ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ ПРОМИСЛОВОЇ ПРОДУКЦІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

РОБОТА НА ЗДОБУТТЯ ДЕРЖАВНОЇ ПРЕМІЇ УКРАЇНИ В ГАЛУЗІ НАУКИ ТА ТЕХНІКИ 2020 р.

Висунута Вченою радою Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України

- **Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України**
- **Національний технічний університет України «КПІ» ім. Ігоря Сікорського**
- **Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України**

АТ «Укрзалізниця»

- **Київський академічний університет МОН і НАН України**

А В Т О Р И

МОРДЮК Богдан Миколайович – доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, завідувач 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.
ЛУГОВСЬКИЙ Олександр Федорович доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки» Механіко-машинобудівного інституту НТУУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського	ВОЛОШКО Світлана Михайлівна – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри «Фізики металів» Інженерно - фізичного факультету НТУУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського
КЛОЧКОВ Ілля Миколайович – кандидат технічних наук, Учений секретар Інституту електрозварювання ім. Є.О.Патона 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
ЛИННИК Георгій Олегович – кандидат технічних наук, заступник начальника департаменту «Колії і споруд» АТ «Укрзалізниця»	КРАСОВСЬКИЙ Тарас Анатолійович – зав. лабораторією нових методів аналізу матеріалів Київського академічного університету МОН і НАН України

ПРИЙНЯТІ СКОРОЧЕННЯ

● ***УЗУО – ультразвукова ударна обробка.*** Інтенсивна пластична деформація поверхні металевих матеріалів високоміцними інденторами, які вимушено коливаються в проміжку 0,1…0,3 мм між торцем ультразвукового концентратора і поверхнею виробу.

Зарубіжні аналоги:

UIT – Ultrasonic Impact Treatment, HFMI – High Frequency Mechanical Impact.

● ***БУФО – безабразивна ультразвукова фінішна обробка***. Вигладжування поверхні деталей переважно круглого перерізу з високоміцних матеріалів або загартованих сталей.

● ***УЗО – ультразвукова обробка.*** Зміцнення поверхні деталей складної форми (лопаток турбін та ін.) в замкненій камері під дією стохастичного переміщення кульок розміром 1…3 мм за рахунок ударної взаємодії з поверхнею камери, яка коливається з ультразвуковою частотою.

● ***ТЕМ – трансмісійна електронна мікроскопія.***

● ***УЗГ – ультразвуковий генератор.***

● ***ПЕП – п’єзоелектричний перетворювач.***

● ***УЗКС – ультразвукова коливальна система.***

● ***МІЗ – Міжнародний інститут зварювання.***

НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОБЛАСТІ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

НОВИЗНА РОБОТИ

- Запропоновано новий спосіб УЗУО металевих матеріалів. Інтенсивні вимушені коливання ударників з високою частотою (~1…3 кГц) в невеликому проміжку (0,1…0,3 мм) призводять до суттєвої пластичної деформації поверхневого шару металу за короткий час.

- Проведено систематичні дослідження природи процесів, що відбуваються за умов УЗУО. Вперше побудовані фізичні моделі, які пов'язують збільшення густини дислокацій і точкових дефектів із зміцненням, зниженням деформуючих зусиль, аномальним масоперенесенням атомів, а також із релаксацією та перерозподілом залишкових напружень.

- Нові знання отримані при вивченні кавітаційних процесів у рідині. Були проведені теоретичні та експериментальні дослідження взаємодії ультразвукового поля з кавітаційними рідинними камерами різної форми та об’єму.

- Здійснена розробка і виготовлення ультразвукової апаратури з потужними випромінювачами на п’єзокераміці і цифровим регулюванням електричних параметрів УЗГ.
Розробки захищені багатьма патентами в Україні та за кордоном і призначені для використання у технологіях УЗУО, БУФО, УЗО, зварювання пластмас, подрібнення порошкових матеріалів, а також в різноманітних ультразвукових кавітаційних технологіях.

ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ УЛЬТРА-ДИСПЕРСНИХ ТА НАНО-РОЗМІРНИХ СТРУКТУР У ПОВЕРХНЕВИХ ШАРАХ МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА УМОВ УЗУО

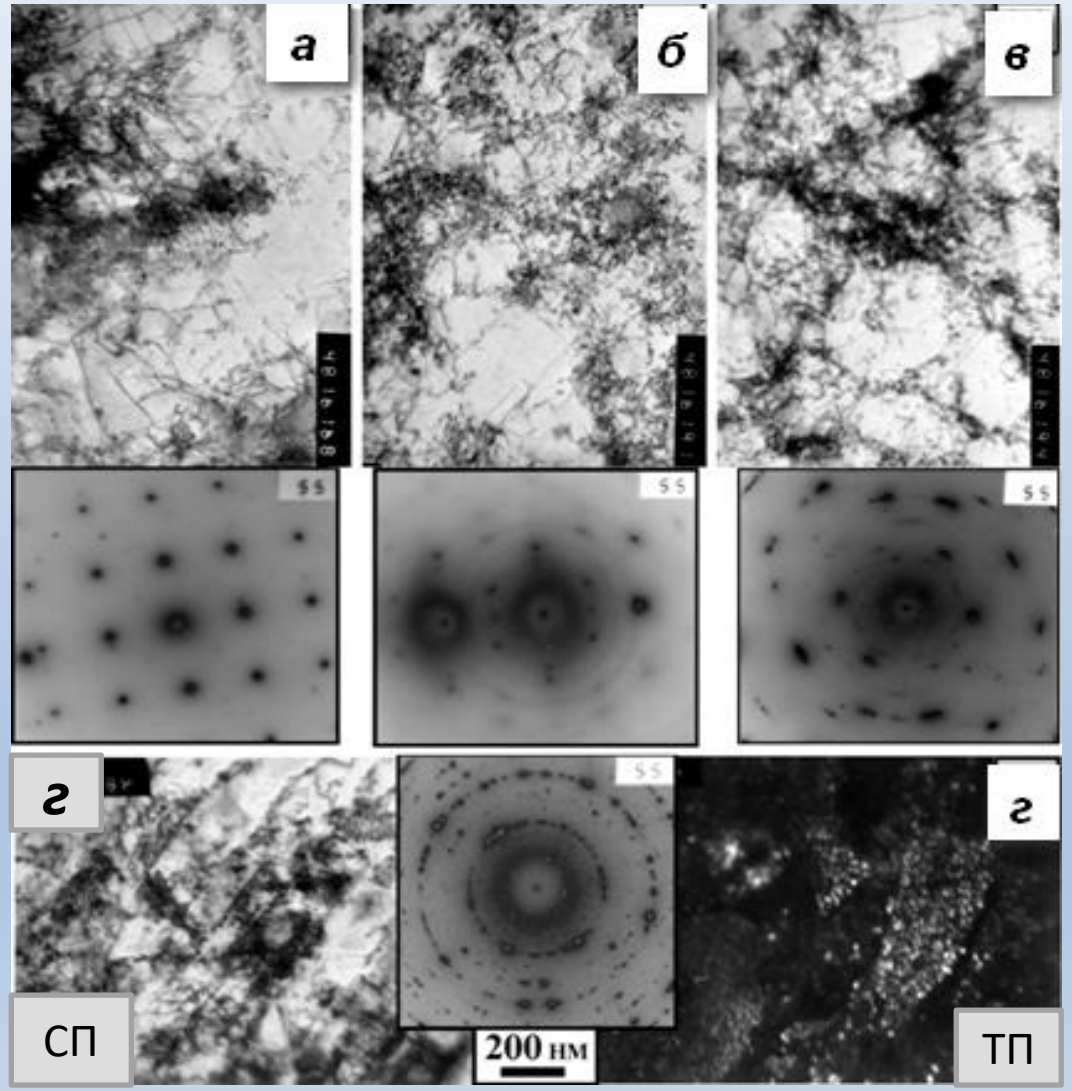
Зміна дислокаційної структури сталі Ст3 при збільшенні тривалості обробки

ТЕМ зображення структури та картини електронної дифракції поверхневих шарів сталі

