

УДК 621.791.052:539.43

Г. Прокопенко¹, докт. техн. наук; В. Книш², канд. техн. наук;
С. Соловей, канд. техн. наук²

¹Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова, Україна

²Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона, Україна

ПОДОВЖЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СТАЛЕЙ СТЗСП І 09Г2С ВИСОКОЧАСТОТНИМ МЕХАНІЧНИМ ПРОКОВУВАННЯМ

Резюме. Наведено результати досліджень ефективності застосування високочастотного механічного проковування (ВМП) для обробки зразків з тавровими зварними з'єднаннями, виготовленими з низьковуглецевих і низьколегованих сталей. Зразки з накопиченими втомними пошкодженнями на рівні 50% загальної довговічності піддавались ВМП, а потім – втомним іспитам шляхом регулярного і блокового навантаження. Встановлено, що застосування технології ВМП дозволяє подовжити циклічну втомну довговічність таких з'єднань не менш, ніж у 12 разів.

Ключові слова: ультразвук, високочастотне механічне проковування, механічна втома, зварні з'єднання, межа втоми, втомна довговічність.

G. Prokopenko, V. Knysh, S. Solovey

PROLONGATION OF THE RESIDUAL RECOURSE OF WELDED JOINTS OF STEELS CT3CP AND 09G2C BY HIGH-FREQUENCY MECHANICAL FORGING

The summary. The paper gives the results of investigation of the effectiveness of application high-frequency mechanical forging (HFMF) with regular and block loading to improve residual fatigue life of T-shaped welded joints of low-carbon and low-alloyed steels with 50% level of accumulated fatigue damages. It is established that application of HFMF technology allows 12 times improvement of cyclic fatigue life of such joints.

Key words: ultrasonic, high-frequency mechanical forging, mechanical fatigue, welded joints, fatigue limit, fatigue durability.

Вступ. Несуча здатність зварних металоконструкцій інженерного призначення визначається опором їх зварних з'єднань втомним руйнуванням. Об'єм конструкцій відповідального призначення, плановий термін експлуатації яких наближається до завершення, істотно перевищує по тоннажу ті конструкції, що вводяться в експлуатацію. Зростання активності господарської діяльності особливо загострює необхідність продовження терміну служби різних несучих конструкцій. В умовах обмежених матеріальних ресурсів і часу важлива роль відводиться організації дієвих заходів з відновлення несучої здатності зварних металоконструкцій. При ремонтно-відновних роботах велику увагу необхідно приділяти підвищенню характеристик опору втомі зварних вузлів і елементів. Відомо, що найефективнішого продовження довговічності зварних з'єднань з накопиченими втомними пошкодженнями можна досягти обробкою зон швів зварних з'єднань високочастотним механічним проковуванням (ВМП) [1]. У вітчизняній і зарубіжній літературі можна зустріти терміни: ультразвукова ударна обробка (УЗУО) і Ultrasonic Impact Treatment (UIT). По суті, це одна і та ж технологія. Проте, оскільки ударні елементи коливаються в малому зазорі (близько 0,01 мм) між торцем ультразвукового випромінювача і оброблюваним виробом з частотою ~1 – 3 кГц, термін ВМП вважається більш переважним.

Втомне руйнування зварних з'єднань відбувається, як правило, по лінії сплаву шва з основним металом, тому обробці піддається тільки ця вузька ділянка. Численні випробування зварних зразків різної товщини показали, що для підвищення втомної міцності досить обробляти лише таку зону [2].

Після проковування лінії сплаву шва з основним металом на оброблюваній поверхні формується гладка канавка шириною 3–4 мм і завглибшки біля 1 мм. Створення такої канавки знижує концентрацію напруги, усуває дрібні дефекти шва і призводить до створення залишкових стискуючих напруг у деформованій зоні. Крім того, тут відбувається утворення субмікросталічної структури, що також перешкоджає виникненню втомних тріщин у поверхневому шарі й призводить до підвищення опору втомі [3]. ВМП зварних з'єднань здійснювалася ультразвуковим багатобойковим інструментом з перетворювачем на п'єзокераміці зі стрижньовими бойками діаметром 3 мм у кількості 4 одиниць в один рядок. Технологія й устаткування для ВМП були розроблені в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона і в Інституті металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України [2, 4, 5].

