

В. І. КИР'ЯН, В. В. КНИШ (ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, Київ),
Г. О. ЛИННИК (Укрзалізниця)

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ЗВАРНИХ СУЦІЛЬНОСТІНЧАТИХ ПРОГОНОВИХ БУДОВ ЗАЛІЗНИЧНИХ МОСТІВ

У роботі досліджуються досвід експлуатації та методи збільшення надійності та довговічності металевих прогонових будов із суцільною стінкою.

В работе исследуются опыт эксплуатации и методы увеличения надежности и долговечности металлических пролетных строений со сплошной стенкой.

In the work the operating experience and methods of increasing the reliability and durability of steel bridges are investigated.

Головними конструктивними елементами суцільностінчастих зварних прогонових будов є балки двотаврового перерізу, які об'єднуються між собою системою в'язей. Вони працюють в складних умовах перемінного навантаження від рухомого складу, вітру, зміни температури та ін. У відповідності з нормативами проектний термін служби прогонових будов мостів складає 100 років [1]. Розрахунок їхніх несучих елементів на втому здійснюється, виходячи з обмеженої границі витривалості на базі $2 \cdot 10^6$ циклів перемін навантаження. При цьому береться до уваги, що одному циклу навантаження прогонової будови відповідає проїзд одного ешелону. Проте, тріщини від утомленості зароджуються недовзі після початку експлуатації. До утворення тріщин достатніх розмірів, щоб їх можна було виявити, проходить від чотирьох до семи років. В деяких випадках (на дільницях зі значною вантажнонапруженістю) вони спостерігаються через 1...3 роки роботи будови і в таких елементах і зварних з'єднаннях, в яких їх не очікували і не розраховували на втому. За такими типовими проектами прогонової будови залізничних мостів виготовляються і тепер. Це викликає занепокоєність і потребує звернути серйозну увагу на проблему їхньої працездатності. Важливим тут є встановлення причин передчасного зародження тріщин втоми і розробка надійних і економічно доцільних заходів з забезпечення довговічності прогонової будови протягом усього нормативного терміну експлуатації, а можливо і довше. Вирішенню цієї проблеми і присвячена дана робота.

Причини передчасного зародження тріщин втоми

Апріорі можна сказати, що у зварних металоконструкціях, які розраховуються на втому і відповідають вимогам нормативної документації з якості, передчасне зародження тріщин втоми пов'язане з їх конструктивними недоліками. Це стосується і прогонових будов залізничних мостів. З найбільш розповсюджених слід відзначити тріщини в зварних з'єднаннях вертикальних ребер жорсткості з поясами (Т4) і горизонтальними ребрами (Т6, Т11), стінках головних балок в місцях обривання вертикальних ребер жорсткості (Т9, Т10), зоні сплавлення верхнього поясного шва (Т13) у створі вертикальних ребер (рис. 1) [2]. Якщо пошкодження елементів в'язей мало впливають на працездатність прогонової будови, то цього не можна сказати про втомні тріщини, які розвиваються в стінках головних балок. Вони є дуже небезпечними.

Джерелом зародження тріщин втоми слугують місцеві додаткові напруження в елементах прогонової будови та їх вібрація, які виникають через значну ексцентричність передачі навантаження від рейкової колії на головні балки. Частота вібрації і рівні додаткових напружень визначаються швидкістю поїзда та добротністю (кількісна характеристика резонансних властивостей коливальної системи) вузла. Високо-частотна складова напруження від вібрації елементів накладається на вторинні низько-частотні. Двочастотне, а в загальному випадку полічастотне, навантаження суттєво знижує циклічну довговічність [3].

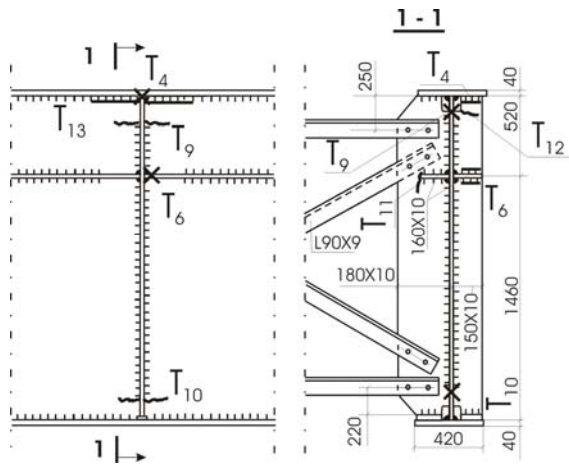


Рис. 1. Місця зародження втомних тріщин (позначені літерою Т з цифрою) в елементах типових прогонових будов залізничних мостів проектування 60...70-х рр. (проекти № 541 і № 821)