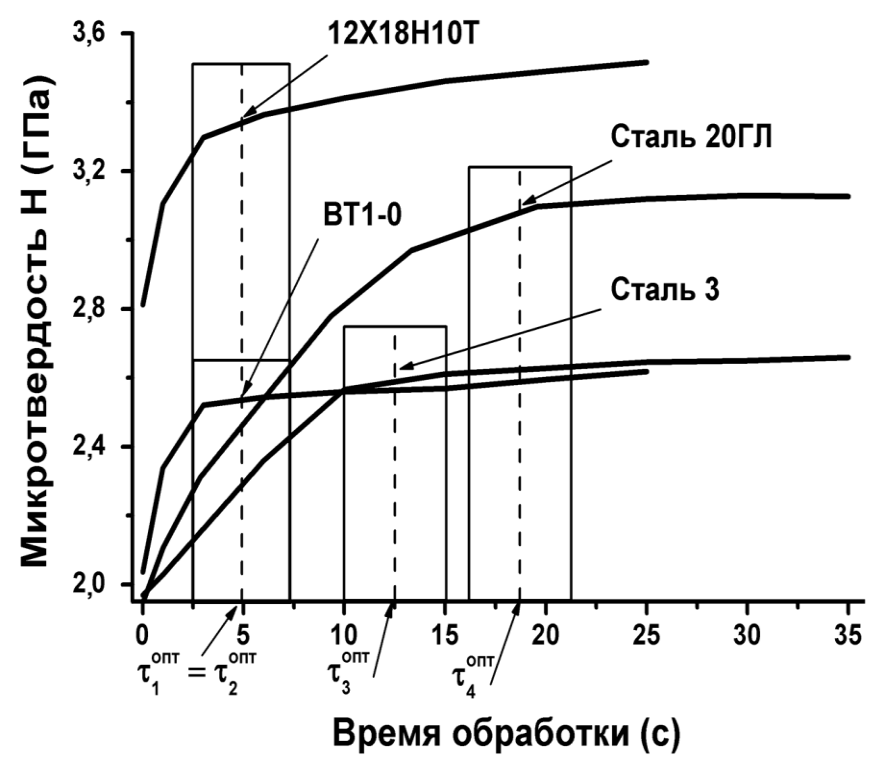
Послідовне зростання ступеню деформації із збільшенням тривалості УЗУО і ступеню деформації:

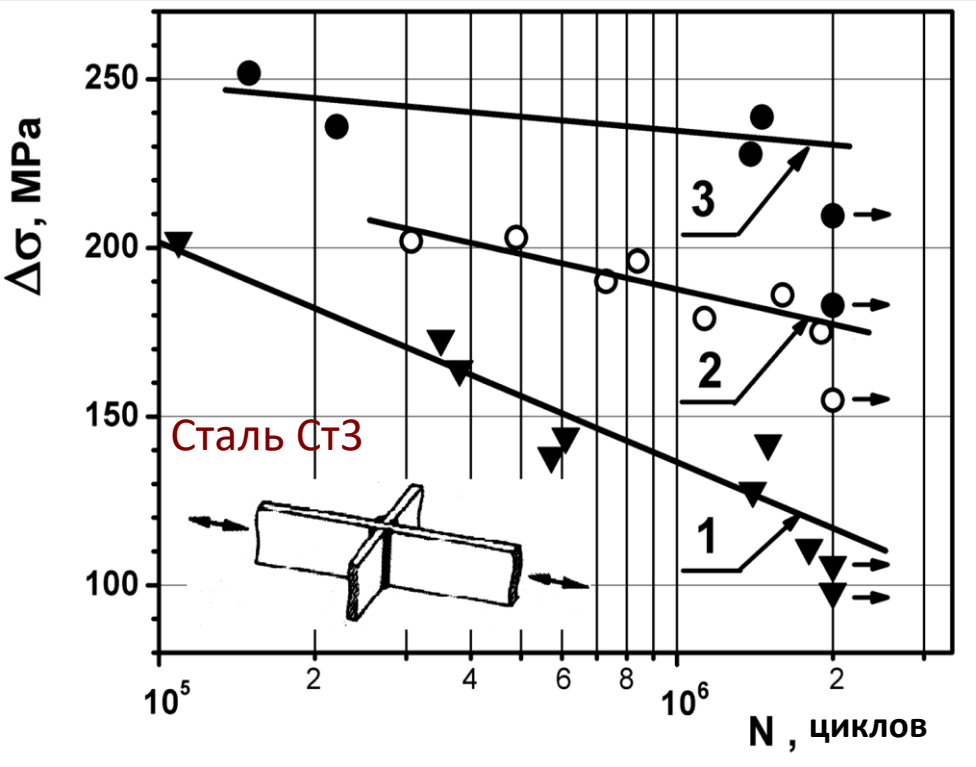
(*а*) ε~3-5%; (*б*) ε~10%;
(*в*) ε~20-25%; (*г*) ε~70%.

СП і ТП – світло- і темно-польні зображення



Зміцнення поверхні металів та підвищення втомної довговічності зварних з'єднань після УЗУО





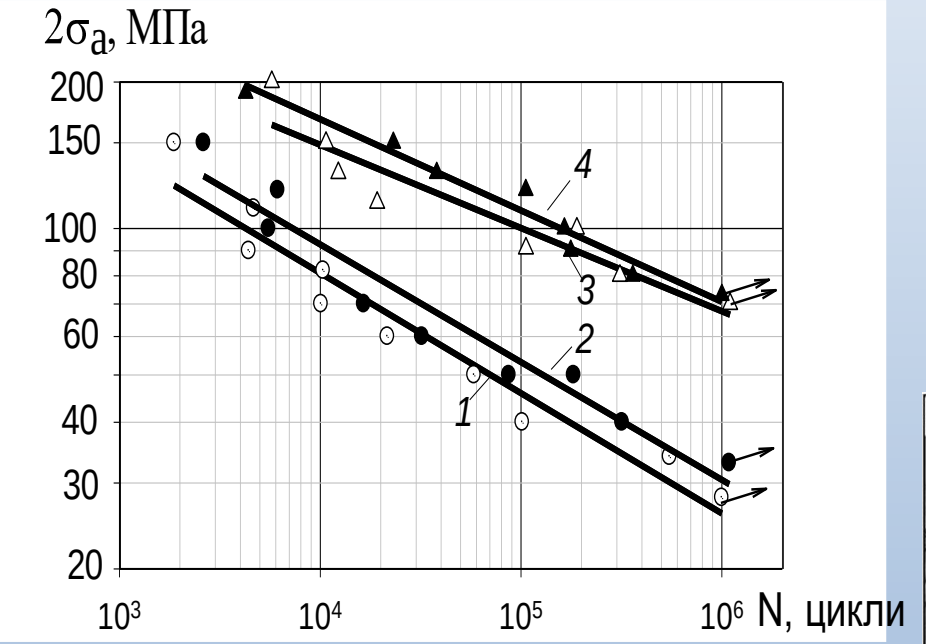
Швидке зміцнення та насичення величини мікротвердості із зростанням тривалості УЗУО

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

УЗУО відрізняється від традиційних методів ударної обробки (пневмодинамічної, дробоструменевої та інших) високою продуктивністю і рекордним підвищенням втомної міцності зварних з’єднань різноманітних конструкцій, а також поліпшенням умов праці операторів (зниження шуму і шкідливих вібрацій)

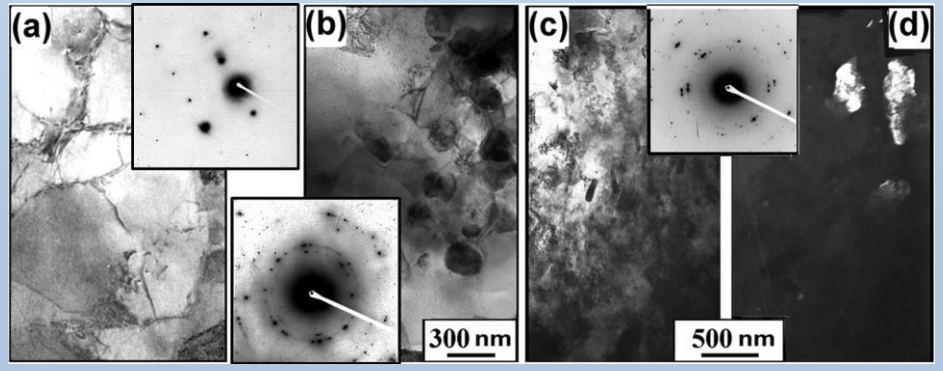
Підвищення опору втоми зварних з'єднань алюмінієвого сплаву АМг6 зміцненням УЗУО

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 ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ОБРОБКИ ПОВЕХНІ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ І ЗВАРЮВАННЯ ПЛАСТМАС

Різні модифікації розроблених установок для УЗУО

USTREAT-1.0 (2006 р.)

USTREAT-2.0 (2010 р.)

USTREAT-3.0 (2013 р.)

