

**В.І. Приходько¹, М.В. Високолян¹, В.В. Волочай¹, Г.І. Прокопенко²,
Б.М. Мордюк², В.Т. Черепін³, Т.А. Красовський³, Т.В. Попова⁴**

¹ ПАТ «Крюковський вагонобудівний завод», Кременчук

² Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, Київ

³ Фізико-технічний науково-навчальний центр НАН України, Київ

⁴ ДП «Український НДІ вагонобудування», Кременчук

СТВОРЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗМІЦНЕННЯ ТА РЕЛАКСАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ У ВАГОНОБУДУВАННІ



Розроблена нова модифікація портативного ультразвукового обладнання потужністю 0,8 кВт з цифровим керуванням для зміцнення та релаксаційної обробки поверхні металевих виробів. Виготовлена партія таких приладів, підготовлена конструкторська документація на ультразвуковий генератор та ударний інструмент з п'єзокерамічним перетворювачем. Здійснена підготовка технології ультразвукової ударної обробки зварних конструкцій, проведені порівняльні випробування впливу різних типів обробки і застосованих матеріалів на втомну довговічність. Випробування показали доцільність використання ультразвукової ударної обробки для подовження строку експлуатації виробів.

Ключові слова: ультразвукова ударна обробка, зварні конструкції, втомна довговічність, залишкові напруження, концентратори напружень.

Відомо, що міцність зварного з'єднання незначна внаслідок погіршення структури при розплавленні металу, появі концентраторів напружень та при виникненні розтягуючих напружень в зоні шва. Якщо вони складаються із зовнішніми циклічними напруженнями, настає передчасне втомне руйнування в зоні з'єднання, що іноді призводить до катастрофічних наслідків. Напруження розтягу можна знизити нагріванням деталей, але це складно для великих конструкцій, тому в такому випадку застосовують локальні методи обробки зварних з'єднань. Дослідження, проведені в Інституті електрозварювання (ІЕЗ) ім. Є.О. Патона, показали, що ультразвукова ударна обробка (УЗУО) при-

водить до найбільш суттєвого підвищення втомної міцності зразків і елементів конструкцій у порівнянні з іншими методами обробки [1–3].

На сьогодні існує багато способів зміцнення поверхонь деталей і елементів конструкцій — від нанесення спеціальних покриттів і поверхневого легування до інтенсивної деформації поверхні. Останні способи класифіковані під назвою «*поверхнева пластична деформація*» (ППД) [4, 5]. Методи ППД дуже різноманітні, але все частіше в них використовують енергію ультразвукових коливань [1]. Потужний ультразвук належить до інтенсивних методів ППД і призводить до суттєвих змін структурного і фазового складу металів та сплавів. Зварювання листових конструкцій часто змінює їх геометрію через залишкові напруження. Ультразвукова обробка сприяє зменшенню цих напружень внаслідок релаксації або їх перерозподі-

лу за рахунок створення стискуючих напружень у поверхневих шарах. Це теж один з прикладів застосування даної технології для усунення відхилень від заданих розмірів у тонколистових зварних конструкціях.

Українськими вченими була розроблена технологія УЗУО зварних з'єднань відповідальних конструкцій, працюючих в умовах знакозмінного навантаження, яка значно підвищувала втомну міцність і довговічність виробів [6, 7]. Іноді замість УЗУО вживають термін «*високочастотна механічна проковка*» (ВМП), а в світовій практиці вона відома як *Ultrasonic Impact Treatment* (UIT). Ця технологія використовується в таких галузях, як мостобудування і суднобудування, гірничовидобувна і нафтовидобувна промисловість та в інших секторах промисловості. В Україні технологія УЗУО використовується дуже обмежено. Зареєстровані лише поодинокі випадки обробки зварних швів при ремонті 10 000-тонного пресу на трубному заводі у Дніпропетровську у 2001 р. та деяких мостів у Києві і Полтаві. Це пояснюється тим, що в Україні відсутнє високоякісне ультразвукове обладнання для УЗУО металевих конструкцій і виробів. Оскільки якість і ресурс відповідальних конструкцій завжди мають велике значення, то розробка нового обладнання і впровадження ультразвукових технологій є актуальною задачею, яка відповідає інноваційному напрямку розвитку промисловості України в плані ресурсозбереження.

Останнім часом науковці всього світу все більше зосереджують свою увагу на високочастотних ударних методах обробки поверхні металевих матеріалів тому, що при такому навантаженні в тонких поверхневих шарах виникає нанокристалічна структура. Вона має унікальні фізико-механічні властивості, що відкриває подальші перспективи розвитку ультразвукових технологій в напрямку модифікації та інженерії поверхні.

В Україні створено спосіб УЗУО металів та сплавів для підвищення їх механічних властивостей, який став основою для технологій зміц-

нення і перерозподілу залишкових напружень [8]. Були також виготовлені дослідні зразки відповідної апаратури [7]. Наразі постала задача розробки і виготовлення сучасного ультразвукового обладнання для УЗУО—ВМП, його сертифікації, включення цього методу до нормативних документів і стандартів і взагалі для широкого впровадження у промисловість України.

Мета даної роботи — розробка нового ультразвукового обладнання з урахуванням новітніх досягнень в галузі електроніки та цифрових технологій. В результаті виконання інноваційного проекту була виготовлена партія нового ультразвукового обладнання на частоті 22,5 кГц, підготовлена конструкторська документація на ультразвуковий генератор і ударний інструмент.

