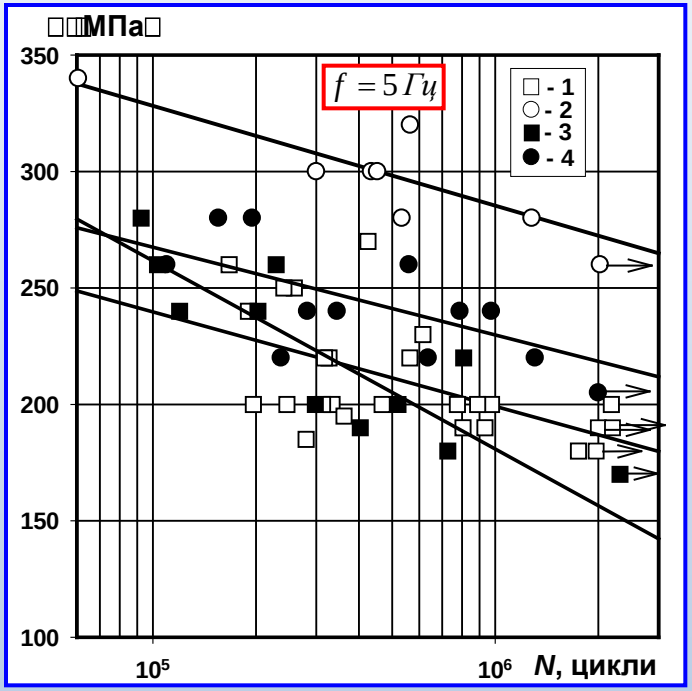


Зразки таврових і стикових зварних з’єднань у вихідному стані (**а, б**) і після обробки (**в, г**)

Вплив УЗУО на опір втомі зварних з’єднань сталі 15ХСНД в умовах, моделюючих промислову атмосферу помірного клімату



а)



б)

Криві втоми таврових (а) та стикових (б) зварних з'єднань сталі 15ХСНД:
1 і 2 – у вихідному і зміцненому УЗУО станах на повітрі, відповідно;
3 і 4 – у вихідному і зміцненому УЗУО станах після витримки в камері вологості на протязі 1200 годин, відповідно.

а)

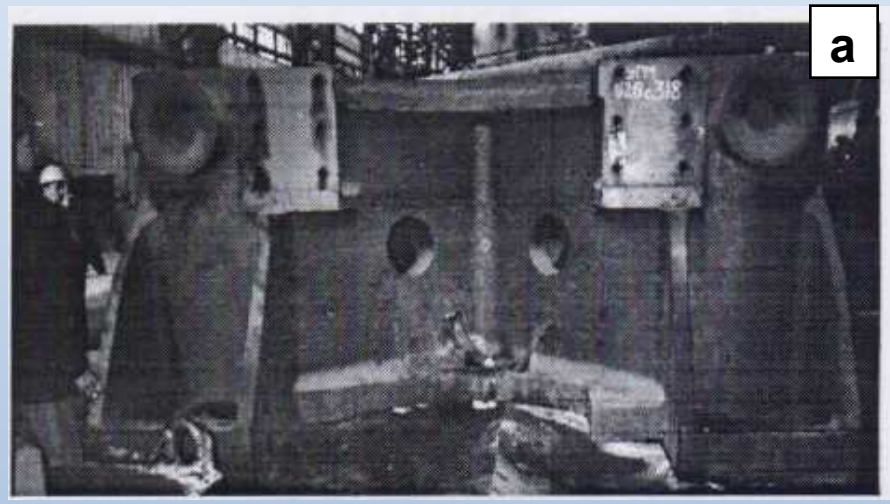
б)