Розробка визнана переможцем у Всеукраїнському конкурсі «Винахід року – 2016»

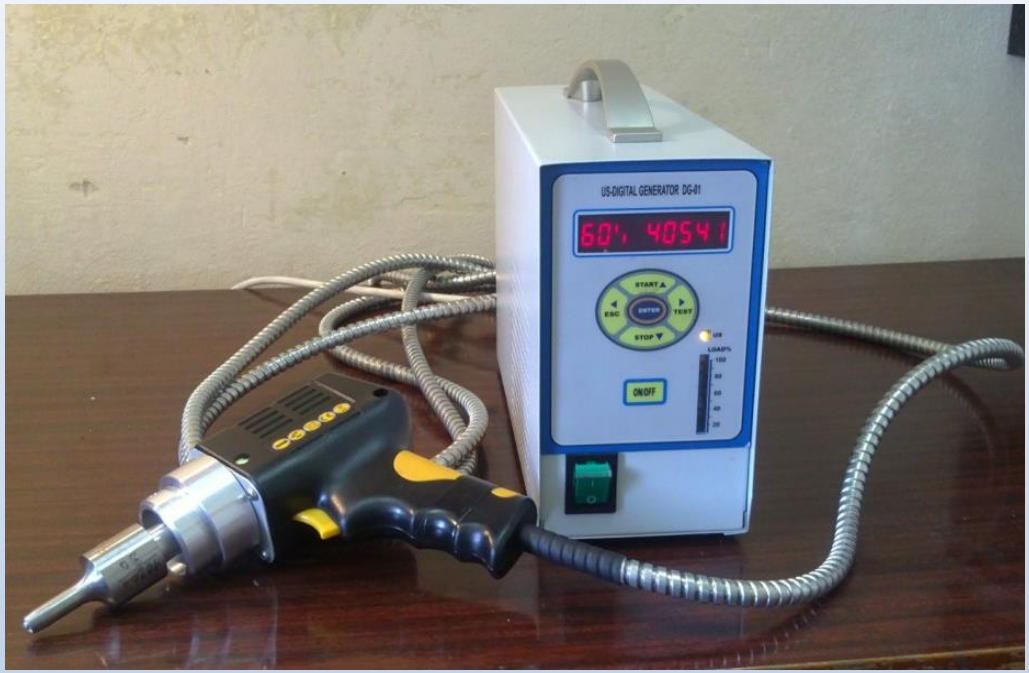
USTREAT-4.0 (2017 р.)

БЕЗАБРАЗИВНА УЛЬТРАЗВУКОВА ФІНІШНА ОБРОБКА (БУФО) ВИСОКОМІЦНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ЗАГАРТОВАНИХ СТАЛЕЙ – АЛЬТЕРНАТИВА ТРАДИЦІЙНОМУ ОБКОЧУВАННЮ КУЛЬКАМИ АБО РОЛИКАМИ

Обробка круглих деталей методом БУФО на токарному станку. Ультразвуковий інструмент приєднано до супорту.

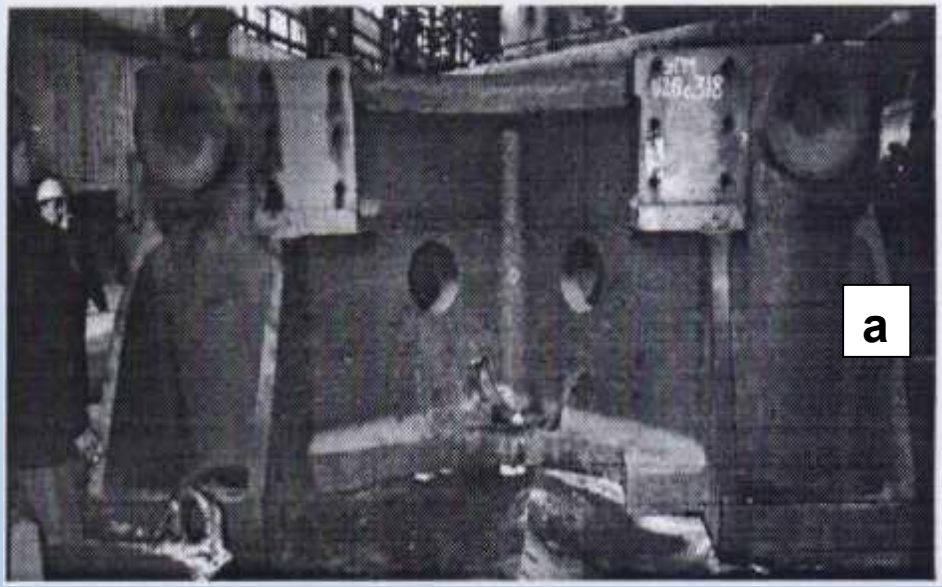
Загальній вигляд обладнання для БУФО

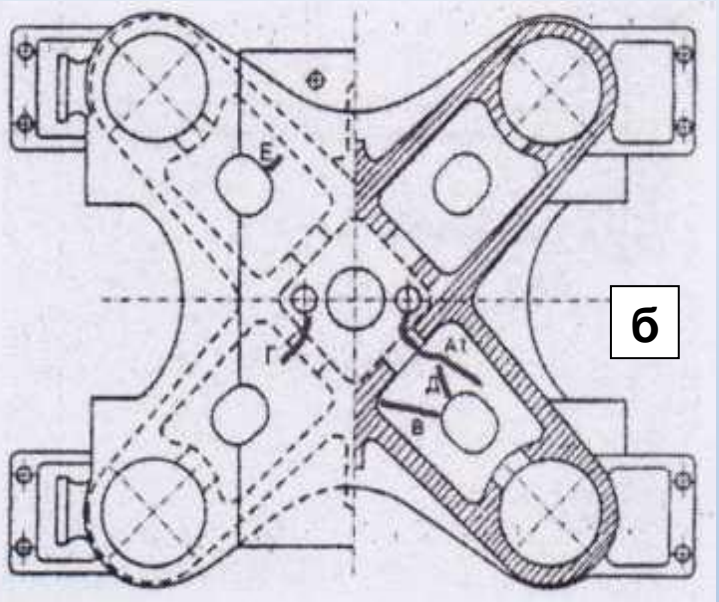
ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАСТМАС



ПРИКЛАДИ ПРОМИСЛОВОГО ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ УЗУО

РЕМОНТ СТАНИНИ ПРЕСУ ПОТУЖНІСТЮ 10 ТИСЯЧ ТОН ЗАВАРЮВАННЯМ ТРІЩИН З НАСТУПНОЮ УЗУО





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.

РЕМОНТНО-ВІДНОВЛЮВАНІ РОБОТИ ЗАЛІЗНИЧНИХ МОСТІВ

РЕМОНТ ЗАЛІЗНИЧНОГО МОСТУ Ч/Р ВОРСКЛА ЛІНІЇ КИЇВ-ХАРКІВ

Тріщина втоми 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).

ВИЯВЛЕННЯ, УСУНЕННЯ ТА ЗАВАРЮВАННЯ ТРІЩИН ВТОМИ У ЗАЛІЗНИЧНИХ МОСТАХ З НАСТУПНИМ ЗМІЦНЕННЯМ РЕМОНТНИХ ШВІВ УЗУО

Виявлена тріщина

Видалення тріщини.
Підготовка до заварювання

Тріщина після заварювання

Зміцнення ремонтних швів УЗУО

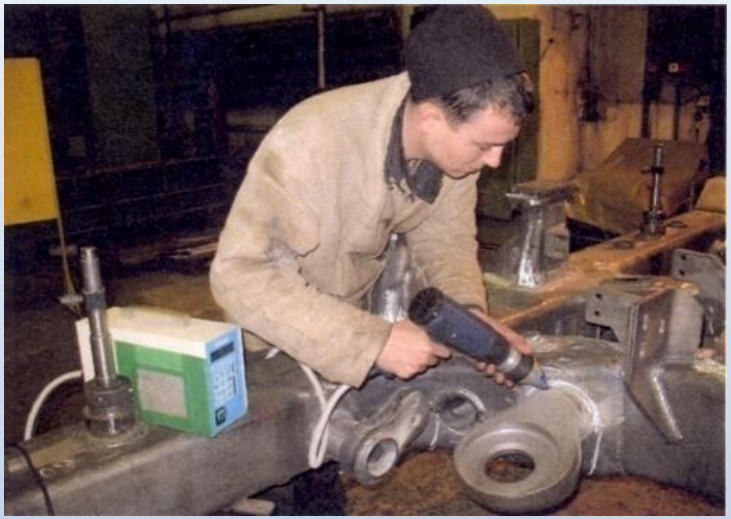
ПЕРЕВАГИ РЕМОНТУ ТРІЩИН ЗАВАРЮВАННЯМ З НАСТУПНОЮ УЗУО

Залежність коефіцієнту збільшення довговічності $К_{д.}$ від способу гальмування тріщини. Результати втомних випробувань натурних зразків із сталі 09Г2С