У рамках Договорів про науково-технічне співробітництво між Інститутом металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод і ТОВ «Інструментальний завод» (м. Кременчук) на цих підприємствах були проведені комплексні випробування натурних зразків елементів конструкцій на втому, оброблених за традиційною (відпал для зняття залишкових напружень після зварювання) та ультразвуковою технологіями. Випробування показали доцільність використання останньої в практиці виготовлення зварних конструкцій рухомого складу залізничного транспорту. Ультразвукова технологія була рекомендована до впровадження у промисловість.

Багаторічний досвід експлуатації зварних конструкцій вагонів, що працюють в умовах динамічних навантажень, показує, що зони зварних з'єднань є найуразливішими місцями таких конструкцій. У Міжнародному інституті зварювання (МІЗ) було виконано ретельне узагальнення численних досліджень по опору різних зварних з'єднань втомним руйнуванням. Розроблені в МІЗ рекомендації, на жаль, не враховані у діючих нормах щодо проектування та виготовлення продукції вагонобудування, що нерідко призводить до невдалих проектів. Розроб-

лений на цей час у ВНДІ залізничного транспорту (Москва, РФ) проект стандарту на проектування і виготовлення сталевих конструкцій вагонів, який замінить ОСТ 24.050.34-84, найбільш повно відображає рекомендації МІЗ. Тому наразі найважливішим моментом при проектуванні зварних конструкцій є використання цих рекомендацій з метою створення виробів вагонобудування з високими показниками опору статичним і втомним руйнуванням та значним ресурсом.

В Україні існують усі передумови і можливості для більш широкого впровадження технологій УЗУО в практику машинобудування і будівництва відповідальних споруд. Методи і апаратура для УЗУО захищені багатьма авторськими свідоцтвами СРСР, патентами України, міжнародними заявками по процедурі РСТ (Patent Cooperation Treaty) і патентом США [9–13]. На протязі багатьох років в інститутах металофізики ім. Г.В. Курдюмова та електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України проведено великий обсяг фундаментальних і прикладних досліджень стосовно структурно-фазових перетворень при дії потужного ультразвуку й впливу УЗУО на фізико-механічні властивості металів та сплавів [14–16]. Детально вивчені фактори, які впливають на втомні властивості конструкційних матеріалів, зокрема зварних з'єднань [17–19]. Тому можна констатувати, що українськими вченими створені наукові основи даної технології, яка повинна зайняти відповідне місце у вітчизняній промисловості та бути конкурентноздатною на світовому ринку.

РОЗРОБКА ІНСТРУМЕНТА ДЛЯ УЗУО МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ

Багаторічний досвід застосування ультразвукової обробки металів для зміцнення їх поверхні дозволяє сформулювати основні вимоги до ультразвукового випромінювача і до ударного інструмента в цілому. Одним з найбільш ефективних способів енергетичного впливу на властивості металів, сплавів, зварних з'єднань є використання віброударних процесів оброб-

ки поверхонь. При цьому частота ударів може змінюватися від одиниць герц до десятків кілогерц. Таке устаткування різниться певними фізичними ефектами, що лежать в основі дії ударного навантаження з певною частотою. Можна виділити устаткування з пневматичними, електромагнітними та акустичними інструментами.

Одними з найперспективніших типів приводів для віброударної обробки є такі, що побудовані на базі ультразвукових електромеханічних перетворювачів, тобто з високочастотним ударним навантаженням, яке має свої переваги, бо значно підвищує якість та продуктивність обробки. В основі цих переваг лежать фізичні ефекти, які на протязі багатьох років вивчалися у відділі акустики твердого тіла Інституту металофізики НАНУ. Сьогодні широко відомі зразки інструментів з використанням магнітострикційних ультразвукових перетворювачів. Вперше їх використав один із перших винахідників цього методу *Є.Ш. Статніков* [20], який згодом заснував компанію «Applied Ultrasonic Inc.» у США. Однак досягнення останніх років у галузі створення сучасних високоефективних керамічних матеріалів [21] дали можливість частково відмовитися від громіздких та малоефективних магнітострикційних джерел ультразвукових коливань, що дало поштовх до подальшого вдосконалення і створення принципово нових перетворювачів великої потужності на основі п'єзокераміки. Такі перетворювачі вперше були застосовані в Україні для УЗУО [7, 9, 10], а згодом і в інших країнах (Франція, Китай, Канада). Так, впровадження сучасних п'єзокерамічних перетворювачів (ПКП), які мають більш ніж у 2 рази більший ККД за рахунок високої добротності, дозволило відмовитися від систем рідинного охолодження та зменшити габарити і масу обладнання в цілому у декілька разів. Особливо це важливо для переносних приладів, які працюють у польових, іноді дуже складних умовах. Так, наприклад, оператору при обробці зварних швів у великих конструкціях (мости, кораблі та ін.) потрібно

тримати в руках інструмент довгий час. Тому інструмент вагою більше трьох кілограмів є велими незручним при довгостроковій експлуатації в ручному режимі.

Першим завданням було створення випромінювачів і ультразвукових генераторів з частотою 22,5 кГц та максимальною амплітудою коливань торця хвилеводу (концентратора УЗК) на рівні 20–30 мкм. Такий новий інструмент необхідно перевірити на виробництві, бо лабораторні випробування не дають можливості адекватно відтворити роботу устаткування в складних умовах експлуатації. Однією з основних переваг ультразвукового інструмента у порівнянні з пневмодинамічним, є, наприклад, зниження шкідливих для організму людини шумів і вібрацій. За даними японських дослідників такі шуми не перевищують допустимої у промисловості норми у 80 дБ.

Як видно з табл. 1, шуми і прискорення на ручці ультразвукового інструмента, тобто шкідливі його вібрації, значно менші порівняно з пневмодинамічним.

