

**Г.І. Прокопенко¹, Б.М. Мордюк¹,
Т.А. Красовський², В.В. Книш³, С.О. Соловей³**

¹ Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України,
бульв. акад. Вернадського, 36, Київ, 03142, Україна,
+380 44 424 1005, +380 44 424 2561, metall@imp.kiev.ua

² Київський академічний університет НАН і МОН України,
бульв. акад. Вернадського, 36, Київ, 03142, Україна,
+380 44 424 8250, +380 44 424 8250, taraskras@gmail.com

³ Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,
вул. Казимира Малевича, 11, Київ, 03150, Україна,
+380 44 200 4779, +380 44 528 0486, office@paton.kiev.ua

СТВОРЕННЯ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИСОКОЧАСТОТНОЇ МЕХАНІЧНОЇ ПРОКОВКИ ВИРОБІВ ВАГОНБУДУВАННЯ ТА МЕТОДІВ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ОБРОБКИ



Вступ. Технологія високочастотної механічної проковки (ВМП) зарекомендувала себе як надійний, ефективний і зручний метод для підвищення втомної міцності зварних конструкцій, що є одним з актуальних завдань машинобудівної галузі.

Проблематика. Досвід експлуатації обладнання та технології ВМП, показав, що існує чимало проблем, пов'язаних із визначенням якості й завершеності процесу обробки. В Інституті металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України було започатковано роботи зі створення ультразвукового обладнання для ВМП з електромеханічними перетворювачами на п'єзокераміці. Протягом тривалого часу це обладнання застосовувалося як для наукових досліджень, так і для обробки різних виробів і конструкцій. Проте серійного випуску устаткування та широкого впровадження технології ВМП у промисловість не відбулося.

Мета. Розробка нового ультразвукового надійного обладнання зі значним робочим ресурсом, придатного для використання в умовах виробництва, та створення інструментальних методів оцінки якості обробки методом ВМП зварних з'єднань певних деталей та виробів вагонобудівної галузі.

Матеріали й методи. Низьколеговані конструкційні сталі СтЗсп і 09Г2С; методи вимірювання твердості та мікротвердості; оптична мікроскопія.

Результати. Виготовлено макет ультразвукового обладнання, який пройшов різноспрямовані випробування на ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» (Кременчук, Україна). Виявлені в процесі випробувань недоліки було усунуто в новій моделі обладнання. Запропоновано методику визначення продуктивності та тривалості обробки зварних з'єднань методом вимірювання мікротвердості. Якість і завершеність обробки додатково визначається візуальним оглядом канавки, що утворюється під дією ударних елементів.

Висновки. Виготовлено нове ультразвукове обладнання та надано технологічні рекомендації з вибору режимів обробки візків залізничних вагонів та інших виробів ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод».

Ключові слова: високочастотна механічна проковка, втома металу, зварне з'єднання, мікротвердість, ультразвукове обладнання, якість і тривалість обробки.

Проблема підвищення втомної міцності, надійності та довговічності деталей і виробів машинобудування, насамперед зварних конструкцій, що працюють в умовах циклічного навантаження, є однією з актуальних проблем машинобудівної галузі. Одним з напрямів підвищення строку служби деталей машин і виробів є створення нових, високоефективних методів модифікації поверхні, зокрема й інтенсивною пластичною деформацією, шляхом ультразвукової ударної обробки (УЗУО), яка відома у вітчизняній літературі як високочастотна механічна проковка (ВМП). Висока частота ударів, їх значна питома потужність робить цей спосіб обробки максимально ефективним з точки зору коефіцієнта корисної дії, якості поверхні та досягнення рекордних значень підвищення втомної міцності. Незначна вага та габарити ультразвукового обладнання дають змогу застосовувати його як у цехах заводів, так і в польових умовах. Низький рівень енергоспоживання робить технологію ВМП лідером серед інших традиційних методів зміцнення зварних з'єднань. Оптимізація технології шляхом розробки інструментальних методів оцінки параметрів якості зварних з'єднань призведе до підвищення ефективності обробки та покращення економічних показників через зменшення витрат робочого часу. Широке впровадження розробленої ультразвукової апаратури у різних галузях народного господарства сприятиме підвищенню експлуатаційної надійності різноманітних конструкцій, що, в свою чергу, запобігатиме їх передчасному руйнуванню, справляючи значний економічний і соціальний ефекти, а також відповідає інноваційному напрямку розвитку промисловості України в галузі ресурсозбереження.

Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова та Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України розпочали спільні роботи з вивчення впливу ВМП на рівень залишкових напружень у зварних з'єднаннях на початку 70-х років минулого століття [1]. Згодом цей напрям наукових і

прикладних досліджень став базою для створення технології підвищення втомної міцності відповідальних зварних конструкцій за допомогою ВМП.

Відомо, що міцність зварного з'єднання є незначною, в першу чергу, внаслідок погіршення структури металу під час його розплавлення та твердіння, появи концентраторів напружень, а також через виникнення значних напружень розтягу в зоні шва. Якщо вони накладаються на зовнішні циклічні напруження, настає передчасне втомне руйнування в зоні з'єднання, що іноді призводить до катастрофічних наслідків. Напруження розтягу можна знизити нагріванням деталей, що є неможливим для великогабаритних конструкцій, тому в цьому випадку застосовують локальні методи обробки зварних з'єднань. Дослідження, проведені в ІЕЗ ім. Є.О. Патона, показали, що ВМП призводить до найбільш суттєвого підвищення втомної міцності зразків і елементів конструкцій порівняно з іншими методами обробки [2, 3]. Ця технологія за рекомендацією Міжнародного інституту зварювання (МІЗ) отримала назву *High Frequency Mechanical Impact (HFMI)*. Вона зарекомендувала себе в світі як надійний, ефективний та зручний для використання метод підвищення втомної міцності зварних конструкцій [4].

Зварювання листових конструкцій часто призводить до зміни їх геометрії внаслідок значних внутрішніх напружень. Ультразвукова обробка сприяє зменшенню цих напружень або їх перерозподілу. Це ще одна з можливостей застосування зазначеної технології. Водночас в Україні досі існують лише дослідні ультразвукові прилади для обробки такого типу. Попередні роботи, проведені на ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод», здійснювалися на експериментальних установках, які мали незначний строк експлуатації.

Таким чином, метою роботи та основним її завданням було створення надійного промислового ультразвукового обладнання для впровадження технології ВМП у виробництво. Для

цього необхідним є також визначення технічно обґрунтованих та інструментально вимірюваних критеріїв якості обробки.

СТВОРЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВМП ВИРОБІВ МАШИНОБУДУВАННЯ

Ультразвуковий ударний інструмент. За минулі роки було створено кілька способів і пристроїв для ВМП зварних швів [5, 6], метою яких було прагнення оптимізувати режими обробки та отримати максимальне збільшення втомної міцності при високій продуктивності процесу та зменшеному енергоспоживанні.