№	Спосіб гальмування тріщини	N циклів	$К_{д}$, N/N_{B}
1	Вихідний стан	35000	1
2	Висвердлювання отворів Ǿ 23 мм	52200	1,45
3	Висвердлювання отворів Ǿ 23 мм з наступним наклепом поверхні отворів методом УЗУО	84500	2,41
4	Установка у отвори високоміцних болтів Ǿ22 мм із натягом 20 тс.	730550	20,87
5	Локальна вибухова обробка отвору	277770	7,93
6	Локальне нагрівання	668300	19,09
7	Ремонт тріщини заварюванням	1450000	41,43
8	Ремонт тріщини заварюванням з наступною УЗУО	2000000	57,14

ТЕХНОЛОГІЇ УЗУО В ТРАНСПОРТНОМУ МАШИНОБУДУВАННІ

Обробка зварних швів візків вагонів метро на ТОВ “ Інструментальний завод ”, м. Кременчук



Переваги технології УЗУО у порівнянні з традиційним відпалом

Без УЗУО
Злам макету візка в зоні зварювання

Після УЗУО
Злам макету віддалі від шва

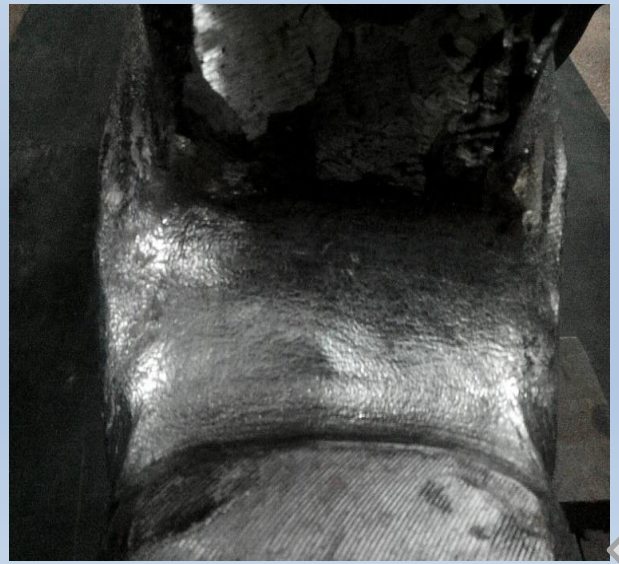
Випробовування натурних елементів візків вагонів (макетів) показали збільшення втомної довговічності в 2,5 рази

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**

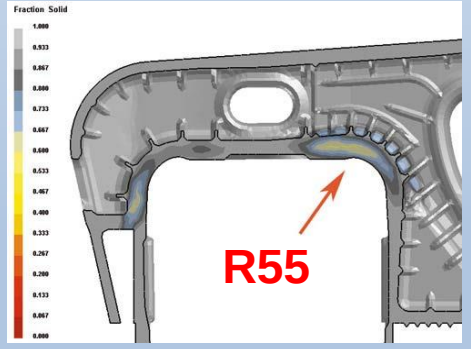
ЗМІЦНЕННЯ БОКОВОЇ РАМИ ВАНТАЖНОГО ВАГОНУ ТЕХНОЛОГІЄЮ УЗУО НА КРЕМЕНЧУЦЬКОМУ СТАЛЕЛИВАРНОМУ ЗАВОДІ

Злам бокової рами вантажного вагону

Обробка бокової рами в цеху заводу



Галтель R55 після обробки



Живучість оброблених рам (час між появою тріщини і зламом) зросла на 23%

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

ПІДПРИЄМСТВА, ДЕ ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ТЕХНОЛОГІЇ І ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ УЗУО, БУФО, УЗО І ЗВАРЮВАННЯ ПЛАСТМАС

- ПАТ “ Крюківський вагонобудівний завод ” – релаксаційна обробка бокових панелей корпусів пасажирських вагонів, УЗУО візків вантажних вагонів.
- ТОВ “ Інструментальний завод ” – УЗУО зварних швів візків вагонів метро.
- ПАТ “ Кременчуцький сталеливарний завод ” – УЗУО галтелей бокової рами вантажних вагонів.
- АТ “ Укрзалізниця ” – ремонтно-відновлювані роботи по ліквідації втомних пошкоджень мостів, шляхопроводів та елементів зварних конструкцій рухомого складу залізничного транспорту.
- ПАО «ЛУКОЙЛ-Одеський НПЗ» - резервуари для зберігання нафти об’ємом 10000 м^3.
- Черкаська ТЕЦ - усунення тріщин втоми в конструкції галереї подачі вугілля.
- ТОВ «Золотий Мандарин Квадро» - ремонт несучої рами вібропресового обладнання AMEthys 1500 HS.
- КБ “ Івченко-Прогрес ” – розробка УЗКС з випромінювачами ультразвуку на п’єзокераміці для камер УЗО лопаток турбін авіадвигунів.
- ДП “ Мотор-Січ ” – розробка обладнання для ультразвукового вигладжування деталей круглої форми для ГТД.
- ТОВ «ЄВРОВЕТС», ТОВ «ECOSOFT» - обладнання для ультразвукового зварювання пластмасових вентиляторів, корпусів фільтрів для води
- ПрАТ МХП «Наша ряба» - ручний інструмент для ультразвукового зварювання конвеєрних стрічок на ряді птахофабрик.

УЛЬТРАЗВУКОВІ КАВІТАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

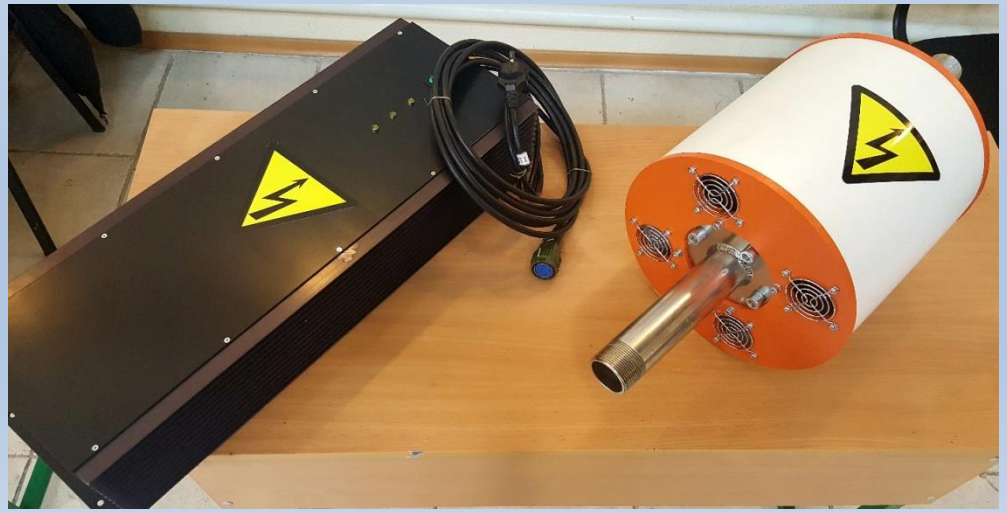
Концентрація енергії ультразвуку в кавітаційній камері у вигляді трубчастого вібратора

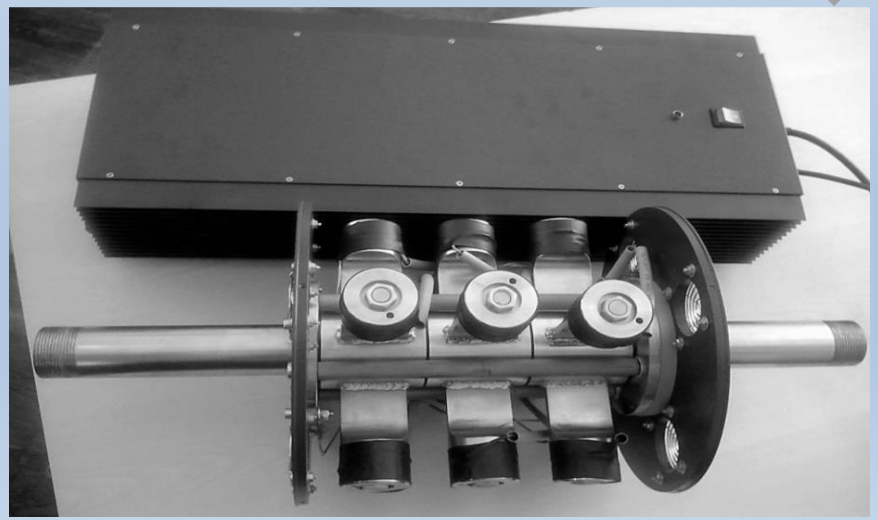
УЛЬТРАЗВУКОВЕ КАВІТАЦІЙНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ РІДИН В ПОТОЦІ