Виходячи з досвіду застосування УЗУО у промисловості, робітники закордонних компаній віддають перевагу ультразвуковим інструментам. Це дуже важливий показник, бо техніка безпеки у даному випадку грає вирішальну роль. З огляду на це, досить висока вартість ультразвукового обладнання не є перешкодою для його застосування. Однак треба зазначити, що зарубіжні компанії, які займаються випуском і продажем апаратури для

УЗУО (Applied Ultrasonics Inc.— USA, SINTEK Inc. — Canada, SONATS Inc. — France) оцінюють його на рівні 40 тис. дол. США, що, безумовно, звужує ринок збуту обладнання в світі і затримує його поширення в Україні. Тому нами було поставлене завдання створити обладнання, яке може бути конкурентоспроможним на світовому ринку. Тим більше, що в Україні зосереджені кваліфіковані кадри, які мають великий досвід у розробці технології і обладнання для УЗУО.

Стрижневий ПКП вміщує зазвичай декілька парних керамічних пластин, які знаходяться між задньою і передньою металевими накладками. До передньої приєднують концентратор, який в декілька разів збільшує амплітуду ультразвукових коливань. Такий вібратор дорівнює довжині половини хвилі на певній частоті. Як правило, частота коливань технологічних установок складає 18–40 кГц в залежності від цільового призначення. Необхідно зауважити, що амплітуда коливань обернено пропорційна квадрату частоти, тому переважна більшість установок працює на низьких ультразвукових частотах 18–27 кГц.

Якщо відома швидкість ультразвукових коливань C , то довжину хвилі вираховують за простою формулою: $\lambda = C/F$, де F — частота коливань. Проте розрахунок реальних випромінювачів у загальному випадку не такий простий [22]. У роботі були застосовані сучасні методики розрахунків і відповідні комп'ютерні програми. На рис. 1, *a* наведено креслення ПКП з частотою 22,5 кГц. Це найбільш простий випромінювач ультразвуку, відомий як *вібратор Ланжевена*. Його розрахунок найбільш простий, тому що його довжина дорівнює $\lambda/2$. Однак при цьому потрібно враховувати швидкість коливань у матеріалах передньої і задньої накладок, їх щільність, а також масу. П'єзокераміка теж має свої акустичні властивості, які потрібно мати на увазі при розрахунках.

Розробка конструкції ультразвукового ударного інструмента в форматі 3D (Auto CAD)

Таблиця 1

Порівняльні показники випробувань ультразвукового і пневмодинамічного інструментів щодо шумів та небезпечних для оператора вібрацій корпусу (N. Tomiyaga, et al. / IW Document XIII–2170–07)

Інструмент	Прискорення, м/с ²	Максимальне прискорення, м/с ²	Шуми, дБ
УЗУО	16–18	90	69–74
Пневмодинамічний	562–631	1200	83–87

(рис. 1, б) дозволила значно вдосконалити і прискорити процес моделювання та оптимізації розміщення деталей випромінювача у корпусі інструмента з метою поліпшення його ергономічності і зовнішнього вигляду. Нами було розроблено нову конструкцію інструмента, який відрізняється компактним розміром і невеликою вагою, ексклюзивною системою безперервного охолодження вузла ударного навантаження холодним повітрям ($7-10\text{ }^{\circ}\text{C}$), що суттєво знизило потужність компресора стисненого повітря. Ударний інструмент такого виконання призначений для застосування в найскладніших умовах і придатний для тривалої експлуатації як у ручному режимі, так і для робіт у промисловості.

Після виготовлення ПКП зроблено корекцію довжини накладок так, щоб забезпечити задане значення резонансної частоти. Довжина передньої накладки зменшена до 37 мм, а задньої — до 27 мм. При цьому резонансна частота виявилася рівною 22,58 кГц. Для збільшення амплітуди коливань до вихідного кінця ультразвукового випромінювача приєднується трансформатор коливальної швидкості або концентратор.

Вибір концентратора проводився за критерієм достатньо високого коефіцієнта підсилення при стабільній роботі в резонансному режимі [23]. Таким вимогам відповідає ступінчастий концентратор. Справа в тому, що віброударний режим навантаження ультразвукового випромінювача негативно впливає на роботу п'єзокераміки, отже і всього випромінювача у цілому. Сам ультразвуковий випромінювач розміщується в корпусі з метою максимальної ізоляції ультразвукових коливань від інструмента і взагалі від рук оператора. При лабораторному випробуванні інструмента було значно вдосконалено його конструкцію і перш за все проведено зниження шкідливих вібрацій. Для цього збільшено вагу пересувної частини випромінювача, добавлено амортизуючі прокладки та інші конструктивні доробки, які були зроблені після внесен-

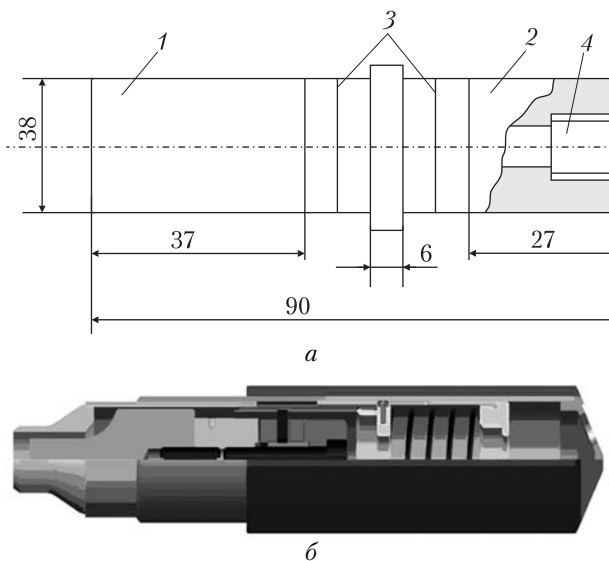


Рис. 1. Конструкція ультразвукового випромінювача (а): 1 — передня накладка; 2 — задня накладка; 3 — кільця п'єзокераміки; 4 — силовий болт. Загальний вигляд ультразвукового інструмента у 3D-форматі (б)

ня зауважень при попередній дослідно-промисловій перевірці приладу на Крюковському вагонобудівному заводі.