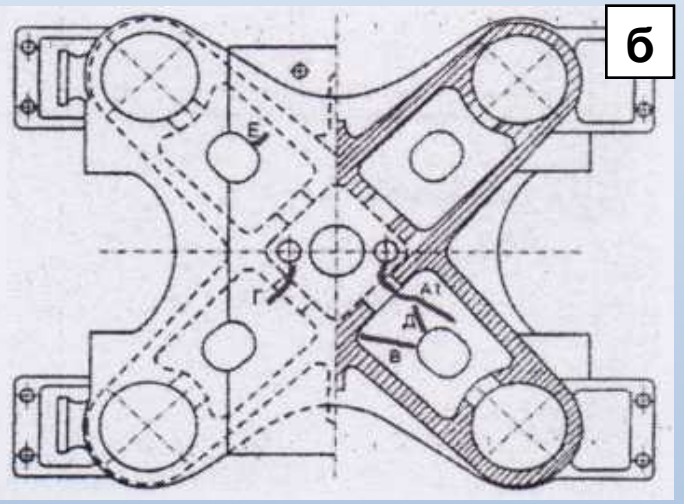
Зміцнені УЗУО зразки таврових (а) та стикових (б) зварних з'єднань сталі 15ХСНД після витримки в камері вологості на протязі 1200 годин і випробувань на втому