Ультразвуковий проточний кавітатор USS-400

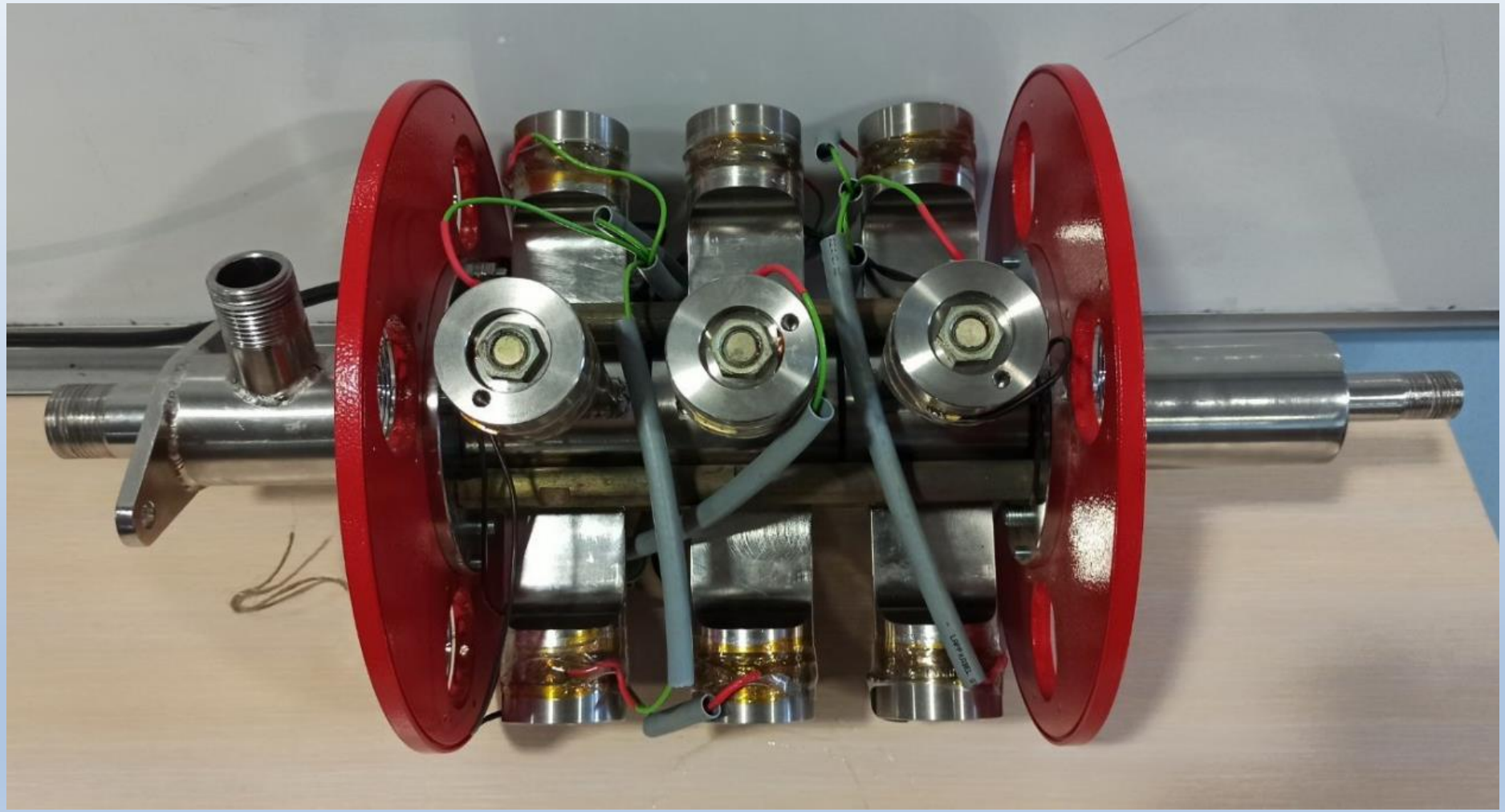
Розробка визнана переможцем у Всеукраїнському конкурсі «Винахід року – 2016»

Ультразвуковий проточний кавітатор USS-1200





УЛЬТРАЗВУКОВИЙ ПРОТОЧНИЙ КАВІТАЦІЙНИЙ ФІЛЬТР З ЕФЕКТОМ САМОРЕГЕНЕРАЦІЇ

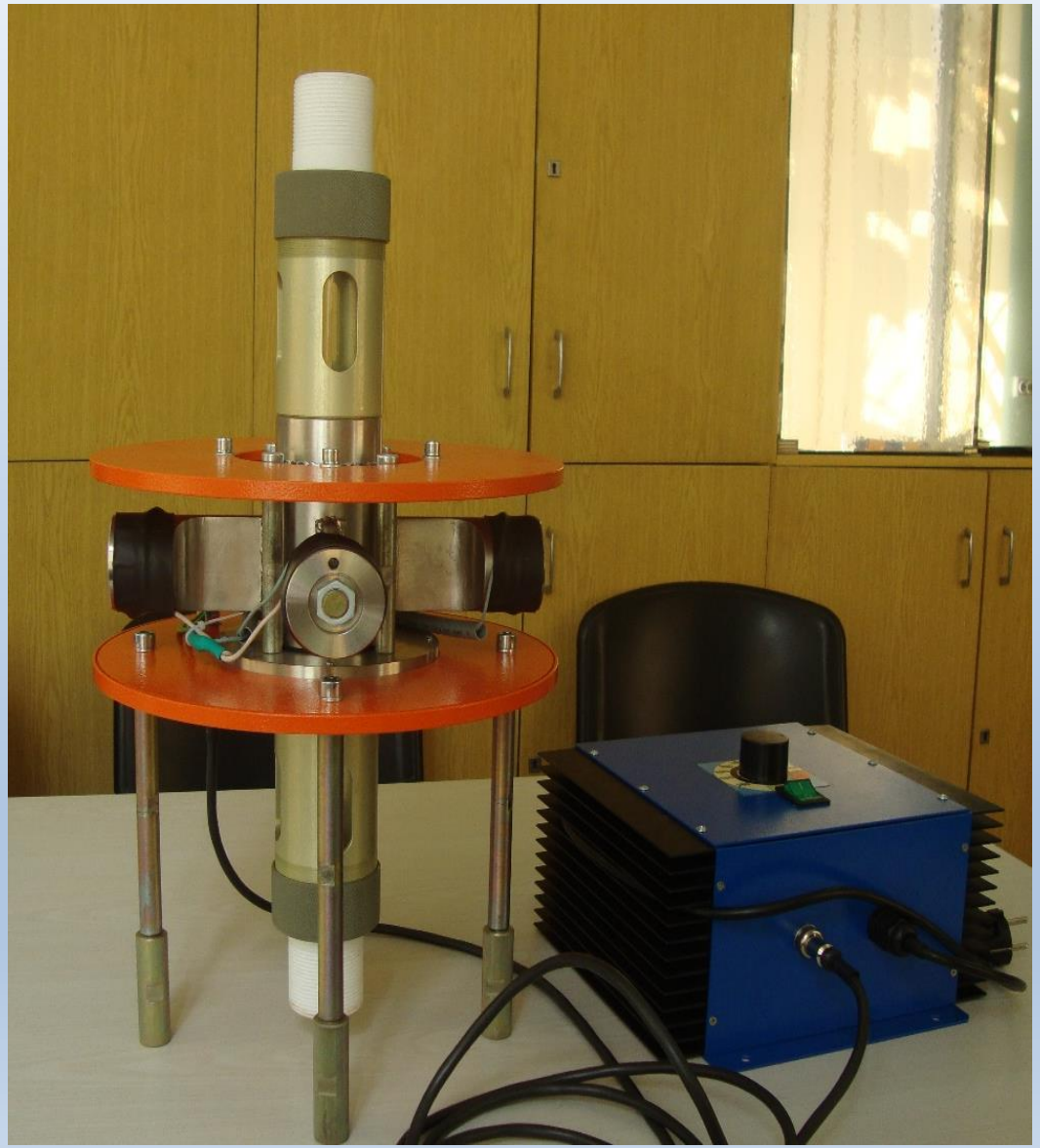


Для тонкої фільтрації (1 мкм) в технологічному процесі виробництва соняшникової олії

УЛЬТРАЗВУКОВЕ КАВІТАЦІЙНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОБРОБКИ ПЛАСТОВОЇ ВОДИ В ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОЦЕСІ ВИДОБУВАННЯ НАФТИ