Найважливішим є також фактор високої надійності обладнання, оскільки воно повинно працювати тривалий час в складних виробничих умовах, а іноді й на відкритому повітрі за умови обробки зовнішніх зварних конструкцій. При розробці та реалізації будь-яких технологічних процесів з використанням потужного ультразвуку (УЗ) одне з найважливіших завдань полягає у виборі методу отримання механічних ультразвукових коливань заданої частоти, амплітуди та потужності. Від того, наскільки раціонально буде розв'язано це завдання, залежить технологічна ефективність і результат впровадження технології. До складу типової ультразвукової установки входить: ультразвуковий перетворювач з системою акустично-механічних елементів та джерело живлення — електронний генератор. Ультразвукові перетворювачі — це пристрої, що перетворюють електричну енергію в механічну. Коливання ультразвукового діапазону частот здатні генерувати переважно магнітострикційні та п'єзокерамічні перетворювачі. Останні знайшли широке застосування для генерації потужних ультразвукових коливань.

П'єзоелектричний перетворювач (ПЕП) створює ультразвукові коливання за допомогою п'єзокераміки, до якої прикладається зовнішня напруга змінного струму. Такі конструктивні елементи складаються з двох металевих накладок циліндричної форми (передньої та

задньої), між якими закріплені кільця п'єзокераміки з парною кількістю дисків, у зазначеному випадку 4-х (рис. 1, а). Основна резонансна частота таких дисків товщиною 6 мм дорівнює ~100 кГц. Металеві накладки забезпечують зниження робочої частоти до низької ультразвукової, яка для промислових установок дорівнює ~20—30 кГц. При розрахунках геометричних розмірів ПЕП беруться до уваги швидкість розповсюдження ультразвукових хвиль у матеріалах передньої та задньої накладок, в п'єзоелементах, щільність та маса останніх [7].

На основі теоретичних розрахунків відомих конструкцій [8] необхідно було створити універсальний ПЕП для ударного інструменту, що забезпечує мінімальне демпфування ультразвукової коливальної системи (УЗКС) за значних віброударних навантажень на вихідному кінці концентратора, якій підвищує амплітуду коливань. Відомі методики розрахунку УЗКС дозволяють отримати тільки приблизні параметри окремих конструктивних елементів. Крім того, використання емпіричних формул із залученням експериментальних результатів є трудомістким процесом та вимагає громіздких обчислень. Слід зазначити, що перевірити розрахункові значення можливо лише після виготовлення та складання коливальної системи з наступним вимірюванням її параметрів. Зазвичай, розробка й проектування УЗКС відбувається в кілька етапів:

- 1) попередній розрахунок за заданими параметрами (згідно з відомими методиками);
- 2) корегування геометричних розмірів складових ПЕП;
- 3) виготовлення деталей проекрованої конструкції та її складання;
- 4) вимірювання параметрів створеної УЗКС окремо, а також з робочим інструментом;
- 5) остаточний розрахунок із корегуванням параметрів з урахуванням результатів експериментальних досліджень;
- 6) доопрацювання створеної УЗКС і робочого інструменту для узгодження з основною резонансною частотою.

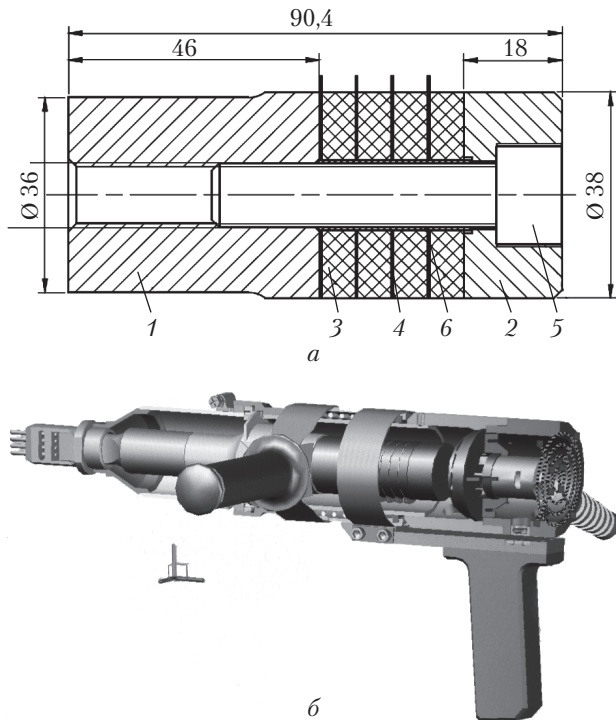


Рис. 1. Креслення п'єзоелектричного перетворювача на ~ 26 кГц (а) та складові ультразвукового ударного інструменту в форматі 3D (б): 1 – передня накладка Д16Т; 2 – задня накладка сталь 40Х13; 3 – п'єзокераміка АРС841 розміром $38 \times 16 \times 6$ мм; 4 – мідні електроди (4 шт.); 5 – стягуючий болт М12 \times 1,5; 6 – ізоляційна втулка

Під час виконання роботи було розроблено УЗКС за допомогою системи автоматизованого графічного проектування *AutoCAD* в 3D форматі з наступним аналізом у середовищі *ANSYS* [9]. Відповідно до запропонованої методики виготовлено ПЕП, який працює на частоті ~ 26 кГц (рис. 1, а). Його було доповнено й узгоджено з бустером і ступінчастим концентратором ультразвукових коливань для одержання необхідної амплітуди коливань. Згідно вимог технічного завдання перетворювач для ВМП виконано у закритому корпусі. При амплітуді коливань на робочому кінці концентратора 20–25 мкм, температура п'єзоелементів може перевищувати гранично допустиму $+80$ °С. Оскільки обладнання буде використовуватись в умовах навколишнього середовища при температурах від -10 до $+35$ °С і в заводських цехах протягом робочої зміни,

особливу увагу було приділено примусовому охолодженню пристрою впродовж регламентованої тривалості обробки залежно від амплітуди ультразвукових коливань і зовнішньої температури.

Перетворювач, за рахунок ударної взаємодії зі стрижневими елементами, які деформують поверхню металу, отримує механічні навантаження з частотами вібрацій від 40 до 1000 Гц та прискореннями 15–300 м/с². Для зменшення вібрацій корпусу, в якому розміщується перетворювач, було використано амортизатори й пружини з достатньою податливістю та значним демпфуванням. В якості пружних елементів використано силіконову гуму і пружинну сталь. Це значно знизило вібраційне навантаження на руки оператора. Останнє не перевищує допустимих величин, наведених у відповідних нормативних документах, що регламентують техніку безпеки при роботі з вібраційним інструментом.

Продуктивність та якість процесу ВМП, а також тепловий режим ультразвукового випромінювача та вузла ударного навантаження значною мірою залежать як від конструкції інструменту в цілому, так і від окремих його складових. При конструюванні інструменту застосовували новітні 3D технології. Загальний вигляд розробленого пристрою показано на рис. 1, б. Інструмент оснащено основною та боковою ручками для зручності роботи оператора. У задню частину корпусу вмонтовано потужний вентилятор для примусового повітряного охолодження всіх частин УЗКС. На протилежному кінці інструменту розміщено змінну ударну головку з високоміцними стрижневими бойками. Кількість ударних елементів в головці та їх діаметр залежать від типу зварного шва або від геометрії поверхні, що піддається обробці.