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ УЗУО

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

ПРЕС 10000 тс

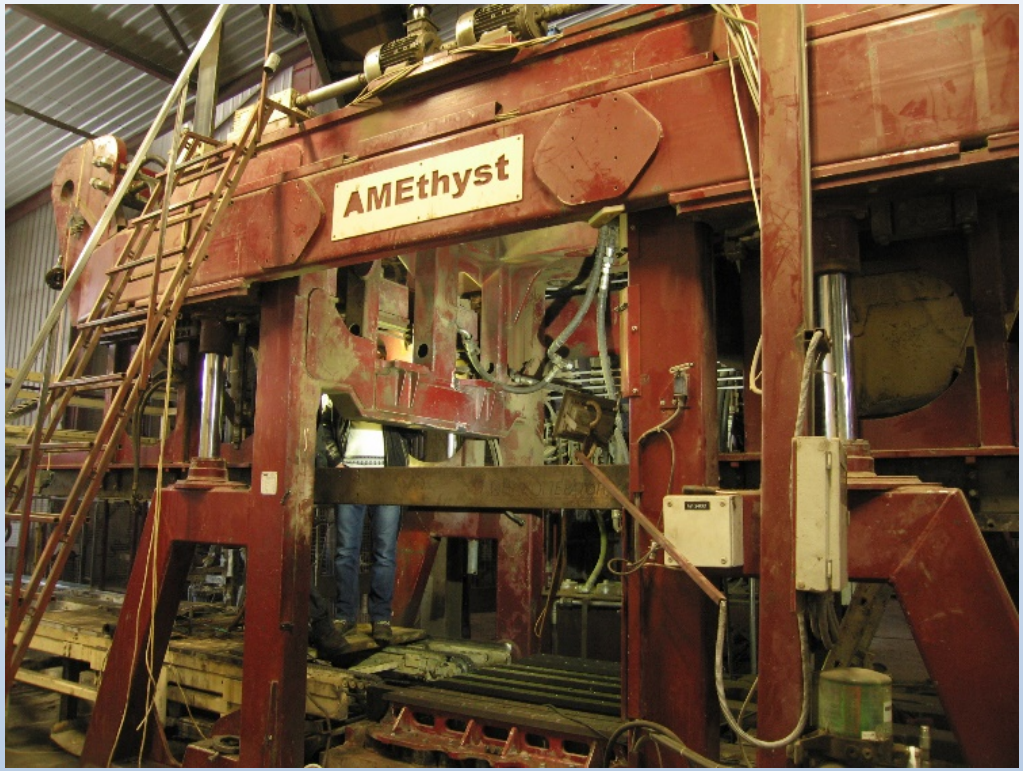




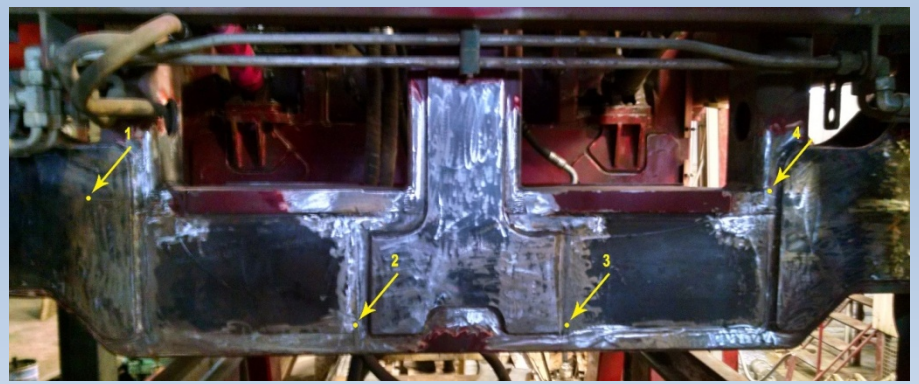
Станина пресу зусиллям 10000 тс (а) і місце розташування тріщин (б) довжиною до 4 м, які утворилися під час тривалої її експлуатації (сталь 35Л, маса 108 т). Етапи ремонтних робіт: усунення та заварювання тріщин + УЗУО ремонтних швів. Місце впровадження: Нижньодніпровський трубний завод (м. Дніпро, 2001 р.). Станина пресу відслужила гарантійний строк після ремонту 5 років, а загалом пропрацювала понад 10 років.

ВІБРОПРЕС

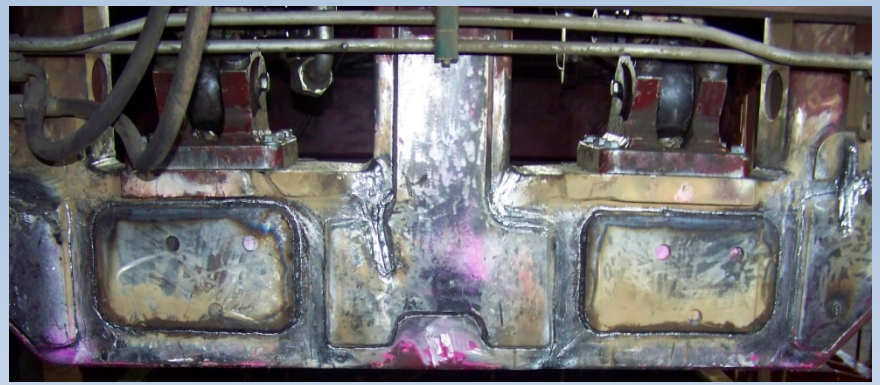
Вібропресове обладнання AMEthys 1500 HS («AMEGmbH», Австрія), що використовується на ТОВ «Золотий Мандарин Квадро».



Тріщини втоми в елементі несучої рами вібропресового обладнання AMEthys 1500 HS: загальний вид елемента рами з тріщинами втоми №1-4

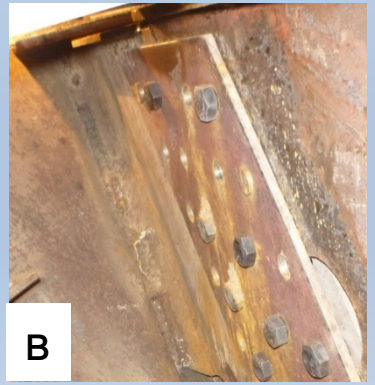


Вигляд відновленого елемента після УЗУО



РЕМОНТ ЕСТАКАДИ ЧЕРЕЗ ШЛЮЗИ ДНІПРОВСЬКОЇ ГЕС

Вигляд пошкодженої (а,б) та відновленої (в,г) тяги у вихідному стані після зварювання (в) та після зміцнення технологією УЗУО (г).



Крихкий обрив і тріщина в стінці низової тяги

РАМА ВІЗКА ВАНТАЖНОГО ВАГОНУ

Вигляд рами в процесі виготовлення (а) та у вихідному стані (б)

а

б

Зміцнення стикових зварних з’єднань балки коробчастого перерізу (а) та кутових швів, якими приварювалися конструктивні елементи до нижнього розтягнутого поясу балки коробчастого перерізу (б).