У роботах [6–9] представлені дані експериментальних досліджень підвищення характеристик опору втомі з використанням технології ВМП натурних трубчастих вузлів і зразків таврових зварних з'єднань після накопичення заданого рівня втомного пошкодження аж до утворення поверхневої тріщини. Інженерні конструкції в процесі експлуатації, як правило, піддаються складним режимам навантаження, коли послідовність значень амплітуд і середньої напруги циклу змінюється випадковим чином, тому важливо в лабораторних умовах оцінити залишкову довговічність з'єднань при порівнянні різних способів навантаження.

Метою даної роботи є встановлення ефективності застосування технології ВМП для підвищення циклічної довговічності таврових зварних з'єднань з 50% накопиченими втомними пошкодженнями при дії регулярного і блокового навантажень, що дуже важливо для практичного використання даної технології.

Методика експерименту. Експериментальні дослідження проводили на зразках таврових з'єднань сталей СтЗсп (260 МПа, 465 МПа) і 09Г2С ($\sigma_T = 370$ МПа, $\sigma_B = 540$ МПа). Заготовки для зразків вирізували з листового прокату так, щоб довга сторона була орієнтована уздовж прокату. Поперечні ребра приварювали кутовими швами з двох боків ручною зваркою електродами марки УОНИ 13/55 в три проходи при $I = 180$ А і $U = 30$ В. Для забезпечення повного проплавлення виконувалося V-подібне оброблення кромки. Форма і геометричні розміри зразків наведено на рис. 1. Товщина зразка зумовлена широким застосуванням у зварних конструкціях прокату завтовшки 12 мм. Ширину робочої частини зразка вибирали, виходячи із потужності випробувального устаткування. Втомні випробування зразків проводили на випробувальній машині УРС-20 при одноосному розтягуванні з асиметрією циклу $R_\sigma = 0$ і частотою 5 Гц. Обробка зразків ВМП здійснювалась на установці УЗГ- 300. Амплітуда ультразвукових коливань була 20 мкм, швидкість переміщення інструменту уздовж зварного шва складала близько 1,0 м/хв.

Експериментальні результати і їх обговорення. Спочатку були випробувані сталеві зразки СтЗсп при регулярному навантаженні. На рис. 2 представлені результати втомних випробувань 3-х серій зразків. Перша серія зразків була випробувана в початковому стані відразу після зварки (крива 1). Друга серія піддавалася ВМП відразу після зварки (крива 2), а третя оброблялася після вичерпання 50% довговічності початкових зразків (крива 3). Отримані криві втомі демонструють підвищення межі витривалості на базі 2×10^6 циклів зразків другої і третьої серій щодо зразків першої серії від 115 МПа до 180 і 195 МПа відповідно. Довговічність зразків третьої серії, які

були випробувані спочатку в початковому стані при $\sigma_{\max} = 200$ МПа, підвищується більш ніж на порядок. Такий результат можна пояснити наступним чином. Відомо, що певне зниження розтягуючих напружень в області зварного шва може відбуватися під дією перевантаження в зонах концентраторів. Цей ефект виявляється особливо помітно при перших циклах навантаження, а подальша обробка ВМП, мабуть, додатково збільшує довговічність зразків третьої серії.

Таким чином, збільшення циклічної довговічності й підвищення межі витривалості зварних з'єднань сталі СтЗсп після ВМП ефективно як при обробці зразків відразу після зварки, так і після вичерпання ними 50% довговічності. Це зумовлено сумісним впливом наступних чинників: зняттям тих, що розтягують і освітленням у зоні концентраторів сприятливої залишкової напруги стиснення, зменшенням концентрації робочої напруги і деформаційним зміцненням поверхневого шару металу [2,5].

Потім були піддані випробуванням сталеві зразки 09Г2С у початковому стані, а також після зміцнення технологією ВМП (рис. 3). Бачимо значне збільшення межі опору втомі від 150 до 250 МПа після ВМП при регулярному навантаженні.

Далі оцінювання ефективності застосування технології ВМП для підвищення циклічної довговічності таврових зварних з'єднань з 50% накопиченими втомними пошкодженнями проводили при навантаженні в трьох блоках: зі зростаючим, спадаючим і квазівипадковим порядками додатку навантажень. Випробовувалося 9 зразків, по 3 зразки для кожного блока. Результати випробувань наведено на рис. 4.

Кількість циклів змін напруги до зміцнення на кожному ступені навантаження в умовах блокового навантаження задавалася за встановленою кривою втомі виходячи з гіпотези лінійного накопичення втомних пошкоджень. Згідно з даною гіпотезою частка пошкоженості D_i при будь-якому i -му рівні напруги циклу прямо пропорційна відношенню числа циклів його дії n_i до циклів до руйнування на цьому рівні N_i [9].