Впродовж попередніх науково-дослідних робіт нами було розроблено та запатентовано низку ультразвукових ударних інструментів, зокрема й [10]. В процесі виконання науково-технічного проекту НАН України в 2017 році

виготовлено макет ультразвукового обладнання, який проходив всебічні випробування на Крюківському вагонобудівному заводі (м. Кременчук) протягом 4-х місяців. За результатами випробувань складено Акт, в якому наведено виявлені недоліки та пропозиції спеціалістів заводу щодо вдосконалення конструкції приладу. Після цього було проведено роботи з вдосконалення ультразвукового генератора та створено новий ручний ударний інструмент з новими технічними рішеннями, що враховували недоліки макетного зразка.

Ультразвуковий цифровий генератор. Для живлення ПЕП використовується ультразвуковий електронний генератор, що забезпечує перетворення електричної енергії промислової мережі в енергію коливань ультразвукової частоти. Електронний генератор, ПЕП, а також приєднаний до нього ударний вузол і верхня деталі (конструкції), що піддається ультразвуковій обробці, повинні бути узгоджені між собою, оскільки вони впливають безпосередньо один на одного. У зв'язку з цим при проектуванні ультразвукового устаткування виникає необхідність забезпечення оптимального узгодження параметрів генератора й ПЕП при будь-яких змінах режиму обробки або зовнішніх впливів.

Зважаючи на недоліки, виявлені при експлуатації макету обладнання на ПАТ «КВБЗ», було поставлено завдання створення ультразвукового генератора (УЗГ) з новим програмним забезпеченням і принципово новою конструкцією корпусу, в якому електричні схеми були б надійно захищені від впливу навколишнього середовища.

В процесі виконання проекту виконано роботи:

1. Модернізовано схему УЗГ із цифровим фазовим автоматичним настроюванням частоти, яка виконана шляхом прямого цифрового синтезу з підвищеним діапазоном утримання резонансного режиму при дії різних дестабілізуючих чинників на п'єзокерамічний випромінювач, що забезпечує високий рівень стабіль-

ності та повторюваності технічних характеристик обладнання.

2. Розроблено повний комплект конструкторської документації — принципівих схем, друкованих плат та креслень усіх складових частин конструкції УЗГ.

3. Розроблено та виготовлено апаратно-програмний комплекс та методику налагодження УЗГ з ПЕП.

4. Створено нову конструкцію корпусу для мобільних варіантів УЗГ з повітряним охолодженням, що забезпечує довготривалу роботу в штатному режимі на відкритому повітрі та в умовах забруднення промисловим пилом.

Проведено лабораторні випробування виготовленого ультразвукового обладнання, які показали відповідність характеристикам, наведених в Технічному завданні. З керівництвом ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» досягнуто домовленості про подальші випробування вдосконаленого обладнання для ВМП деяких виробів підприємства з метою впровадження інноваційної технології у вагонобудівній галузі.

ВИЗНАЧЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ОБРОБКИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ МЕТОДОМ ВМП НА ОСНОВІ ВИМІРЮВАНЬ МІКРОТВЕРДОСТІ

Найбільшим прогресом у розвитку технології ВМП було встановлення того факту, що обробку зварного шва можна проводити тільки по лінії сплавлення його з основним металом однорядним багатобойковим інструментом. Це підтвердили численні втомні випробування на зразках, оброблених різними режимами в ІЕЗ ім. Е.О. Патона [1–3]. Водночас немає єдиної методології відносно того, з якою швидкістю та скільки часу необхідно обробляти певні ділянки швів із різних матеріалів. Завершення обробки зазвичай пов'язують з формуванням блискучої канавки, ширина якої дорівнює діаметру бойків (3–5 мм), а глибина становить 0,2–0,6 мм залежно від міцності матеріалу [4].

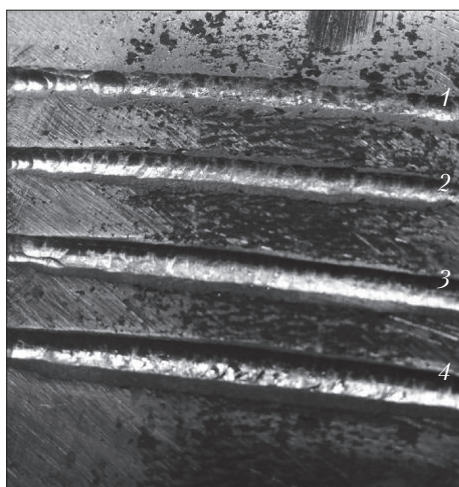


Рис. 2. Загальний вигляд зони проковування основного металу сталі 09Г2С після ВМП різної тривалості: 1 – 3 с; 2 – 6 с; 3 – 12 с; 4 – 30 с; швидкість виконання ВМП – 10, 5, 2,5 та 1,0 мм/с відповідно

Численні дослідження накопичення деформації впродовж ВМП показують, що структурні зміни в поверхневому шарі відбуваються за короткий проміжок часу в результаті високої частоти ударів. Це відображається на часовій залежності механічних властивостей, наприклад, мікротвердості. Зміни мікротвердості $H\mu$ від часу ВМП показують, що такі залежності мають практично однаковий характер для більшості конструкційних матеріалів [6]. Протягом перших секунд обробки мікротвердість швидко зростає до певної величини, а потім практично не змінюється або навіть знижується. Потрібно зазначити, що тривала обробка металів ударними методами спричиняє появу зайвого наклепу. Це, в свою чергу, призводить до помітного руйнування поверхневого шару (лущення) і погіршення механічних властивостей. Отже, існує оптимальний час обробки методом ВМП одиниці довжини або площі поверхні $\tau_{\text{опт}}$ для кожного матеріалу за постійних величин амплітуди коливань, частоти ударів, діаметру та маси бойка. Таким чином, вимірюючи твердість зварного шва до та після ВМП та пов'язуючи її з основними параметрами – рівнем залишкових напружень, усуненням концентраторів напружень і втом-

ною міцністю, можна створити в умовах виробництва прості інструментальні методи визначення якості та завершеності обробки.

Дослідження проводили на зразках основного металу листового прокату сталей 09Г2С і СтЗсп та на їх зварних з'єднаннях. Товщина листового прокату сталі 09Г2С становила 12 мм, а сталі СтЗсп – 16 мм. З основного металу сталей вирізали зразки розміром 30×40 мм. Мікротвердість основного металу та пластично деформованого ВМП шару сталей вимірювали приладом ПМТ-3М за навантаження 50 г (0,5 Н). Спочатку вимірювали мікротвердість на боковій поверхні прямокутних вихідних зразків. Встановлено, що вона істотно змінюється з віддаленням від поверхні вглиб гарячекатаного прокату. Так, мікротвердість поверхневого шару сталі 09Г2С (глибиною до 0,07 мм) складає $HV_{0,5} = 460\text{--}548$ МПа, але з віддаленням від поверхні (до 0,4 мм і більше) вона знижується до 243–278 МПа. Така ж закономірність спостерігається і для зразків сталі СтЗсп (таблиця). Суттєвий діапазон значень мікротвердості пояснюється неоднорідністю структури сталей.