а

б

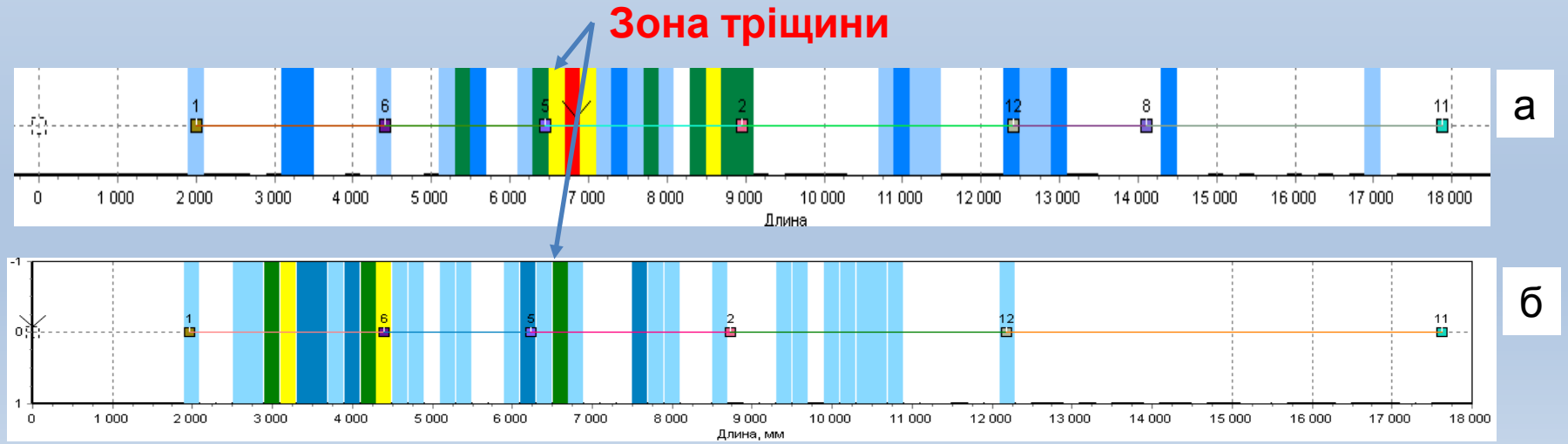
Ремонтно-відновлювані роботи залізничних мостів

РЕМОНТ ЗАЛІЗНИЧНОГО МОСТУ Ч/Р ВОРСКЛА ЛІНІЇ КИЇВ-ХАРКІВ

Тріщина втоми типу T_4 у верхньому поясі поздовжньої балки в місці стику вертикального ребра жорсткості (а) та місця закріплення модернізованих зварюванням вертикальних ребер жорсткості до нижніх поясів головних балок після зміцнення технологією УЗУО (б)

Розташування датчиків акустичної емісії при пошуку пошкоджень

Локаційні картини при статичних випробуваннях до (а) і після ремонтних робіт (б).



Виявлення, усунення та заварювання тріщин втоми в залізничних мостах з послідуючим зміцненням ремонтних швів УЗУО

Виявлена тріщина

Видалення тріщини.
Підготовка до заварювання

Тріщина після заварювання

Зміцнення ремонтних швів УЗУО

РЕМОНТ ЗАЛІЗНИЧНОГО МОСТУ В КИЄВІ

Використання УЗУО для обробки завареної тріщини несучої балки мосту

Переваги технології УЗУО у порівнянні з традиційним відпалом

Обладнання і технологія УЗУО, розроблені при виконанні проектів НАНУ «Ресурс» и «Інновація» впроваджені на Крюковському вагонобудівному заводі (2012-2013 гг)

USTREAT - 3.0
(0,6 кВт)
Розробка 2012 р.
Спільно з Фізико-технічним науковим та учбовим центром НАНУ

Випробовування натурних елементів візків вагонів (макетів) показали збільшення втомної довговічності в 2,5 рази

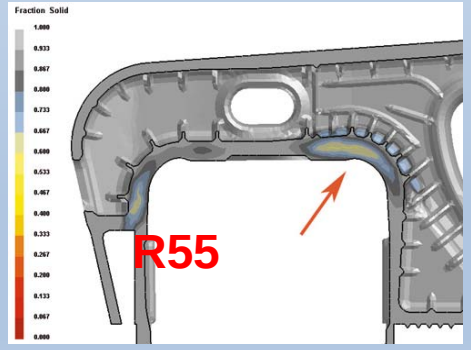
Без УЗУО
Злам макету візка в зоні зварювання