У робочому циклі інструмент в цілому притискується до поверхні, що обробляється, з невеликою силою 30–50 Н. При цьому ударники примусово вібрують між поверхнею виробу та торцем концентратора, який коливається з ультразвуковою частотою близько 22,6 кГц і амплітудою до 30 мкм. Частота вібрацій ударників стохастична, вона нижча за ультразвукову і складає за різними оцінками і вимірюваннями 1–3 кГц. Однак це досить висока частота ударів у порівнянні з іншими ударними методами, тому її часто називають *високочастотною механічною проковкою* (ВМП). Вібрації ударної частини інструмента передаються на корпус випромінювача, але вони демпфуються пружиною, а також гумовими підкладками, тому на корпусі інструмента практично відсутні як високочастотні, так і низькочастотні вібрації, що сприяє безпечній роботі обслуговуючого персоналу. Треба відмітити простоту, легкість і придатність до ремонту конструкції

інструмента. В залежності від умов експлуатації (особливо в жаркому кліматі) інструмент комплектується пристроями для примусового повітряного охолодження.

РОЗРОБКА І ВИГОТОВЛЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ГЕНЕРАТОРА З ЦИФРОВИМ КЕРУВАННЯМ

У результаті попередніх лабораторно-промислових випробовувань дослідних зразків ультразвукового генератора (УЗГ), як джерела живлення ультразвукового ударного інструмента, були виявлені суттєві недоліки:

- ✦ нестійке підтримання резонансних коливань ультразвукового перетворювача при перехідних процесах у широкому діапазоні зміни дестабілізуючих факторів (за рахунок значної зміни механічного навантаження та температури);
- ✦ значні складнощі при необхідності заміни робочого ультразвукового інструмента та узгодження його з УЗГ в умовах виробництва;
- ✦ низька захищеність електронних елементів схеми УЗГ від промислового пилу з вмістом металевих частинок.

З урахуванням вказаних недоліків в рамках інноваційного проекту була поставлена задача створення УЗГ з цифровим керуванням і принципово новою конструкцією корпусу, в якому електронні елементи були б надійно захищені від запилення.

Для створення такого пристрою необхідно було:

1) провести модернізацію схемних рішень системи цифрового керування;

2) вдосконалити конструкцію існуючого ультразвукового генератора в комплексі з інструментом для ультразвукової віброударної обробки;

3) виготовити дослідні зразки приладу для проведення дослідно-промислової перевірки в умовах виробництва.

У процесі виконання проекту були виконані такі роботи:

1) модернізовано схему УЗГ з цифровим фа-

зовим автопідстроюванням частоти, яка виконана шляхом прямого цифрового синтезу з підвищеним діапазоном утримання резонансного режиму при дії різних дестабілізуючих чинників на п'єзокерамічний перетворювач, що забезпечує високий рівень точності і повторюваності результатів;

2) розроблено в електронному вигляді повний комплект конструкторської документації (КД) принципових схем і друкованих плат та креслення усіх складових частин конструкції УЗГ;

3) розроблено та виготовлено апаратно-програмний комплекс погодження та методик у налагоджування УЗГ з ПКП;

4) розроблено та виготовлено нову конструкцію корпусу для мобільних та стаціонарних варіантів УЗГ, що забезпечує довготривалу роботу на відкритому повітрі і в умовах забруднення промисловим пилом.

У результаті проведеної роботи був створений новий генератор ультразвукових коливань з такими технічними характеристиками:

- ✦ напруга живлення — 170–240 В;
- ✦ вихідна потужність — 800 Вт;
- ✦ стабілізація ультразвукових коливань акустичної системи в діапазоні вхідної напруги від 170 до 240 В без зміни робочої частоти і вихідної потужності;
- ✦ автоматичне підстроювання частоти УЗГ в діапазоні частот $+1 \div -1$ кГц;
- ✦ цифрове керування, контроль частоти та амплітуди вібрації інструмента, тобто можливість регулювання амплітуди в діапазоні від 10 до ~100 %;
- ✦ м'яка схема пуску без механічного перемикача при включенні УЗГ;
- ✦ наявність захисту від механічного та електричного перевантаження і перегрівання;
- ✦ наявність фільтра мережної перешкоди та коректора коефіцієнта потужності;
- ✦ наявність цифрового сервісного обслуговування периферійного обладнання (інструмента) при відхиленні його характеристик від вихідних у процесі експлуатації.

Загальний вигляд ультразвукового генератора та інструменту наведено на рис. 2. Створене обладнання відрізняється від аналогів, розроблених у Росії, США, Франції і Китаї невеликими габаритами і відносно малою вагою. Так, вага розробленого нами УЗГ дорівнює 4,1 кг, а ударного інструмента — 2,2 кг. У конструкції генератора і інструмента використано нові технічні рішення, які приводять до більш високих технологічних результатів. На принцип дії генератора та розроблений інструмент подані заявки на отримання патенту України.

Інструмент споряджений змінними ударними головками з кількістю ударних елементів (бойків) 1, 3, 4 і 7 од., які використовуються залежно від типу і матеріалу зварного шва. Тривалість і послідовність обробки заданої ділянки шва та зони біля нього задаються попередніми лабораторними дослідженнями, які складають основу нового способу обробки зварних з'єднань.