Видно, що листовий прокат має досить високу поверхневу мікротвердість, яка суттєво знижується на глибині більше, ніж 0,4 мм від поверхні. Це потрібно враховувати при подальшій обробці зразків з листового прокату методом ВМП. Вибір режимів і встановлення продуктивності процесу ВМП сталевих зразків проводили спочатку на вихідних зразках. Обробку за технологією ВМП здійснювали новим обладнанням. Як ударний вузол ви-

Мікротвердість металу прокату сталей 09Г2С і СтЗсп на різній відстані від поверхні

Відстань від поверхні, мм	Значення мікротвердості $HV_{0,5}$, МПа	
	сталі 09Г2С	сталі СтЗсп
0,07	460–548	505–585
0,2	405–440	405–423
0,3	278–298	388–401
Понад 0,4	243–278	356–405

користували однорядну змінну насадку з чотирма бойками діаметром 3 мм. Зміцнення за технологією ВМП досліджуваного зразка проводили вздовж чотирьох ліній довжиною 30 мм (на відстані 5–7 мм одна від одної) протягом 3, 6, 12 та 30 с. Швидкість виконання ВМП дорівнювала 10, 5, 2,5 та 1,0 мм/с відповідно (рис. 2).

Встановлено, що після обробки основного металу сталі 09Г2С технологією ВМП з швидкістю виконання 10 мм/с мікротвердість поверхнево пластично деформованого шару металу ($HV_{0,5}$) складає 505–674 МПа, з швидкістю 5 мм/с – 298–356 МПа, при 2,5 мм/с – 332–356 МПа, а при 1,25 мм/с – 674–812 МПа. Аналогічний характер змін мікротвердості основного листового металу було отримано й для сталі СтЗсп. Аналіз результатів показує, що зі зменшенням швидкості мікротвердість спочатку знижується, а потім різко зростає при 1,0 мм/с. Такий немонотонний характер змін мікротвердості можна пояснити наступним чином. Спочатку, при високій швидкості, утворюється неглибока канавка (рис. 2, час обробки 3 с) і міцний поверхневий шар прокатаного металу практично не руйнується. Потім час обробки зростає, швидкість переміщення інструменту зменшується, утворюється більш глибока канавка, що свідчить про руйнування поверхневого шару товщиною до 0,2 мм (таблиця). Суттєве зростання мікротвердості спостерігається при швидкості виконання ВМП 1,0 мм/с вже за рахунок зміцнення поверхні сталі. Цю граничну швидкість можна прийняти за продуктивність обробки – P (мм/с) при заданих параметрах ВМП – амплітуді ультразвукових коливань, діаметрі та кількості стрижневих бойків, а також механічних властивостей матеріалу виробу. Вона пов'язана з часом обробки $\tau_{\text{обр}}$, який визначає певну оптимальну кількість ударів бойка на одиницю довжини деформованого матеріалу.

Дослідження залежності мікротвердості пластично деформованого методом ВМП шару металу зони проковування проводили та-

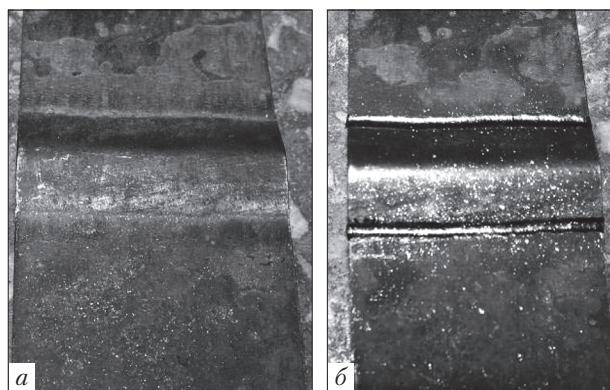


Рис. 3. Стиковий зварний шов сталі 09Г2С у вихідному стані після зварювання (а) та після ВМП (б)

кож на зразках стикового зварного з'єднання сталей 09Г2С та СтЗсп. На рис. 3 показано стиковий шов зразка сталі 09Г2С у вихідному стані (а) і після ВМП (б). Стикові зварні з'єднання сталей отримували двостороннім одно-дуговим автоматичним зварюванням пластин під флюсом ОР 192 (виробник Oerlikon, Швейцарія) дротом Св-08Г1НМА діаметром 4 мм. Режими зварювання пластин з сталі 09Г2С товщиною 12 мм: перший шов – напруга $U = 55$ В, струм $I = 650–700$ А, швидкість зварювання $V = 26,7$ м/г; другий шов (з протилежної сторони) – $U = 57$ В, $I = 760–780$ А, $V = 26,7$ м/г. Другий шов виконували після повного охолодження першого. Із зварної пластини розміром 600×350 мм вирізали зразок стикового зварного з'єднання сталі 09Г2С розміром 30×350 мм. Зміцнення зразка за технологією ВМП проводили вздовж чотирьох ліній сплавлення довжиною 30 мм протягом 3, 6, 12 та 30 с, відповідно швидкість виконання ВМП складала 10, 5, 2,5 та 1,0 мм/с.

Режими зварювання пластин із сталі СтЗсп товщиною 16 мм: перший шов – $U = 55$ В, $I = 850–900$ А, $V = 26,7$ м/г, другий шов (з протилежної сторони): $U = 56–57$ В, $I = 960–980$ А, $V = 26,7$ м/г. Другий шов виконували після повного охолодження першого. Із зварної пластини розміром 600×350 мм вирізали зразок стикового зварного з'єднання розміром 40×350 мм. Зміцнення за технологією ВМП

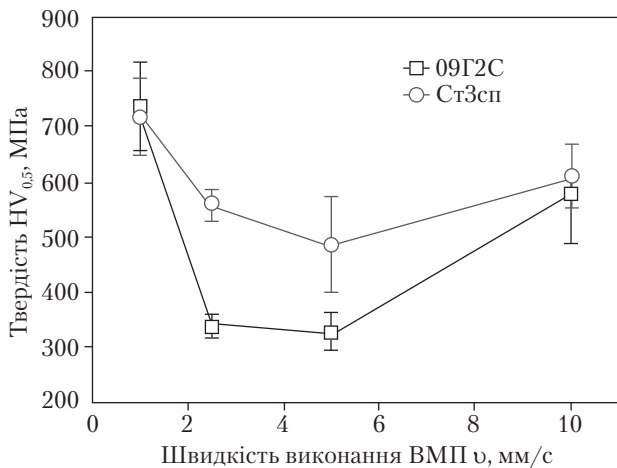


Рис. 4. Зміна мікротвердості пластично деформованого шару металу зони сплавлення зразків стикового зварного з'єднання сталей 09Г2С і СтЗсп залежно від швидкості виконання ВМП

досліджуваного зразка проводили вздовж чотирьох ліній сплавлення довжиною 40 мм протягом 4, 8, 16 та 40 с, швидкість виконання ВМП складала 10, 5, 2,5 та 1,0 мм/с відповідно.