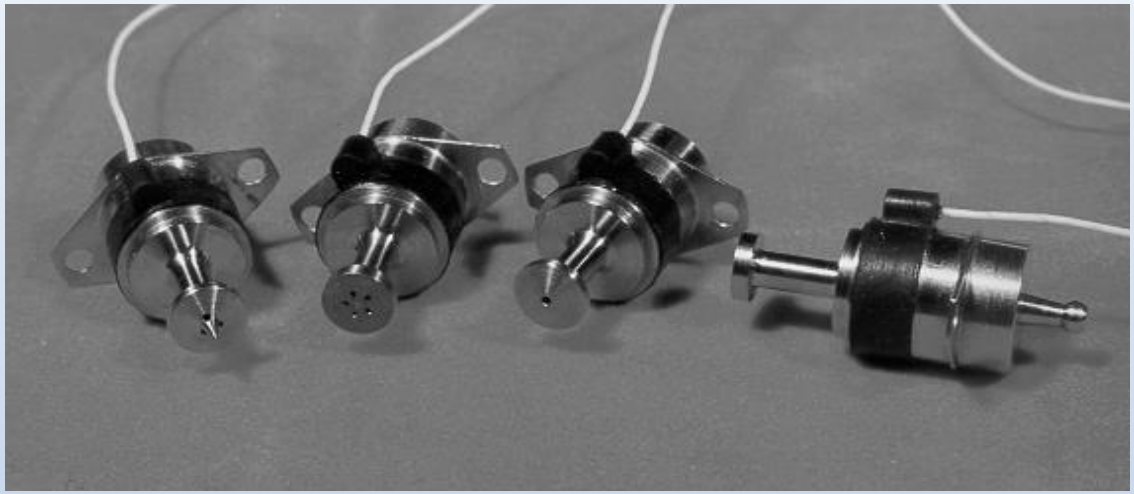
Ультразвукова проточна кавітаційна установка, що встановлена на нафтодобувній свердловині НГВУ “ Чернігівнафтогаз ” нафтового родовища в м. Прилуки

УЛЬТРАЗВУКОВІ КАВІТАЦІЙНІ ПРИСТРОЇ ДЛЯ ФАРМАЦЕВТИЧНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ



Ультразвукове кавітаційне обладнання для отримання особливо чистих екстрактів лікарських рослин в фармацевтичній промисловості

УЛЬТРАЗВУКОВЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЇ РОЗПИЛЕННЯ В ТОНКОМУ ШАРІ



Малогабаритні ультразвукові диспергатори для систем впорскування палива в двигуни внутрішнього згоряння

Диспергатор з пневматичним охолодженням та формуванням факелу аерозолю

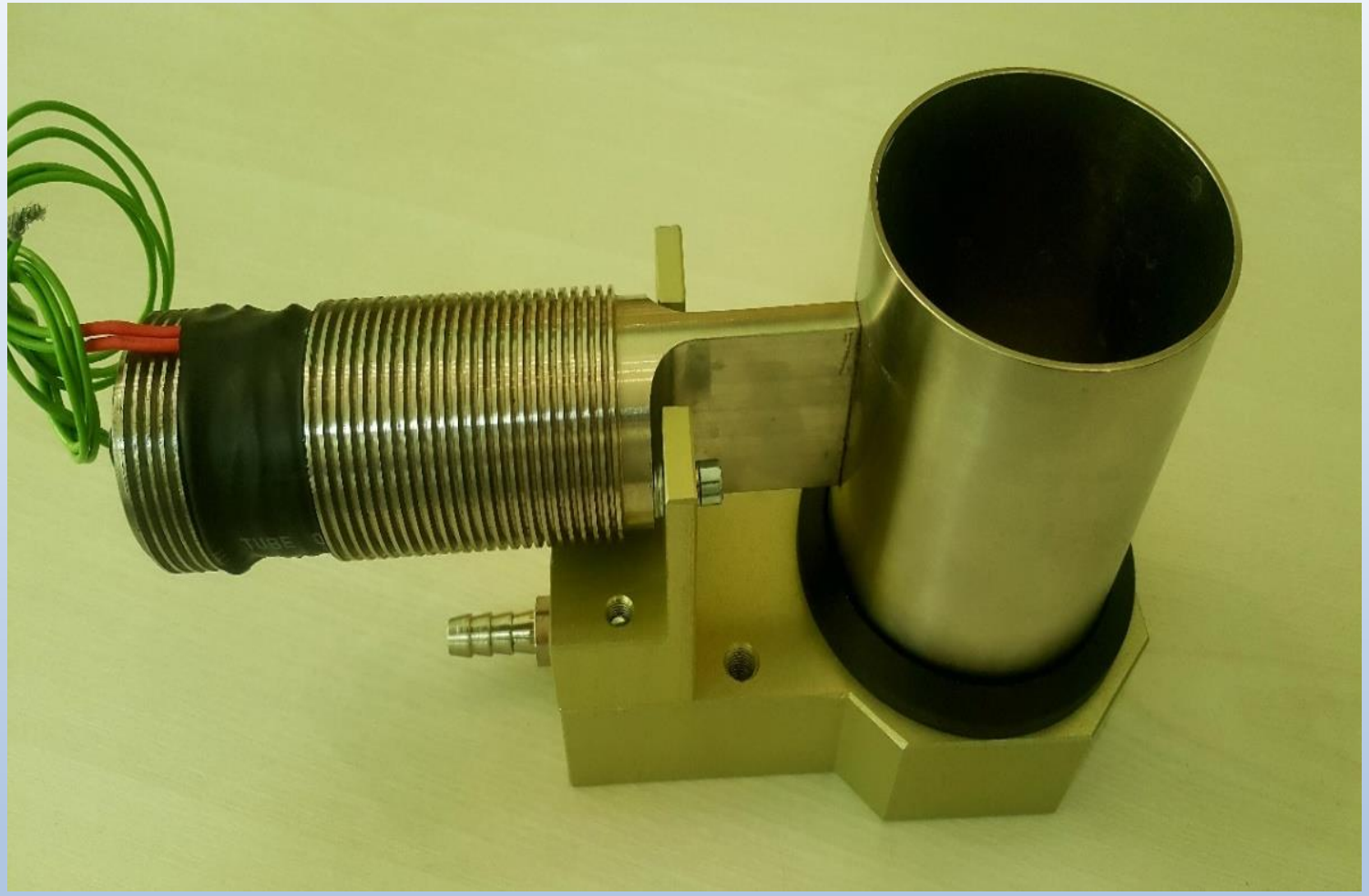
Диспергатор до мехатронних систем штучного мікроклімату

УЛЬТРАЗВУКОВІ ДИСПЕРГАТОРИ

Диспергатор для отримання дрібнодисперсних порошків металів (резонансна частота 33 кГц, продуктивність до 90 мл/хв., дисперсність порошку 15…30 мкм)

Ультразвуковий диспергатор з можливістю зміни форми факелу розпилення у складі мехатронних систем зрошування в сільському господарстві (продуктивність до 2,5 л/хв., дисперсність аерозолю 15…30 мкм)