ВПЛИВ РІЗНИХ ВИДІВ ОБРОБКИ І ВИКОРИСТАНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ РАМ ВІЗКІВ ПАСАЖИРСЬКИХ ВАГОНІВ НА ВТОМНУ ВИТРИВАЛІСТЬ

У вихідному стані зварні з'єднання характеризуються значно меншим опором втомі, ніж основний метал. Тому виникає необхідність проведення додаткових обробок. Технологічні методи підвищення втоми з'єднань можна розділити на 2 групи [5]:

- 1) методи зменшення концентрації залишкових напружень розтягу за рахунок термообробки (високе відпущення);
- 2) методи, які засновані на створенні у небезпечних зонах стискуючих напружень.

У даній роботі представлені порівняльні результати втомних випробувань подовжніх балок рам візків пасажирських вагонів і пропозиції щодо ефективності використання різних методів підвищення втомої міцності конструкції. На ПАТ «КВБЗ» для зняття внутрішніх напружень після зварювання застосовується високе відпущення — нагрівання та витримка при температурі $t_1 = 750\text{ }^\circ\text{C}$ з охолоджу-



Рис. 2. Цифровий ультразвуковий генератор з віброударним інструментом

ванням у печі до температури $t_2 = 100\text{ }^\circ\text{C}$. Технологічний цикл обробки займає близько 24 год. Витрата електричної енергії складає приблизно 1000 кВт/год.

Високе відпущення є традиційним методом зняття внутрішніх напружень, проте воно може спричинити як позитивну, так і негативну дію на опір втомі зварного з'єднання [2].

Найбільш ефективними методами підвищення втомої міцності є локальні методи, що забезпечують в зоні концентрації напружень, сформованих зварюванням, залишкові локальні стиснення. Такими методами можуть бути:

- ✦ місцеве нагрівання;
- ✦ поверхневий наклеп різними методами;
- ✦ пневмодинамічна обробка;
- ✦ ультразвукова ударна обробка.

На підставі проведених в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ досліджень впливу УЗУО на підвищення втомої міцності зварних конструкцій і розробок Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова по створенню ультразвукових установок фахівцями ПАТ «КВБЗ» був виконаний аналіз випробувань рам візків пасажирських вагонів моделі 68-7041 (рис. 3) та визначені місця концентрації зовнішніх напружень, а також місця руйнувань конструкцій під час втомних випробувань. На підставі виконаних роз-



Рис. 3. Місце приварювання кронштейна важеля до нижнього листа

рахунків можна зробити висновок, що максимальне еквівалентне напруження, яке виникає в конструкції при навантаженні, не перевищує допустимих напружень, а міцність рами візка забезпечується при всіх розрахункових режимах. При втомних випробуваннях рами візка руйнування відбувалися по подовжній балці в місці приварювання кронштейна важеля, що

має розрахункове еквівалентне напруження 127 МПа при допустимому значенні 216 МПа.

Природа втомних руйнувань пояснюється тим, що кронштейн важеля приварюється до нижнього листа подовжньої балки, тому він і є концентратором напружень. У вихідному стані після зварювання утворення втомних тріщин завжди відбувається на межі зони сплавлення зварного шва між кронштейном і нижнім листом.

Основною нашою метою було визначення впливу різних способів зняття внутрішніх напружень на втомну міцність рам візків пасажирських вагонів. При цьому також вивчався вплив різних марок сталі на втомну міцність, а також вплив УЗУО—ВМП на циклічну довговічність конструкції, яка пройшла 50%-й експлуатаційний ресурс.

Макетні зразки, які були використані для втомних випробувань по геометричних параметрах відповідають подовжнім балкам рами візка моделі 68-7041, що серійно випускається.

Для виготовлення макетів використано два матеріали, які найбільш широко застосовуються у виробництві залізничних вагонів, в тому числі рам візків:

1) *сталь 20* (Ст. 20). Ця конструкційна якісна сталь має незначну міцність, але відрізняється високими показниками пластичності згідно зі стандартами ГОСТ 19903-74 та ГОСТ1577-93. (її хімічний склад і механічні властивості наведені в табл. 2);

2) *сталь S355 j2*. Це — високоміцна зварювальна конструкційна сталь. Вона добре розкислена і має досить низький вміст вуглецю (менш ніж 0,2 %). Високу міцність цієї сталі забезпечують легуючі елементи, переважно Mn

Таблиця 2

Хімічний склад і механічні властивості Ст. 20

Хімічний склад, мас %.						
C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni
0,2	0,47	0,19	0,009	0,015	0,043	0,01
Межа текучості σ_T (+20 °C) = 282 МПа, межа міцності σ_B (+20 °C) = 434 МПа, видовження δ = 29 %.						

Таблиця 3

Хімічний склад і механічні властивості сталі S355 j2

Хімічний склад, мас %.												
C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	N	Mo	Ti	V
0,18	1,44	0,44	0,0011	0,001	0,035	0,016	0,018	0,039	0,0044	0,0027	0,0023	0,023
Межа текучості σ_T (+20 °C) = 415 МПа, межа міцності σ_B (+20 °C) = 577 МПа, видовження δ = 25 %.												

(її хімічний склад і механічні властивості наведені в табл. 3).

Втомні випробування проводилися на установці ПЦА-100, показаній на рис. 4. Результати випробувань наведені у табл. 4.

Обробка велась на установці USTREAT-2.0 стрижньовими бойками $\varnothing 4,0$ мм з кількістю 3 од. в один рядок з дотриманням таких параметрів:

- ✦ потужність УЗГ $P = 475$ Вт, амплітуда УЗ-коливань $A = 18$ мкм;
- ✦ швидкість обробки – 3,5–4,0 мм/с;
- ✦ метод контролю – візуальний, по наявності поглиблення (канавки) в зоні сплавлення.