Після обробки технологією ВМП підсилення шва з обох сторін утвореного з'єднання знімали механічним способом та шліфували до рівня основного металу. Це дало можливість проводити безпосередні вимірювання мікротвердості металу шва та пластично деформованого ВМП шару металу зони проковування зварного з'єднання. Значення мікротвердості металу шва після зняття підсилення в обох зварних з'єднаннях знаходилися на рівні $HV_{0.5} = 228\text{--}268$ МПа. Отримані залежності мікротвердості пластично деформованого ВМП шару металу зони проковування зразків стикового зварного з'єднання сталей 09Г2С та СтЗсп від швидкості виконання ВМП наведено на рис. 4. Вони практично не відрізняються від встановлених залежностей на основному металі листового прокату. Тому вибір параметрів зміцнення технологією ВМП зварних з'єднань доцільно проводити на відповідних зразках основного металу.

Основною метою попередніх вимірювань мікротвердості є встановлення продуктивності обробки P (мм/с), яка має розмірність швид-

кості обробки. За умов швидкості виконання ВМП 1,0 мм/с мікротвердість шару металу зони проковування на 50 % перевищує значення мікротвердості вихідного шару металу листового прокату сталі 09Г2С і на 40 % листового прокату сталі СтЗсп. Максимальні значення мікротвердості на поверхні в зоні зміцнення відповідають максимальній глибині пластично деформованого за допомогою ВМП шару [2]. Отже, за критерій оцінки продуктивності P , тобто граничної швидкості обробки зварних з'єднань технологією ВМП, може прийматися досягнення максимальних значень мікротвердості металу в зоні проковування. Встановлення оптимальної продуктивності обробки елементів зварних конструкцій технологією ВМП рекомендовано виконувати за критерієм досягнення значення мікротвердості металу в зоні проковування, який перевищує відповідні вихідні значення мікротвердості поверхневого шару металу після прокатки. Широкий спектр компактних і мобільних мікротвердомірів дозволяє здійснювати вимірювання мікротвердості деформованого шару металу в будь-яких просторових положеннях на реальних зварних металоконструкціях.

Оптимальна продуктивність обробки призводить до формування максимального по глибині деформованого шару металу й значних залишкових напружень стиснення, які сприяють граничному підвищенню втомної міцності. Треба наголосити, що знижувати продуктивність можна до певної межі, бо вона пов'язана з часом обробки, а оптимальна тривалість, в свою чергу, визначається насиченням значень мікротвердості або стискуючих напружень. Тобто, якщо й далі знижувати продуктивність, то це призведе до надмірного підвищення часу обробки, до появи перенаклепу, луцення поверхневого шару та зниження опору втомі.

Величина P є основою для розрахунку загального часу обробки T ділянки шва довжиною L :

$$T = L/P. \quad (1)$$

Наприклад, зварний шов сталі 09Г2С довжиною 100 мм потрібно обробляти впродовж 1 хв 40 с. При ручному способі оператор вимірює довжину шва та задає таймером на передній панелі УЗГ потрібний час обробки. По її завершенні ультразвукові коливання автоматично відключаються. Але постає основне питання, з якою швидкістю V оператор повинен переміщувати інструмент вздовж шва? Численні експериментальні дослідження показали, що швидкість обробки V знаходиться у межах 10–35 мм/с [11]. Але деякі автори наводять і значно вищі величини швидкості переміщення інструменту — до 60 мм/с [12]. Не зважаючи на розбіжності у визначенні швидкості переміщення інструменту при ВМП різними дослідниками, головним параметром є час обробки — T , впродовж якого деформуючі елементи (бойки) спричиняють задану кількість ударів на одиницю довжини шва або одиницю площі поверхні виробу. При частоті ультразвукових коливань $F = 18\text{--}26$ кГц середня частота ударів стрижневих бойків становить $f_{yd} \sim 1,0\text{--}3$ кГц. Тобто, за час обробки T загальна кількість ударів складатиме

$$N_{\text{заг}} = f_{yd} T. \quad (2)$$

При цьому обробка повинна бути відносно рівномірною та здійснюватися зворотно-ступальними проходками від початку до кінця ділянки, що підлягає обробці.

Таким чином, необхідно відрізнити продуктивність обробки P (мм/с) методом ВМП від швидкості оброблення V (мм/с) оператором певної ділянки шва довжиною L (мм). Зазвичай обробка виконується за декілька проходів вздовж шва, але загальний час обробки T (с) розраховується за виразом (1). При цьому оператор може робити технологічні зупинки й відлік часу на таймері УЗГ припиняється та поновлюється з початком нового циклу обробки.

ВИЗНАЧЕННЯ ЯКОСТІ ОБРОБКИ МЕТОДОМ ВМП

Вище було надано практичні рекомендації щодо визначення тривалості та завершеності

процесу ВМП інструментальними методами. Заключним етапом цього процесу є оцінка якості обробки за допомогою технології, яка здійснюється переважно візуально та детально описана в [13], де підсумовано значну кількість робіт, виконаних різними дослідниками та надрукованих в Документах МІЗ. Оцінку якості канавки здійснюють, як правило, візуальним оглядом після обробки за рекомендацією ХІІІ-ї Комісії Міжнародного інституту зварювання. Отримана після ВМП канавка повинна бути гладкою вздовж усіх визначених зварних швів. У канавці не повинно бути видимих дефектів зварювання. Для оцінки якості канавки корисно використовувати пенетрант або застосовувати огляд канавки за допомогою лупи зі збільшенням від $\times 3$ до $\times 10$. Якщо буде виявлено дефекти у вигляді темних стрічок або пористості, то для отримання гладкої поверхні потрібно виконати додаткові проходи інструменту у цих місцях. Канавка після ВМП повинна бути безперервною, без розривів. Якщо обробка не може бути виконана без перерв, наприклад, з довгими зварними швами або навколо кутів, рекомендується перезапустити її, відступивши принаймні на 10 мм назад від положення зупинки.