Після УЗУО
Злам макету віддалі від шва

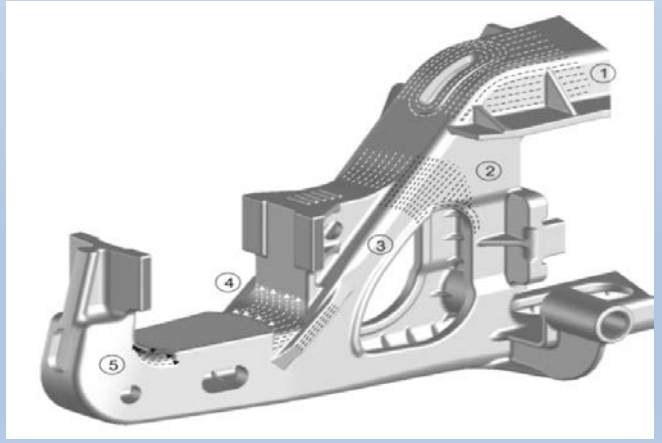
Зміна довговічності макетів візків залізничних вагонів при знакозмінних навантаженнях(до руйнування)	
Матеріал і попередня обробка макетів	Зміна довговічності, %
Ст 20 без відпалу	**100**
Ст 20 відпал	**143**
Ст 20 без відпалу, УЗУО (ВМП) швів	**255**

Зміцнення бокової рами вантажного вагону технологією УЗУО на Кременчуцькому сталеливарному заводі

Злам бокової рами вантажного вагону



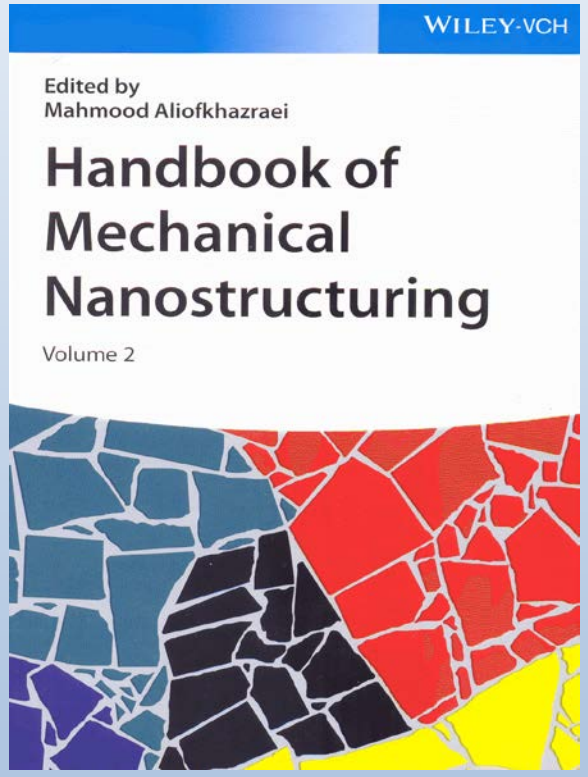
Галтель R55 після обробки



Циклічна довговічність бокових рам зросла в середньому від $2{,}176 \cdot 10^6$ до $3{,}565 \cdot 10^6$

МІЖНАРОДНЕ СПІВРОБІТНИЦТВО

З 1994 року різні аспекти технології УЗУО (Ultrasonic Impact Treatment) були представлені на сесіях Міжнародного Інституту Зварювання науковцями України і Канади, а технологія рекомендована в 2008 році 13-й комісією МІС для використання в зварювальному виробництві.