Конструкція зварного шва під час приварювання кронштейна важеля не дозволяє виконувати зварювання в нижньому положенні. Тому початок і кінець зварного шва виводяться на вісь балки. Зварювання проводиться багатопрохідним швом в горизонтальному положенні.

Виконання зварювальних робіт, якість зварних з'єднань, методи виправлення дефектів

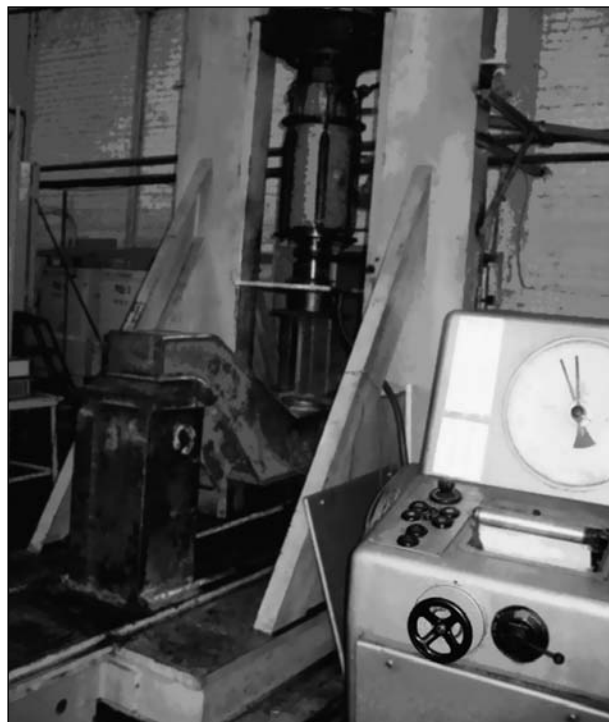


Рис. 4. Загальний вигляд установки ПЦА-100

Таблиця 4

Матеріал зразків, режими обробки і кількість циклів до руйнування

Матеріал і попередня обробка макетів	Маркування макетів	Кількість циклів до руйнування, млн. циклів	Середнє значення кількості циклів до руйнування, млн. циклів
Ст. 20, з відпалом 750 °С	101	2,52	2,62
	102	2,65	
	103	2,7	
S 355 j2, без відпалу	501	1,1	1,13
	502	1,25	
	503	1,05	
Ст. 20, без відпалу	201	2,14	1,83
	202	1,8	
	203	1,54	
Ст. 20, режими обробки 1) Попереднє навантаження 1 млн. циклів; 2) УЗУО(ВМП) швів; 3) Випробування до руйнування	401	3,31	3,52
	402	3,15	
	403	4,11	
Ст. 20, без відпалу УЗУО(ВМП) швів	301	4,65	4,67
	302	3,85	
	303	5,5	

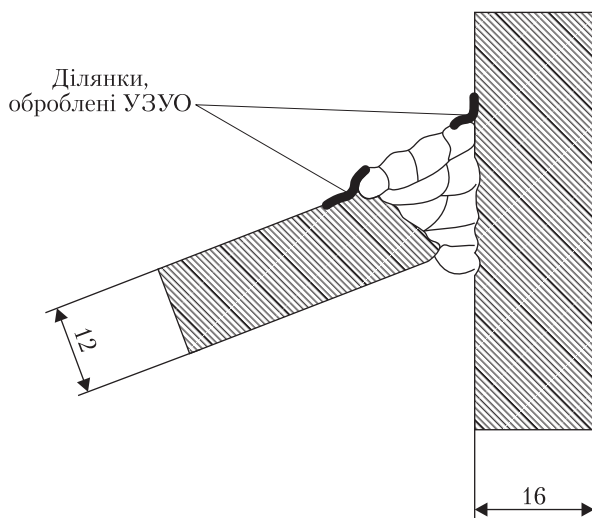


Рис. 5. Місця обробки зварного шва за допомогою УЗУО

та їх контроль здійснювалися згідно з ОСТ 24.050.34-84. Зварювання конструкції проводилося ручним способом у газовому середовищі (82 % Ar + 18 % CO₂). Після накладання кожного шару проводилося зачищення шва від бризків та інших дрібних дефектів. При зварюванні забезпечувався плавний перехід від шва до основного металу. Контроль якості зварних з'єднань здійснювався ультразвуковим дефектоскопом згідно з ГОСТ 14782-76.

Таблиця 5

Результати впливу різних методів обробки і матеріалу на довговічність макетів

Матеріал і попередня обробка макетів	Зміна довговічності макетів (до руйнування) при знакозмінних навантаженнях, %
Ст. 20, без відпалу	100
S355 j2, без відпалу	62
Ст. 20, з відпалом при 750 °С	143
Ст. 20, без відпалу	192
1) 1 млн. циклів; 2) УЗУО (ВМП) швів; 3) випробування до руйнування	255
Ст. 20, без відпалу, УЗУО (ВМП) швів	

Як видно із наведених в табл. 4 даних, середнє значення кількості циклів до руйнування для рам візків після зварювання складає 1,13 і 1,83 млн. циклів для сталей S355j2 і Ст. 20 відповідно. У всіх випадках поява тріщини з подальшим руйнуванням натурального зразка спостерігалась у зоні сплавлення шва з основним металом по нижній частині кронштейна. Більш високі значення довговічності в рамках із сталі Ст. 20 можна пояснити її досить високою пластичністю у порівнянні зі сталлю S355j2 (партії зразків 201-203 і 501-503). Тому подальші випробування були проведені на зразках зі сталі Ст. 20.