Метод ВМП за короткий час призводить до значної локальної деформації матеріалу в області лінії зварювання. Якщо стрижневий ударник спрямовано під малим кутом в одному конкретному місці, то в результаті пластичного зсуву металу може утворитися наплив збоку канавки. Дефекти такого типу потрібно вилучити шляхом легкого шліфування, а канавка повинна бути додатково оброблена. Такі додаткові прийоми покращення якості канавки призводять до суттєвого підвищення втомної міцності. На рис. 5 наведено результати втомних випробувань плоских зразків сталі Ст3 з чотирма зварними швами, утвореними приварюванням поперечних пластин. Циклічне навантаження зразків при коефіцієнті асиметрії циклу $R = 0$ виконували на машині УРС-20 з частотою 12 Гц. З графіку

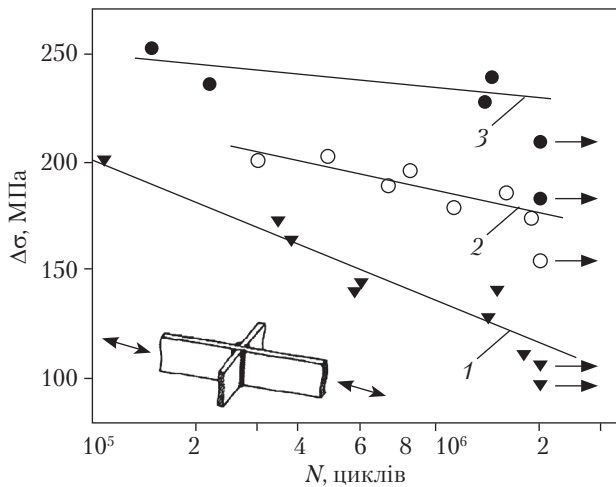


Рис. 5. Результати втомних випробувань зварних зразків сталі СтЗсп шириною 50 мм у координатах «максимальне напруження циклу зовнішнього змінного навантаження $\Delta\sigma$ — кількість циклів до руйнування N »: 1 — після зварювання; 2 — після обробки чотирьох швів по лінії сплавлення ультразвуковим інструментом (час обробки одного шва — 1 хв, бойки 4 шт. $\varnothing 3$ мм, швидкість обробки — $V=10$ мм/с); 3 — додаткова обробка одним бойком $\varnothing 4$ мм ділянок канавки з виявленими дефектами

видно, що первинна обробка перехідних зон швів, прилеглих до зразку, по 1 хв ударною голівкою з чотирма ударниками $\varnothing 3$ мм призводить до зростання втомної міцності від 110 до 180 МПа. Після такої обробки на поверхні канавок було виявлено окремі темні смужки довжиною 1–2 мм. Для їх усунення було проведено додаткову обробку виявлених дефектів голівкою з одним ударником $\varnothing 4$ мм тривалістю 3–5 с. Випробування цих зразків показали додаткове зростання втомної міцності до 210 МПа.

Підготовка зварного шва. Зварне посилення і суміжний основний матеріал повинні бути повністю очищені та піддані незначній механічній обробці металевими щітками або шліфуванню, щоб видалити всі сліди окалини, бризок та інших сторонніх об'єктів. Обробка ВМП з опуклим профілем зварного шва, або зварного шва з великим кутом зварювання, може призвести до того, що пластично деформований метал зігнеться поверх початкового

зварного шва і залишить тріщиноподібний дефект у канавці. Профіль зварного шва перед обробкою повинен відповідати граничним значенням для рівня якості *B* згідно з ISO 5817 [13]. До дефектів шва належать підрізи, надмірна переповненість, перекриття тощо. Якщо профіль зварного шва не відповідає цим критеріям якості, може знадобитися незначна механічна обробка перед ВМП. Слід зазначити, що процедура ВМП є найнефективнішою у разі обробки виключно області (лінії) зварного шва між розплавленим і основним металом. Таким чином, варто уникати операцій шліфування, які ускладнюють роботу оператора щодо визначення точного місця розташування зварного шва. Рішення про необхідність механічної обробки швів перед ВМП повинно узгоджуватися з досвідченим оператором.

Необхідність в належному профілі зварювання перед ВМП обумовлена можливим утворенням тріщиноподібного дефекту через неправильний контакт між ударником і зварним швом. Візуальний контроль такого дефекту показує темну лінію, що нагадує витягнуту тріщину, яка знаходиться в середині гладенької канавки після обробки. Кінцеві втомні характеристики зварного з'єднання з такими дефектами можуть бути навіть нижчими, ніж у шва після зварювання. Такий же дефект спостерігався у зварних швах і з адекватними профілями, але з неправильним вибором діаметру стрижневого ударника або занадто жорсткою обробкою, тобто з наявністю надмірної кількості проходів по одній і тій же ділянці [14]. Останнє підтверджує основний результат виконаної роботи, що час обробки T потрібно визначати, спираючись на визначення продуктивності P певного матеріалу при заданих параметрах ударного навантаження.

Техніка безпеки (ТБ). Шум і вібрація від ВМП, як показує досвід, є значно нижчими, ніж для традиційного пневмодинамічного обладнання. У той же час, процедура ВМП, залежно від товщини й габаритів конструкції, може бути досить шумною операцією, тому

важливо, щоб оператор та інші люди, що працюють поблизу, використовували навушники. Захисний одяг для роботи в цеху не вимагає спеціальних умов, але при цьому екіпіровка оператора повинна містити встановлений ТБ захист очей. Вібрація, яка передається на руки оператора від інструменту під час ВМП, зазвичай досить низька, тому робота дозволена під час 8-годинної робочої зміни в легких бавовняних рукавицях. Якщо вібрація конкретного інструменту для ВМП не визначена спеціальними випробуваннями, може знадобитися обмеження робочого часу загальної обробки [13].

Кількісні вимірювання розмірів канавки.

Глибина канавки є відмінним показником ступеня обробки методом ВМП. Залежно від межі текучості сталі та розміру бійка оптимальна глибина канавки після ВМП зазвичай становитиме 0,2–0,6 мм, а ширина 3–6 мм. Однак, оптимальний розмір канавки залежить від міцності сталі. Зокрема, канавки у високоміцних сталевих конструкціях, як правило, будуть меншими за глибиною та вужчими, ніж канавки в низьколегованих сталях. Глибина канавки може бути перевірена відносно легко з використанням простих глибинних датчиків. Центр канавки повинен відповідати лінії зварювання зварного шва [13].

Для обробки методом ВМП існує технологічна специфікація, яка рекомендована ХІІІ-ю комісією МІЗ. В роботі [15] наведено відповідну специфікацію HFMI-PS, яку готують для кожного зварного шва в конструкції. HFMI-PS містить інформацію про оброблюваний елемент конструкції, базовий і зварювальний матеріал, тип обладнання та параметри джерела живлення, кількість, розмір, форму використовуваних бійків, спеціальні вимоги до технічного контролю та інші відомості. Специфікацію розробляють відповідні технологічні служби підприємств спільно з виробниками обладнання для кожного зварного шва в конструкціях як документальний засіб забезпечення якості обробки.

Таким чином, результатом виконаного дослідження є розробка нового перетворювача на п'єзокерамічних кільцях діаметром 38 мм і товщиною 6 мм та створено методику розрахунків окремих його складових і ультразвукової коливальної системи загалом. Вдосконалено узгодження акустичного й електричного трактів, тобто перетворювача й ультразвукового генератора за рахунок застосування останніх досягнень в електроніці, з використанням мікропроцесорів і цифрового керування усіма процесами генерації коливальних ультразвукової частоти.

Встановлено, що основним параметром для автоматичного підтримання стабільної роботи УЗКС при дії різноманітних зовнішніх впливів є значення фази, визначене на резонансній або на антирезонансній частоті. Для підтримки заданої амплітуди механічних коливальних УЗКС в УЗГ задіяно стабілізацію напруги в режимі паралельного резонансу.