Участь в міжнародних виставках. Осака, Японія

Зарубіжні патенти:

Патент США № 6 467 321

Патент Канади № CA 2 348 834

Участь в симпозиумах UIA США

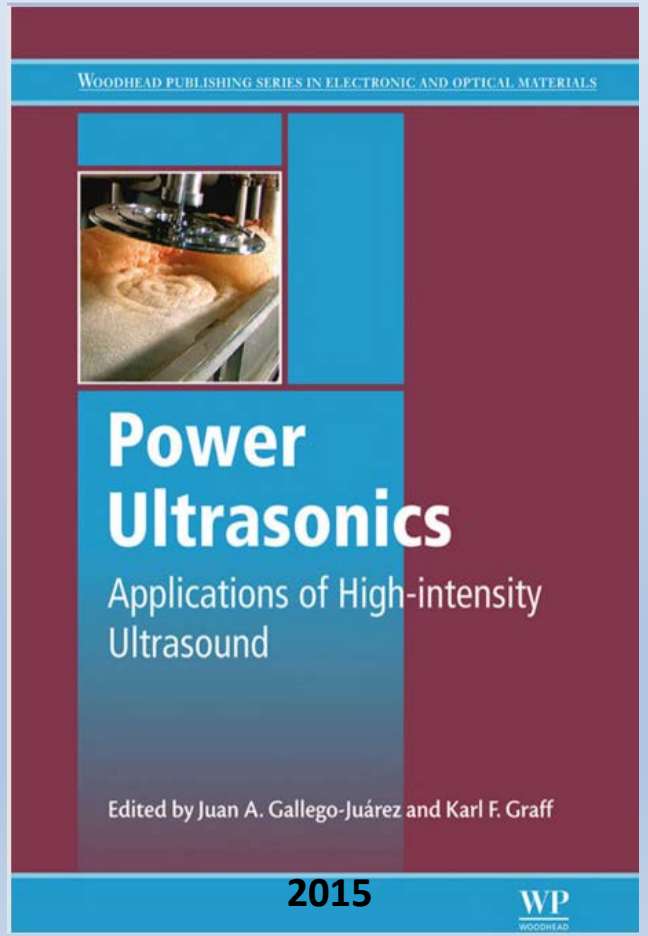
ultrasonic industry association

UIA

32nd Annual Symposium, October 21-23, 2002

Helmsley Hotel, New York, NY

CHANGING THE WORLD OF MEDICINE AND INDUSTRY THROUGH ULTRASONICS



ВИКОНАНІ МІЖНАРОДНІ ПРОЕКТИ

- 1996 – 1997 – Программа INCO COPERNICUS *“The Development of New Ultrasonic assisted Processes in Metallurgy and Machinery”* .
- 1998 – Партнерский проект STCU - P015 *“The Development of super elastic Materials for Ultrasonic Horns”.*
- 1999 – Партнерский проект STCU - P024 “*The Development of improved Technology and Equipment for UIT of Welded Joints and Constructions*”.
- 2000 – 2001 - Проект STCU - NN32 “*The Development of New Method for Materials Processing using Ultrasonic Field in Microgravity*”.
- 2002 – Проект STCU – 2354 “*Development of Ultrasonic Technologies for Manufacturing of the New Composite Materials with Adjustable Coefficient of Thermal Expansion*”.
- 2005 – Партнерский проект STCU - P210 “*Development of equipment for ultrasonic impact treatment of metals and studies of the equipment efficiency*”.

В И С Н О В К И

- Проведено дослідження фізичних процесів, які відбуваються при інтенсивній пластичній деформації поверхні металевих матеріалів при УЗУО. Вони поєднують складні структурно-фазові перетворення, які призводять до нано структуризації поверхневих шарів, механо-хімічні реакції, аномальне масоперенесення, динамічну рекристалізацію тощо.
- Виконано комплекс експериментальних і теоретичних досліджень, який дозволяє прогнозувати збільшення ресурсу зварних металоконструкцій при застосуванні УЗУО 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 з наступним зміцненням ремонтних швів УЗУО, що дозволяє повністю відновити цілісність і несучу здатність та гарантовано продовжити призначений при проектуванні термін служби виробів і споруд, які 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 суцільно стінчатих зварних прогонових будов» від 03.04.2007 р. і ЦП-0214 «Експлуатація залізничних мостів. Технологічній регламент із ремонту зварюванням пошкоджених тріщинами втоми елементів прогонових будов залізничних мостів» від 01.12.2009 р.