Після зварювання зразки рам були поділені на три партії, кожна з яких випробувалася на втомну довговічність після певних обробок. Перша партія зразків (101–103) була піддана відпалюванню при температурі 750 °С на протязі 12 год і охолодженню разом з піччю до температури 100 °С. Після такої обробки середня довговічність зросла до 2,62 млн. циклів. Друга партія зразків (301–303) була оброблена тільки за допомогою УЗУО, при цьому загальний час обробки одного зразка складав біля 0,5 год при споживанні електричної енергії ультразвуковим обладнанням 0,4 кВт/год. За таких умов середня довговічність зразків 301–303 зросла до 4,67 млн. циклів, тобто на 255 % у порівнянні із вихідним станом (табл. 5). Після УЗУО в зоні сплавлення на 2-х балках були виявлені поодинокі непроплавлення, які виявляються при даній обробці і не завжди можуть бути виявлені неруйнівним УЗ-контролем або при зовнішньому огляді.

Певний інтерес викликають випадки, коли конструкція пропрацювала приблизно 50 % від заданої довговічності, а потім була проведена її обробка за допомогою УЗУО–ВМП. Тому партія зразків (401–403) була спочатку навантажена до 1 млн. циклів. Параметри динамічного навантаження на гідропульсаторній установці ПЦА-100 були такими: частота пульсацій – 11 Гц, максимальне навантаження циклу $P_{max} = 147$ кН, мінімальне $P_{min} = 122,5$ кН. Після цього здійснювалася УЗУО зварних швів зразків

даної партії. Видно, що після обробки довговічність зросла на 192 %. Це менше, ніж для зразків 301–303, які оброблялись одразу після зварювання. Слід також зазначити, що один із зразків цієї партії (301) зруйнувався не по перехідній зоні сплавлення, а по основному металу.

Таким чином, втомні випробування натурних зразків — рам візків пасажирських вагонів, — які тривали від 06.12.2012 р до 10.05.2013 р., показали доцільність використання технології УЗУО для зміцнення деяких зварних конструкцій у вагонобудуванні [24]. Але для цього необхідно додатково провести всебічні випробування надійності ультразвукової апаратури, її безпечності для обслуговуючого персоналу, а також здійснити відповідну сертифікацію продукції і включення технології УЗУО до нормативних актів галузевих стандартів і ДСТУ.

ВИСНОВКИ

1. Запропоновано методику розрахунку ультразвукових випромінювачів різної конструкції.

2. Виготовлено пристрій для складання випромінювачів в однакових умовах при стиснення у пресі 10,0 т і закручуванні армуючого болта динамометричним ключем.

3. Здійснено розробку конструкторської документації ультразвукового випромінювача і ударного інструмента з урахуванням результатів випробувань діючого зразка устаткування для УЗУО—ВМП зварних з'єднань в лабораторних умовах і на виробництві.

4. На основі детальних досліджень останніх досягнень у мікропроцесорній техніці створено нову схему ультразвукового універсального генератора з цифровим регулюванням на мікропроцесорній техніці.

5. Розроблені принципові схеми УЗГ з цифровим регулюванням електричних параметрів і управління його роботою та уточнена конструкторська документація на УЗГ. Виготовлено дослідний зразок УЗГ і проведено його випробування на відповідність до ТВ.

6. Виготовлено дві одиниці ультразвукового устаткування для УЗУО—ВМП зварних конструкцій.

7. У рамках договору про науково-технічне співробітництво з Крюковським вагонобудівним заводом (м. Кременчук) задіяна програма втомних випробувань натурних зразків зварних конструкцій — аналогічних рамам візків пасажирських вагонів.

8. Основним результатом випробувань є те, що після відпалу по традиційній технології при температурі 750 °С довговічність зразків зростає на 143 % у порівнянні з вихідним після зварювання станом, а після УЗУО — на 255 %.

9. На підставі результатів випробувань прийнято рішення про доцільність і об'єми впровадження ультразвукової технології у практику виробництва окремих деталей і конструкцій у вагонобудуванні.

ЛІТЕРАТУРА

1. Лобанов Л.М., Кирьян В.И., Кныли В.В., Прокопенко Г.И. Повышение сопротивления усталости сварных соединений металлоконструкций высокочастотной механической проковкой (обзор) // Автоматическая сварка. — 2006. — № 9. — С. 3—11.
2. Труфяков В.И. Повышение сопротивления усталости сварных соединений и конструкций // Автомат. сварка. — 1998. — № 11. — С.11—19.
3. Trufiakov V.I., Mikheev P.P., Kudryavtsev Y.F. Fatigue strength of welded structures. Residual stresses and improvement treatments / London. Harword Academic Publishers GmbH. — 1995. — 100 p.
4. Лурье Г.Б., Штейнберг Я.И. Упрочняюще-отделочная обработка рабочих поверхностей деталей машин поверхностным пластическим деформированием. — М.: Машиностроение. — 1971. — 232 с.
5. Кудрявцев И.В., Науменков Н.Е. Усталость сварных конструкций. — М.: Машиностроение. — 1976. — 270 с.
6. Кривко В.П., Прокопенко Г.И. Ультразвуковая обработка сварных соединений // Сварочное производство. — 1979. — № 5. — С. 32—34.
7. Прокопенко Г.И., Недосека П.Я., Грузд А.А., Красовский Т.А. Разработка и оптимизация оборудования и процесса ультразвуковой ударной обработки сварных соединений с целью снижения остаточных напряжений // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. — 1995. — № 3. — С. 14—22.
8. Пат. України № 60390. Спосіб обробки зварних з'єднань металлоконструкцій високочастотною проков-