Дослідження впливу швидкості виконання ВМП на характеристики мікротвердості металу зони проковування сталей 09Г2С та СтЗсп з метою визначення продуктивності процесу обробки показало, що оцінку продуктивності обробки P зварних з'єднань технологією ВМП можна здійснювати за величинами мікротвердості металу в зоні обробки, які перевищують відповідні значення мікротвердості поверхневого шару металу після прокатки листових напівфабрикатів.

Наведено практичні рекомендації з виконання ВМП ручним ударним інструментом та встановлено продуктивність P для ВМП зварних з'єднань сталей 09Г2С і СтЗсп, яка дорівнює $\sim 1,0$ мм/с. За значенням продуктивності можна розрахувати час обробки T певної ділянки шва довжиною L для досягнення максимальної мікротвердості деформованої поверхні. Рекомендованою швидкістю переміщення ударного інструменту вздовж шва є ~ 10 – 35 мм/с. Варіювання цієї величини в межах встановленого оптимального діапазону зумовлено специфікою «ручного» способу реалізації проце-

су ВМП, що не впливає істотно на стабільність параметрів зміцнення та якості поверхневого шару. Обробку області (лінії) зварного шва між розплавленим і основним металом довжиною L здійснюють рівномірними зворотно-поступальними рухами в межах заданого часу T . Оцінка якості обробки зварних швів техноло-

гією ВМП здійснюють візуальними й інструментальними методами, які рекомендовані відповідним Документом Міжнародного інституту зварювання. Запропоновано специфікацію HFMI-PS, яку розробляють для кожного зварного шва в різноманітних виробках і конструкціях.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лобанов Л.М., Кирьян В.И., Кныш В.В., Прокопенко Г.И. Повышение сопротивления усталости сварных соединений металлоконструкций высокочастотной механической проковкой. *Автоматическая сварка*. 2006. № 9. С. 3–11.
2. Кныш В.В., Соловей С.А., Богайчук И.Л. Оптимизация процесса упрочнения сварных соединений стали 09G2С высокочастотной механической проковкой. *Автоматическая сварка*. 2011. № 5. С. 26–31.
3. Прокопенко Г.І., Книш В.В., Соловей С.О. Подовження залишкового ресурсу зварних з'єднань сталей СтЗсп і 09Г2С високочастотним механічним проковуванням. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. 2011. Спецвипуск, частина 2. С. 35–41.
4. Lefebvre F., Peyrac C., Elbel G., Revilla-Gomez C., Verdu C., Buffiere J. HFMI: understanding the mechanisms for fatigue life improvement and repair of welded structures. *Welding in the World*. 2017. V. 61, no. 4. P. 789–799.
5. Прокопенко Г.И., Недосека А.Я., Грузд А.А., Красовский Т.А. Разработка и оптимизация оборудования и процесса ультразвуковой ударной обработки сварных соединений с целью снижения остаточных напряжений. *Технич. диагн. и неразр. контр.* 1995. № 3. С. 14–22.
6. *Патент України № 108188*. Прокопенко Г.І., Мордюк Б.М., Високолян М.В., Волочай В.В., Попова Т.В. Спосіб ультразвукової ударної обробки зварних з'єднань металокопструкцій.
7. Prokić M. *Piezoelectric Transducers – Modeling and Characterization*. Switzerland: MPI, 2004. 266 p.
8. Киселев М.Г., Савицкий С.С. Исследование режимов работы технологической акустической системы с подвижным инструментом. *Приборостроение*. 1989. № 11. С. 41–46.
9. Дьяконов В.П., Пеньков А.А. Расчет регулировочной характеристики транзисторных преобразователей напряжения с резонансным контуром в системе МСАД. *Электротехника*. 1999. № 4. С. 54–59.
10. *Патент України № 94051*. Прокопенко Г.І., Красовський Т.А., Черепін В.Т., Мордюк Б.М. Ультразвуковий ручний інструмент для деформаційного зміцнення і релаксаційної обробки металів.
11. Вагапов И.К., Ганиев М.М., Шинкарев А.С. Теоретическое и экспериментальное исследование динамики ультразвуковой виброударной системы с промежуточным бойком. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2008. № 5. С. 3–24.
12. Дегтярев В.А. Оценка влияния режимов высокочастотной механической проковки сварных соединений на их сопротивление усталости. *Проблемы прочности*. 2011. № 2. С. 61–70.
13. Marquis G., Barsoum Z. Fatigue strength improvement of steel structures by high-frequency mechanical impact: proposed procedures and quality assurance guidelines. *Welding in the World*. 2013. V. 57. P. 803–822.
14. Roy S., Fisher J.W. Enhancing fatigue strength by ultrasonic impact treatment. *Int. J. Steel Struct.* 2005. V. 5. P. 241–252.
15. Lopez Martinez L., Haagensen P.J. Life extension of Class F and Class F2 details using ultrasonic peening. *IIV Document XIII-2143-06*.

Стаття надійшла до редакції 21.05.18

REFERENCES

1. Lobanov, L. M., Kiryan, V. I., Knysh, V. V., Prokopenko, G. I. (2006). Increased fatigue resistance of welded joints of metal structures by high-frequency mechanical forging. *Automatic welding*, 9, 3–11 [in Russian].
2. Knysh, V. V., Solovey, S. A., Bogaychuk, I. L. (2011). Optimization of the hardening process of 09G2S steel welded joints by high-frequency mechanical forging. *Automatic welding*, 5, 26–31 [in Russian].
3. Prokopenko, G. I., Knysh, V. V., Solovey, S. O. (2011). Extension of residual resource of the welded joints of St3sp and 09G2S steels by high-frequency mechanical forging. *Bulletin of the Ternopil National Technical University*. Spec. issue, part 2, 35–41 [in Ukrainian].