У цьому випадку руйнування відбудеться, якщо

$$\sum_{i=1}^k D_i = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1. \quad (1)$$

Порядок додавання навантажень у блоці задавався п'ятьма рівнями (ступенями) максимальної напруги циклу, що прикладалися, з 5% напрацюванням частки пошкоженості (5 % довговічності зварного з'єднання у вихідному стані) на кожному рівні (рис. 4). Таким чином, для всіх порядків додатку навантажень у блоці сумарну пошкоженість з'єднань, що дорівнює 50%, отримували після двох блоків навантаження для кожної серії (рис. 4а, б, в). Тому критерієм завершення випробувань в умовах блокового навантаження служило повне руйнування зразків після 4-х блоків навантаження.

Зростаючий порядок додавання навантажень у блоці задавали максимальною напругою циклу, яка дорівнювала 180 МПа на першому ступені навантаження, з подальшим збільшенням до 260 МПа (п'ятий ступінь навантаження) з кроком 20 МПа (рис. 4а). Спадаючий порядок додавання навантажень у блоці був прийнятий з початковим рівнем максимальної напруги циклу 260 МПа та із подальшим зменшенням до 180 МПа з кроком 20 МПа (рис. 4б). Квазівипадковий порядок додатку навантажень

характеризувався наступними п'ятьма послідовними рівнями максимальної напруги циклу в блоці: 220, 200, 240, 180, 260 МПа (рис. 4в). Кількість циклів при певному рівні напруження вказана на рис. 4 в середині блоків, з якого бачимо, що для всіх випадків число циклів однакове при даній нарузі.

Після двох блоків навантаження (накопичення 50% долі пошкодженості) і подальшого за цим зміцнення ВМП, всі три серії зразків піддалися додатково 25 блокам навантаження. При цьому ні в одному зі зразків втомних тріщин виявлено не було.

Таким чином, зміцнення ВМП дозволило продовжити залишкову довговічність таврових зварних з'єднань з накопиченою 50% пошкодженістю більш ніж в 12 разів при незмінних параметрах блокового навантаження. Тому представляло інтерес провести подальші втомні випробування до руйнування зразків. Такі випробування були проведені при підвищеному до 310 МПа рівні максимальної напруги.

Розкид значень довговічностей для випробуваних при підвищеному навантаженні (для 9-ти зразків) знаходився в діапазоні 115.284 тис. циклів, що склало 25.62% довговічності тих зварних з'єднань, які зміцнювалися технологією ВМП у вихідному після зварювання стані. Обробка ВМП зварного з'єднання з 50% рівнем накопичених втомних пошкоджень при блоковому навантаженні дозволяє істотно продовжити його залишкову довговічність за умови незмінного навантаження до і після зміцнення. Водночас збільшення значень довговічностей зміцнених зварних з'єднань при підвищеному до 310 МПа рівні максимальної напруги циклу дають можливість сподіватися на певний запас втомної міцності після ВМП. При цьому можна стверджувати, що однакові максимальної напруги циклу в блоці навантаження, які нижче за межу витривалості зміцненого зварного з'єднання, вже не призводять до пошкодження.

Таким чином, проведені дослідження показують високу ефективність застосування технології ВМП при продовженні терміну служби зварних з'єднань експлуатованих металоконструкцій. Важливою особливістю такої обробки є та обставина, що обробку можна проводити на вже експлуатованих конструкціях, що відслужили певний термін. Це дає можливість підвищити ресурс наявних відповідальних споруд і елементів зварних конструкцій, що має істотне значення для економіки України.