- кою / Л.М. Лобанов, П.П. Міхеев, Г.І. Прокопенко, В.В. Книш, Ю.П. Кудрявцев, Б.М. Мордюк, Я.І. Клейман. — Бюл. № 10 від 15.10.2003.
9. А.с. № 1143 (СССР). Ультразвуковой многобойковый инструмент / Г.И. Прокопенко, В.П. Кривко. — Бюл. № 13. — 1978.
 10. Пат. України № 8366. Устройство для ультразвуковой обработки / Т.А. Красовский, Г.И. Прокопенко, А.Ф. Твердохлеб. — Бюл. № 1 от 29.03.96.
 11. Пат. України № 13936. Ультразвуковая головка для поверхностного упрочнения металлических поверхностей / Г.И. Прокопенко, А.В. Козлов. Бюл. — № 2 от 25.04.97.
 12. Пат. України № 47536. Пристрій для ультразвукової ударної обробки металів / Г.І. Прокопенко, Я.І. Клейман, О.В. Козлов, П.П. Міхеев, В.В. Книш, Ю.П. Кудрявцев. — Бюл. № 7 від 15.07.2002.
 13. Pat. of USA #6467321. Device for ultrasonic peening of metals / G. Prokopenko, J. Kleiman, O. Kozlov, P. Micheev, V. Knysh, Y. Kudryavtsev. — Publ. 23.10.2002.
 14. Полоцкий И.Г., Недосека А.Я., Прокопенко Г.И. и др. Снижение остаточных сварочных напряжений ультразвуковой обработкой // Автоматическая сварка. — 1974. — № 5. — С. 74—75.
 15. Полоцкий И.Г., Прокопенко Г.И., Кривко В.П. Ультразвуковая обработка некоторых промышленных сплавов и их структурные изменения // МиТОМ. — 1983. — № 6. — С. 46—48.
 16. Волосевич П.Ю., Прокопенко Г.И., Книш В.В., Войтенко О.В. Структурные изменения в зоне сварного шва стали Ст3 при ультразвуковой ударной обработке и их влияние на повышение сопротивления усталости // Металлофизика и новейшие технологии. — 2008. — Т. 30, № 10. — С. 1429—1443.
 17. Книш В.В., Кузьменко А.З., Войтенко О.В. Повышение сопротивления усталости сварных соединений высокочастотной механической проковкой // Автоматическая сварка. — 2006. — № 1. — С. 43—47.
 18. Гарф Э.Ф., Литвиненко А.Е., Смирнов А.Х. Оценка долговечности трубчатых узлов, подвергнутых ультразвуковой ударной обработке // Автоматическая сварка. — 2001. — № 2. — С. 13—16.
 19. Книш В.В., Кузьменко А.З., Соловей С.А. Повышение циклической долговечности сварных тавровых соединений с поверхностными трещинами // Автоматическая сварка. — 2009. — № 1. — С. 38—43.
 20. Statnikov E Sh. Applications of Operational Ultrasonic Impact Treatment Technologies in Production of Welded Joints // Welding in the World. — 2000. — Vol. 44, No. 3. — P. 34—45.
 21. Головин В.А., Рывкин В.И. Пьезоэлектрическая керамика (применение и производство) // Зарубежная электроника. — 1989. — № 3. — С. 47—58.
 22. Гринченко В.Т., Вовк І.В., Мацитура В.Т. Основи акустики. — К.: Наук. думка, 2007. — 640 с.
 23. Меркулов Л.Г., Харитонов А.В. Теория и расчет составных концентраторов // Акустический журнал. — 1969. — Том 5, вып. 43. — С. 183—190.
 24. <https://www.youtube.com/watch?v=oWKzDQ8HTAs>.

*В.И. Приходько, М.В. Высоколян,
В.В. Волочай, Г.И. Прокопенко, Б.Н. Мордюк,
В.Т. Черепин, Т.А. Красовский, Т.В. Попова*

СОЗДАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ И РЕЛАКСАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ВАГОНОСТРОЕНИИ

Разработана новая модификация портативного ультразвукового оборудования мощностью 0,8 кВт с цифровым управлением для упрочнения и релаксационной обработки поверхности металлических изделий. Изготовлена партия таких приборов, подготовлена конструкторская документация на ультразвуковой генератор и ударный инструмент с пьезокерамическим преобразователем. Осуществлена подготовка технологии ультразвуковой ударной обработки сварных конструкций. Проведены сравнительные испытания влияния разных типов обработки и примененных материалов на усталостную долговечность. Испытания показали целесообразность использования ультразвуковой ударной обработки для увеличения срока эксплуатации изделий.

Ключевые слова: ультразвуковая ударная обработка, сварные конструкции, усталостная долговечность, остаточные напряжения, концентраторы напряжений.

*V.I. Prykhodko, M.V. Vysokolyan,
V.V. Volochai, G.I. Prokopenko, B.N. Mordyuk,
V.T. Cherepin, T.A. Krasovskiy, T.V. Popova*

CREATION OF ULTRASONIC EQUIPMENT
FOR STRENGTHENING AND RELAXATION
TREATMENT OF THE WELDED CONSTRUCTIONS
IN CARRIAGE BUILDING

New modification of portable ultrasonic equipment with power output of 0,8 kW with the digital management is developed for strengthening and relaxation treatment of surface of metallic hardware. A set of such devices is produced;

the designer documentations on an ultrasonic generator and impact instrument with a piezoceramic transducer are prepared. Preparation of technology of ultrasonic impact treatment for welded constructions is accomplished. Conducted comparative tests on the effects of different types of treatment and applied materials of welded constructions on fatigue durability showed the expediency of ultrasonic impact treatment for the prolongation of operation life of wares.

Key words: ultrasonic impact treatment, welded constructions, fatigue durability, residual stresses, stress concentrators.

Стаття надійшла до редакції 19.06.13