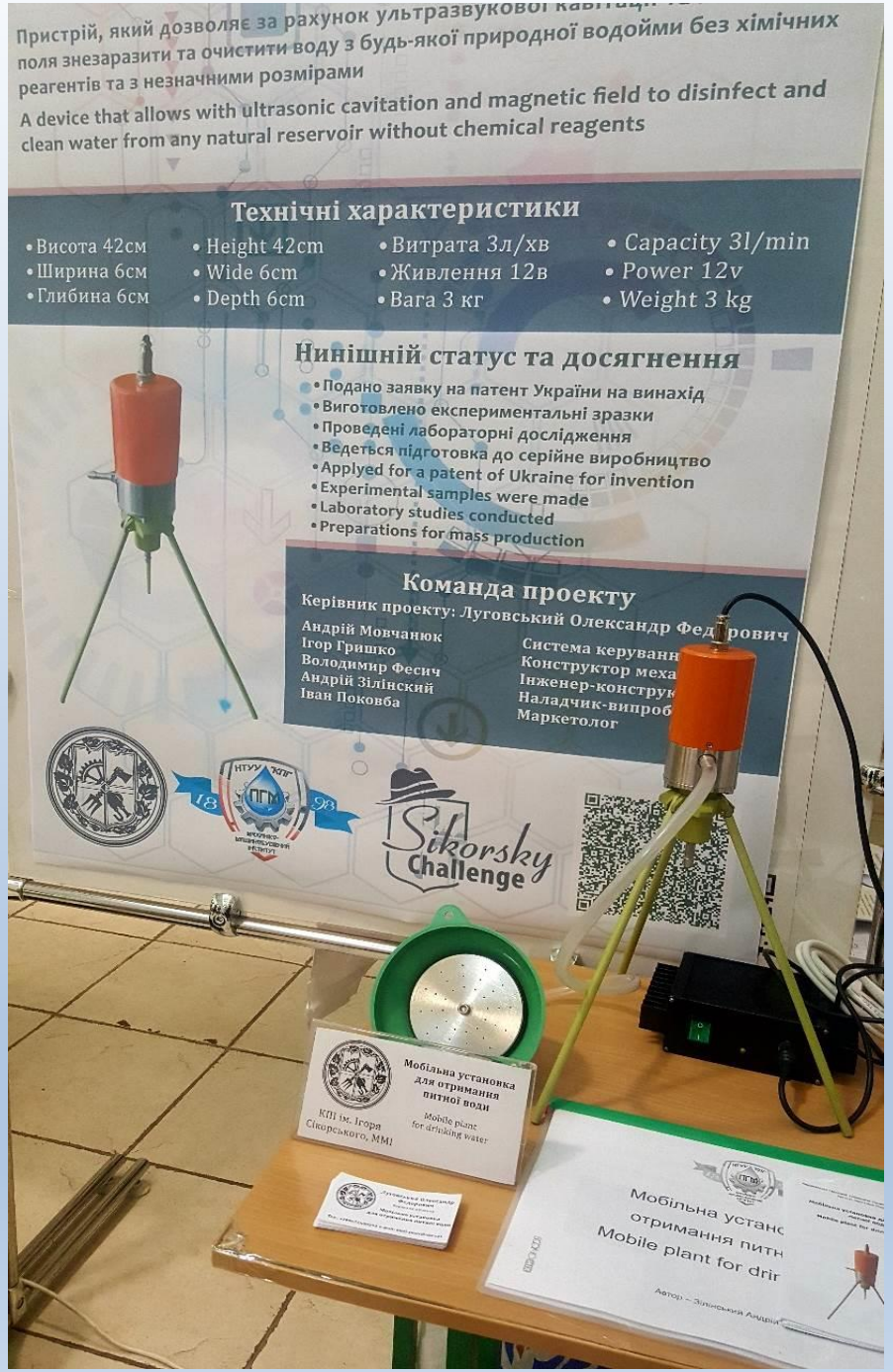
УЛЬТРАЗВУКОВІ ДИСПЕРГАТОРИ

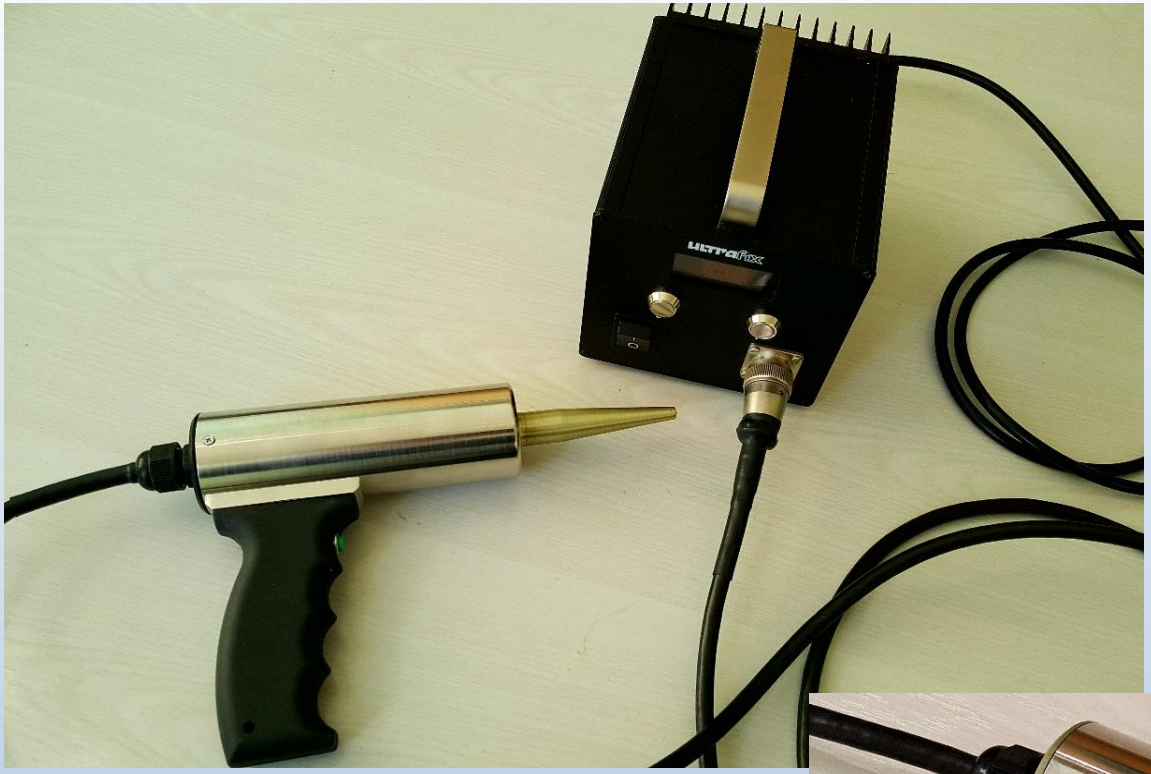


Ультразвуковий диспергатор для отримання аерозолю у складі мехатронних систем опріснення, отримання сухого молока та пектинового порошку (продуктивність до 4л/хв., дисперсність аерозолю 15…30 мкм)

АПАРАТИ ДЛЯ ЗНЕЗАРАЖУВАННЯ РІДИН

Розробка є фіналістом Фестивалю інноваційних проектів "Sikorsky Challenge"





РУЧНІ УЛЬТРАЗВУКОВІ АПАРАТИ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАСТМАС

Розробка НТУУ “ КПІ ім. Ігоря Сікорського ”

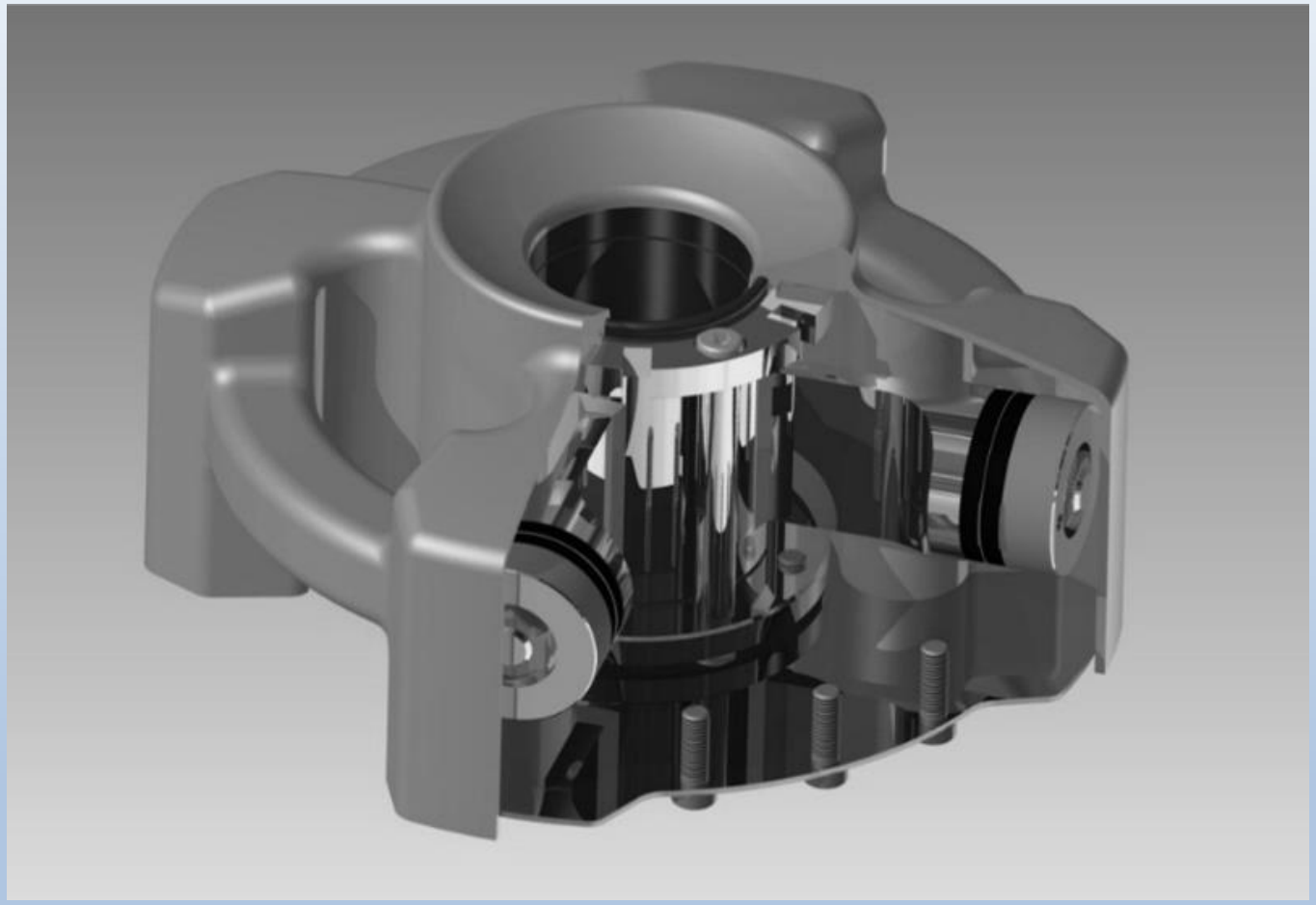
Використання:
легка промисловість,
сільське господарство

ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ БОРОТЬБИ З ІНКРУСТАЦІЄЮ НА ТЕПЛООБМІННИХ ПОВЕРХНЯХ

Комплекти ультразвукової апаратури “Пік-1” та “Пік-2”

Дослідна експлуатація розроблених приладів на існуючій тепломережі показала, що навіть на значній відстані від ультразвукового перетворювача відбувається суттєве зменшення відкладень на внутрішніх теплообмінних поверхнях. Старі тверді відкладення відпадають від металевих поверхонь, а ті що не відпали – розрихлюються і поступово руйнуються.

УЛЬТРАЗВУКОВЕ КАВІТАЦІЙНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПОЛЬОВИХ ШПИТАЛІВ



Ультразвуковий кавітаційний прилад для знезараження та очищення медичного інструментарію

ПІДПРИЄМСТВА, ДЕ ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ КАВІТАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ І УЛЬТРАЗВУКОВЕ ОБЛАДНАННЯ - 1

- ДП ПАТ «Оболонь» - «Красилівське» - впроваджено запатентовану технологію насичення рідини газами за рахунок ультразвукового дрібнодисперсного розпилення рідини в газове середовище;
- ТОВ НМЦ «Медінтех» - впроваджено запатентовану розробку ультразвукового інгалятора з дозованим розпиленням в тонкому шарі та ультразвуковий масажний вібратор;
- ТОВ «Агрохім Групп», ТОВ «ЕНЕРГОМЕХКОМПЛЕКТ» та ТОВ «Джала Голд» - впроваджені проточні ультразвукові кавітатори різної продуктивності для отримання гумінових добрив, на базі КАС та апарат для ультразвукового екстрагування з метою отримання особливо чистих екстрактів лікарських рослин;
- «Центр мікрохірургії ока» - впроваджено розробку ультразвукового факоемульсифікатора для проведення операцій на очах людини;
- АТ «Квазар» - впроваджено лінію по ультразвуковому кавітаційному очищенню електронних плат та ультразвукового розпилення для нанесення на оптичні елементи просвітлюючих покриттів;

ПІДПРИЄМСТВА, ДЕ ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ КАВІТАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ І УЛЬТРАЗВУКОВЕ ОБЛАДНАННЯ - 2

- Корпорація «Сварог Вест Груп» - впроваджено ультразвуковий кавітаційний апарат для холодного знезараження та гомогенізації молока, а також ультразвукові розпилювачі добрив зі змінним кутом розкриття факелу розпилу для мехатронної системи зрошування;
- НГВУ «Чернігівнафтогаз» - впроваджено ультразвуковий проточний кавітаційний апарат для боротьби з інкрустацією на трубах для закачування агресивної пластової води;
- ПП «Кондитерський дім «Санкруа» - впроваджено технологію та обладнання
для активації хлібопекарських дріжджів при виробництві хлібобулочної продукції;
- ПАТ «Дрогобицький завод автомобільних кранів» - впроваджено ультразвукове кавітаційне обладнання для регенерації мастильно-охолоджуючих рідин
- ТОВ «Продсервіс – ІР» - впроваджено спосіб та обладнання для вилучення пектину з яблучних вичавок;
- Інститут хімії поверхні НАН України ім. О.О. Чуйка – впроваджено систему ультразвукового розпилення з метою нанесення покриттів в умовах високих температур.

МІЖНАРОДНЕ СПІВРОБІТНИЦТВО

Зарубіжні патенти:

Патент США № 6 467 321

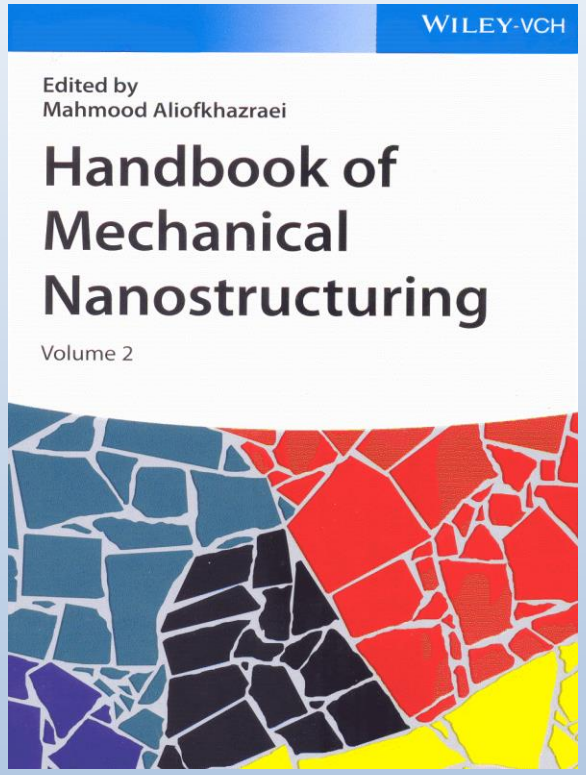
Патент Канади № CA 2 348 834

Патент США № 8 747 732

Патент Японії № 5 779 230

Патент РФ № 2 540 600

З 1994 року різні аспекти технології УЗУО (UIT, HFMI) були представлені на щорічних сесіях МІЗ науковцями України і Канади, а технологія рекомендована в 2008 році 13-й комісією МІЗ для використання в зварювальному виробництві.



•***B.N. Mordyuk, G.I. Prokopenko*. Ultrasonic Impact Treatment – an effective method for nanostructuring the surface layers of metallic materials // Handbook of mechanical nanostructuring (M. Aliofkhazraei, Ed.), Wiley-VCH. –2015. – P. 417-434.**

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 superelastic 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*”.

ВИСНОВКИ - 1

- Проведено дослідження фізичних процесів, які відбуваються за умов інтенсивної пластичної деформації поверхні металевих матеріалів під час УЗУО. Встановлені механізми складних структурно-фазових перетворень і механо-хімічних реакцій, які призводять до наноструктуризації поверхневих шарів, ініціюють аномальне масоперенесення, динамічну рекристалізацію тощо.
- Виконано комплекс експериментальних і теоретичних досліджень, дає можливість прогнозувати збільшення ресурсу зварних металоконструкцій за рахунок застосування УЗУО, як на стадії виготовлення, так і після тривалої експлуатації з урахуванням впливу кліматичних чинників, наявності технологічних непроварів, поверхневих пошкоджень незначної глибини та інших чинників.
- Обґрунтована ефективність застосування ремонтно-відновлювальних робіт зварюванням з наступним зміцненням ремонтних швів УЗУО, що дозволяє повністю відновити цілісність і несучу здатність виробів і споруд з тріщинами втоми та гарантовано продовжити призначений при проектуванні термін їх експлуатації.
- Розроблено і виготовлено обладнання для БУФО, яке дозволяє отримати граничне зниження шорсткості поверхні деталей машинобудування, підвищити їх зносостійкість, корозійну стійкість та втомну міцність, а також надає можливість обробки високоміцних матеріалів і загартованих сталей.

ВИСНОВКИ - 2

- На основі теоретичних розрахунків розроблено і виготовлено дослідний зразок УЗКС на 17кГц з ПЕП, який пройшов успішну промислову перевірку. Показана ефективність розробленої системи для УЗО деталей складної форми (лопаток турбин авіаційних двигунів) кульками в замкнутому об’ємі для підвищення їх довговічності та надійності.
- Створене обладнання для ультразвукового зварювання пластмас і металів знайшло застосування у різних галузях промисловості (легкої, харчової та ін.), а також у виробництві електронної техніки, що сприяє підвищенню якості продукції, продуктивності та покращенню умов праці.
- Розроблене обладнання з використанням потужного ультразвуку дозволяє застосувати на практиці значну кількість нових способів кавітаційної обробки різноманітних рідин, а також суттєво підвищити ефективність багатьох технологічних процесів у машинобудуванні, хімічній промисловості, сільському господарстві, харчовій промисловості та медицині.