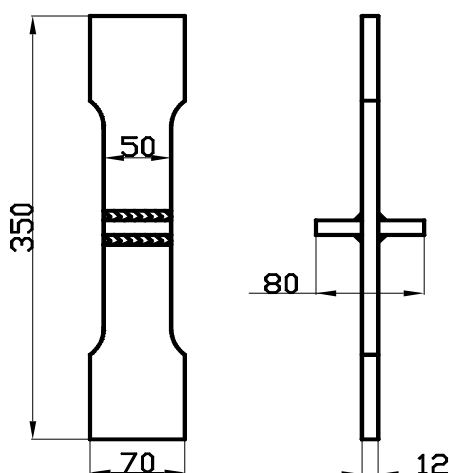


Рисунок 1

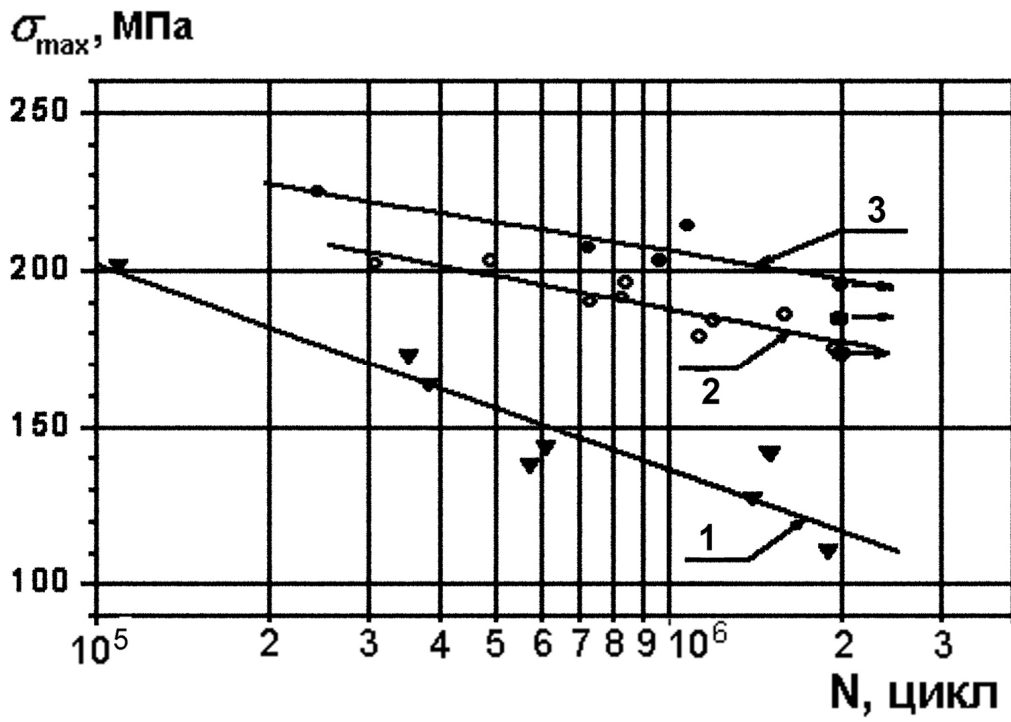


Рисунок 2

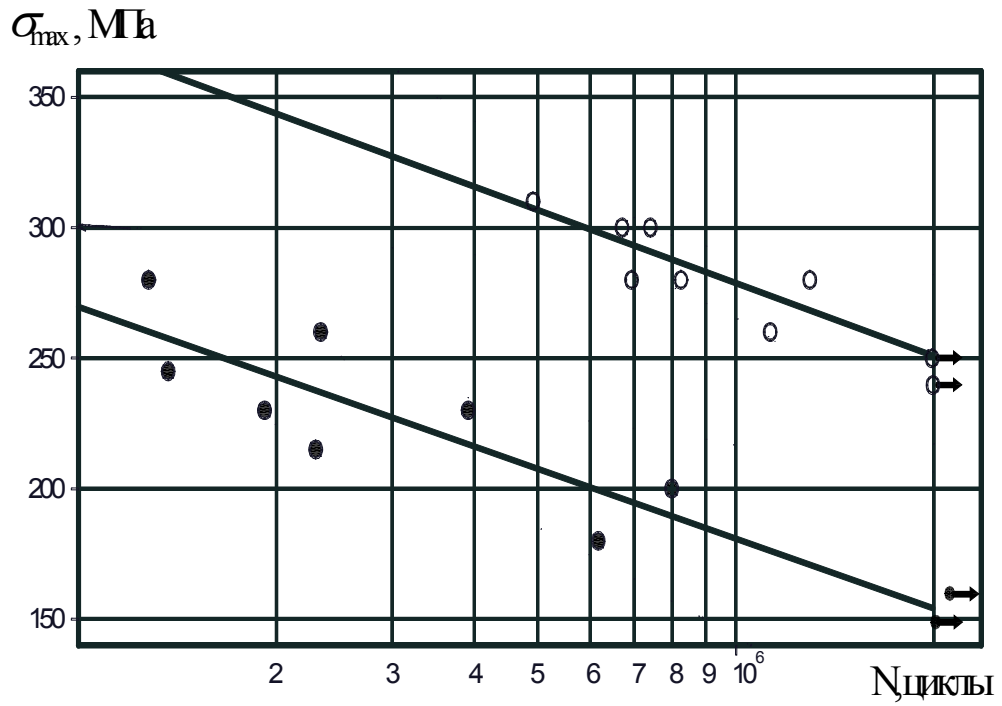


Рисунок 3

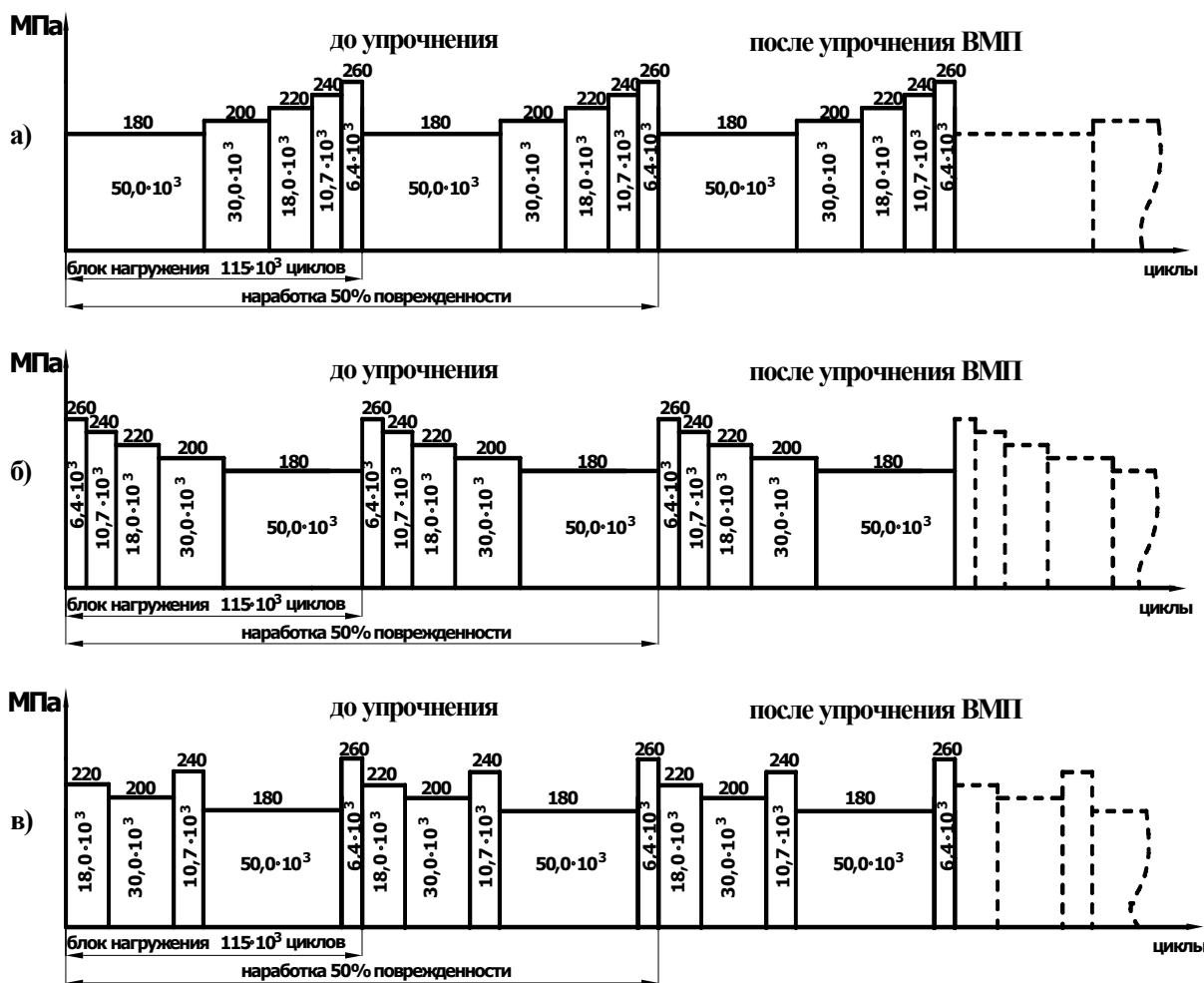


Рисунок 4

Рисунок 1. Форма і розміри зразка таврового зварного з'єднання

Рисунок 2. Криві втоми зварних з'єднань з маловуглецевої сталі СтЗсп: 1 – в початковому стані; 2 – оброблених ВМП відразу після зварки; 3 – оброблених ВМП після вичерпання 50%-ої довговічності зразками першої серії