4. Lefebvre, F., Peyrac, C., Elbel, G., Revilla-Gomez, C., Verdu, C., Buffiere, J. (2017). HFMI: understanding the mechanisms for fatigue life improvement and repair of welded structures. *Welding in the World*, 61(4), 789–799.
5. Prokopenko, G. I., Nedoseka, A. Ya., Gruzd, A. A., Krasovsky, T. A. (1995). Development and optimization of equipment and process of ultrasonic impact treatment of welded joints in order to reduce residual stresses. *Technician Diagnostics and Nondestruction Control*, 3, 14–22 [in Russian].
6. Patent of Ukraine N 108188. Prokopenko G. I., Mordiyuk B. N., Vysokolyan M. V., Volochai V. V., Popova T. V. Method of ultrasonic impact treatment of welded joints of metallic structures [in Ukrainian].
7. Prokič, M. (2004). *Piezoelectric Transducers Modeling and Characterization*. Switzerland. 266 p.
8. Kiselev, M. G., Savitsky, S. C. (1989). Investigation of operating modes of a technological acoustic system with a movable tool. *Priborostroenie*, 11, 41–46 [in Russian].
9. Dyakonov, V. P., Penkov, A. A. (1999). Calculation of the control characteristic of transistor voltage transducers with resonant circuit in the MCAD system. *Electrical engineering*, 4, 54–59 [in Russian].
10. Patent of Ukraine N 94051. Prokopenko G. I., Krasovsky T. A., Cherepin V. T., Mordiyuk B. M. Ultrasonic hand tool for deformation strengthening and relaxation treatment of metals [in Ukrainian].
11. Vagapov, I. K., Ganiyev, M. M., Shinkarev, A. S. (2008). Theoretical and experimental research of dynamics of an ultrasonic vibro-impact system with intermediate pin. *Proc. of Higher Educational Schools. Mech. Eng.*, 5, 3–24 [in Russian].
12. Degtyarev, V. A. (2011). Estimation of influence of modes of high-frequency mechanical welding of welded joints on their resistance to fatigue. *Strength of Mater.*, 2, 61–70 [in Russian].
13. Marquis, G., Barsoum, Z. (2013). Fatigue strengthening of steel structures by high-frequency mechanical impact: proposed procedures and quality assurance guidelines. *Welding in the World*, 57, 803–822.
14. Roy, S., Fisher, J. W. (2005). Enhancing fatigue strength by ultrasonic impact treatment. *Int. J. Steel Struct.*, 5, 241–252.
15. Lopez Martinez, L., Haagensen, P. J. Life extension of Class F and Class F2 details using ultrasonic peening. *IIV Document XIII-2143-06*.

Received 21.05.18

Prokopenko, G.I.¹, Mordiyuk, B.M.¹,
Krasovskii, T.A.², Knish, V.V.³, and Solovey, S.O.³

¹ Kurdyumov Institute for Metal Physics of the NAS of Ukraine,
36, acad. Vernadski Boulevard, Kyiv, 03142, Ukraine,
+380 44 424 1005, +380 44 424 2561, metall@imp.kiev.ua

² Kyiv Academic University of the NAS and MES of Ukraine,
36, acad. Vernadski Boulevard, Kyiv, 03142, Ukraine,
+380 44 424 8250, +380 44 424 8250, taraskras@gmail.com

³ Paton Institute of Electric Welding of the NAS of Ukraine,
11, Kazimir Malevich St., Kyiv, 03150, Ukraine,
+380 44 200 4779, +380 44 528 0486, office@paton.kiev.ua

CREATION OF INDUSTRIAL EQUIPMENT FOR HIGH FREQUENCY MECHANICAL IMPACT ON RAILWAY CAR BUILDING PRODUCTS AND METHODS FOR ASSESSING THE QUALITY OF TREATMENT

Introduction. The technology of high-frequency mechanical impact (HFMI) has proved itself to be a reliable, efficient, and convenient method for increasing the fatigue strength of welded structures, which is one of the most priority tasks of the machine-building industry.

Problem Statement. The experience of operating the HFMI equipment and technology has shown that there are many problems associated with the determination of the process quality and completeness. The creation of ultrasonic equipment for HFMI with electromechanical piezo-ceramic transducers was initiated at the Kurdyumov Institute for Metal Physics of the NAS of Ukraine. Over the years, this equipment has been used both for scholarly research and for processing of various products and structures. However, neither the HFMI equipment and nor HFMI technology has been commercialized so far.

Purpose. To create a new ultrasound equipment having a high reliability and a significant operation resource suitable for the use in the operating conditions and to develop tools for evaluating the HFMI process quality regarding welded joints of certain parts and railway-car building products.

Materials and Methods. Low-alloy structural steels St3cp and 09G2S. Hardness / microhardness measurements and optical microscopy.

Results. A mock-up of ultrasonic equipment has been made. It has passed comprehensive industrial tests at Kriukov Railway Car Building Works, Public Joint-Stock Company ("KRCBW" PJSC), Kremenchuk, Ukraine. Some deficiencies of the equipment identified during the tests have been eliminated in a new model of the equipment. A method for determining the HFMI process productivity and the duration of treatment of welded joints has been suggested. It is based on simple microhardness measurements. The quality and completeness of the treatment has been additionally checked by visual inspection of a groove formed by impact elements.

Conclusions. A new ultrasound equipment has been manufactured, and technological recommendations on choosing treatment regimes for railway carriage trolleys and other products of KRCBW PJSC have been proposed.

Keywords: high-frequency mechanical impact, metal fatigue, welded joints, microhardness, ultrasonic equipment, and quality and duration of treatment.

Г.І. Прокопенко¹, Б.М. Мордюк¹,
Т.А. Красовський², В.В. Книш³, С.А. Соловей³

¹ Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины,
ул. акад. Вернадского, 36, Киев, 03142, Украина,
+380 44 424 1005, +380 44 424 2561, metall@imp.kiev.ua

² Киевский академический университет НАН и МОН Украины,
ул. акад. Вернадского, 36, Киев, 03142, Украина,
+380 44 424 8250, +380 44 424 8250, taraskras@gmail.com

³ Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины,
ул. Казимира Малевича, 11, Киев, 03150, Украина,
+380 44 200 4779, +380 44 528 0486, office@paton.kiev.ua

СОЗДАНИЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОКОВКИ ИЗДЕЛИЙ ВАГОНОСТРОЕНИЯ И МЕТОДОВ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ

Введение. Технология высокочастотной механической проковки (ВМП) зарекомендовала себя как надежный, эффективный и удобный метод для повышения усталостной прочности сварных конструкций, что является одной из актуальных задач машиностроительной отрасли.

Проблематика. Опыт эксплуатации оборудования и технологии ВМП, показал, что существует множество проблем, связанных с определением качества и завершенности процесса обработки. В Институте металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины были начаты работы по созданию ультразвукового оборудования для ВМП с электромеханическими преобразователями на пьезокерамике. На протяжении многих лет это оборудование применялось как для научных исследований, так и для обработки различных изделий и конструкций. Однако серийного выпуска оборудования и широкого внедрения технологии ВМП в промышленность не произошло.

Цель. Создание нового ультразвукового надежного оборудования со значительным рабочим ресурсом, пригодного для использования в условиях производства, и разработка инструментальных методов оценки качества обработки методом ВМП сварных соединений определенных деталей и изделий вагоностроительной отрасли.

Материалы и методы. Низколегированные конструкционные стали СтЗсп и 09Г2С; методы измерения твердости и микротвердости; оптическая микроскопия.

Результаты. Изготовлен макет ультразвукового оборудования, который прошел всесторонние испытания на ПАО «Крюковский вагоностроительный завод» (Кременчуг, Украина). Выявленные в процессе испытаний недостатки были устранены в новой модели оборудования. Предложена методика определения производительности и продолжительности обработки сварных соединений методом измерений микротвердости. Качество и завершенность обработки дополнительно определяется визуальным осмотром канавки, которая образуется под действием ударных элементов.

Выводы. Изготовлено новое ультразвуковое оборудование и представлены технологические рекомендации по выбору режимов обработки тележек железнодорожных вагонов и других изделий ПАО «КВСЗ».

Ключевые слова: высокочастотная механическая проковка, усталость металла, сварное соединение, микротвердость, ультразвуковое оборудование, качество и продолжительность обработки.