Рисунок 3. Криві втоми таврових зварних з'єднань низьколегованої сталі 09Г2С: ● і ○ – у вихідному і зміцненому після зварки станах відповідно

Рисунок 4. Схема навантаження зразків таврового зварного з'єднання сталі 09Г2С в умовах дії блокового навантаження. Зростаюча послідовність додатку навантажень у кожному блоці (а), спадаюча (б) і квазівипадкова (в) послідовність

Висновки. Встановлено, що ВМП призводить до збільшення циклічної довговічності і до підвищення межі витривалості зварних з'єднань сталі СтЗсп як при обробці зразків відразу після зварки, так і після вичерпання ними 50% довговічності. При цьому заздалегідь циклічно навантажені зразки мають ще більшу довговічність після ВМП, аніж оброблені в початковому стані, а зростання межі витривалості при цьому складає ~ 10%. Показано, що зразки таврових зварних з'єднань сталі 09Г2С, які були випробувані у вихідному стані й після зміцнення технологією ВМП, дають збільшення межі витривалості при регулярному навантаженні від 150 до 250 МПа. Зміцнення технологією ВМП таврових зварних з'єднань сталі 09Г2С, після накопичення 50% пошкодженості при блоковому навантаженні, дає можливість гарантовано (без утворення тріщин) збільшити їх залишкову довговічність більш ніж у 12 разів за умови дії незмінного блокового навантаження до і після зміцнення. При цьому довговічність випробуваних зразків зварних з'єднань склала більше $3 \cdot 10^6$

циклів змін напруги. Після ВМП зварних з'єднань сталі 09Г2С з 50% часткою накопичених втомних пошкоджень рівні максимальної напруги циклу, що прикладається, в блоці навантаження ефекту пошкодження не надають, якщо вони нижчі за межу витривалості зміцненого зварного з'єднання. В той же час підвищення значень довговічностей зміцнених зварних з'єднань на 25.62% при рівні напруги 310 МПа вказують на певний резерв міцності після ВМП.

Література

1. Повышение сопротивления усталости сварных соединений металлоконструкций высокочастотной механической проковкой. (Обзор) [Текст] / Л.М. Лобанов, В.И. Кирьян, В.В. Кныш, Г.И. Прокопенко // Автоматическая сварка. – 2006. – № 9. – С. 3–11.
2. Патент України № 60390. Спосіб обробки зварних з'єднань металоконструкцій високочастотною проковкою [Текст] // Лобанов Л.М., Міхеев П.П., Книш В.В., Кудрявцев Ю.П., Мордюк Б.М., Клейман Я.І. Надрук. Бюл. №10, 15.10.2003.
3. Структурные изменения в зоне сварного шва стали Ст3 при ультразвуковой ударной обработке и их влияние на повышение сопротивления усталости [Текст] // Металлофизика и новейшие технологии. – 2008. – Т.30, № 10. – С.1429–1443.
4. Патент України № 8366. Пристрій для ультразвукової обробки [Текст] // Прокопенко Г.І., Красовський Т.А., Твердохліб А.Ф. Надрук. Бюл. № 1, 29.03.96.
5. Патент України № 13936 . Головка для ультразвукової ударної обробки зварних з'єднань [Текст] // Прокопенко Г.І., Козлов О.В. Надрук. Бюл. № 2, 25.04.97.
6. Кныш, В.В. Повышение сопротивления усталости сварных соединений высокочастотной механической проковкой [Текст] / В.В. Кныш, А.З. Кузьменко, О.В. Войтенко // Автомат. сварка. – 2006. – №1. – С. 43–47.
7. Гарф, Э.Ф. Оценка долговечности трубчатых узлов, подвергнутых ультразвуковой ударной обработке [Текст] / Э.Ф. Гарф, А.Е. Литвиненко, А.Х. Смирнов // Автомат. сварка. – 2001. – №2. – С. 13–16.
8. Кныш, В.В. Повышение циклической долговечности сварных тавровых соединений с поверхностными трещинами [Текст] / В.В. Кныш, А.З. Кузьменко, С.А. Соловей // Автомат. сварка. – 2009. – №1. – С. 38–43.
9. Трошенко В.Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов. Справочник. Часть 1 [Текст] / В.Т. Трошенко, Л.А. Сосновский. – Киев: Наукова думка, 1987. – 521 с.