За часів проектування прогонових будов залізничних мостів під керівництвом Є. О. Патона (50-ті роки) було зроблено все можливе для того, щоб виключити появу додаткових напружень і вібрації. Так, зовнішні листи верхніх поясів, на які опираються мостові бруси, мали ширину 200 мм, в'язі розташовувались у рівні поясів, а вертикальні ребра жорсткості приварювались до верхнього поясу. Довговічність таких прогонових будов суттєво вища (в 15...20 разів) порівняно з сучасними, виготовленими за типовими проектами. Створенню типових проектів передувало «удосконалення» прогонових будов залізничних мостів у 1960...70-ті роки, основним напрямом якого було звільнення від зварних швів верхніх поясів головних балок. Пов'язано це було з тим, що на зварні з'єднання і залишкові напруження безпідставно покладалась вся відповідальність за виникнення тріщин втоми. В результаті вертикальні ребра жорсткості стали сполучатись з верхніми поясами головних балок через «сухарики», були перенесені прикріплення в'язей з поясів на стінку і значно збільшена ширина поясів (до 420...620 мм). Ці заходи призвели до різкого зменшення довговічності прогонових будов. Так, за наявності зазору в приєднанні вертикальних ребер жорсткості до поясів (з досвіду він досягає 0,5...1,0 мм) проїзд кожного візка (навіть осі) рухомого складу викликає поворот пояса і вигин стінки з її площини на ділянці вирізу вертикальних ребер жорсткості, а на ділянці між ребрами жорсткості – згин стінки відсіку по всій її висоті. Вигин стінки між ребрами жорсткості спричиняє поворот нижнього пояса і сприяє виникненню коливань відсіку стінки. При

певних швидкостях рухомого складу такі коливання можуть бути резонансними. У випадку збільшення ширини верхніх поясів значно зростає однобічність опирання на них мостових брусів і, відповідно, ексцентричність передачі навантаження від рейкової колії на головні балки. При цьому пояси зазнають додаткових перемінних напружень від скручування, а верхні ділянки стінки – від згину. Фасонки поздовжніх в'язей теж згинаються. Незважаючи на це, проектні організації продовжували заміну зварних швів на з'єднання за допомогою високоміцних болтів. Вже в 60-тих роках з'явилися перші болти в прогонових будовах. За їх допомогою прикріплялись поздовжні і поперечні в'язі до фасонки. Потім болтами стали прикріпляти фасонки в'язей до головних балок. В останні часи з'єднання вертикальних ребер жорсткості зі стінками балок теж здійснюється за допомогою високоміцних болтів. Зварними залишились тільки стики листів головних балок і поясні шви. Всі інші з'єднання замінені на болтові.

В той же час, досвід експлуатації показав, що заміна зварних з'єднань болтовими не гарантує виключення втомних руйнувань, оскільки залишається головне джерело їх виникнення – нецентрована передача навантаження на головні балки та інші розглянуті вище причини. Крім того, порівняно із суцільнозварними, болтозварні прогонові будови значно ускладнили процес заводського виготовлення за рахунок введення нової технологічної операції – свердління отворів з використанням кондуктора і встановлення болтів.

Конструктивні заходи попередження зародження тріщин втоми є найбільш радикальними і надійними. Дослідження напружено-деформованого стану (НДС) конструктивних оформлень зварних вузлів (таких, що експлуатуються, та нових запропонованих) дозволило сформулювати вихідні положення створення суцільнозварних прогонових будов залізничних мостів нового типу, не схильних до зародження втомних тріщин [4]. Основним з них є об'єднання головних балок на рівні верхніх поясів такою системою в'язей, які б покращили просторову роботу прогонової будови за рахунок більш рівномірного розподілу зусиль між елементами, виключення в них додаткових напружень і вібрації. Для цього запропонована заміна поздовжніх і поперечних в'язей кутового профілю відповідно листами-вставками і листовими діафрагмами закритого чи відкритого типу. Важливе значення при цьому має спосіб

приварки елементів. Головне в тому, що листи-вставки, діафрагми і ребра жорсткості приварюються до верхніх поясів головних балок з повним проваром. Приварка вертикальних ребер жорсткості та діафрагм до верхньої частини стінок головних балок на відстані 200 мм від поясів здійснюється теж з повним проваром. Запропоновані листи-вставки і діафрагми, утворюючи спільно зі стінками головних балок жорсткі клітки, виключають взаємні переміщення головних балок, підвищують жорсткість прогонової будови на згин в горизонтальному і вертикальному напрямках, а також на кручення, сприяють рівномірному розподілу експлуатаційних напружень. Це суттєво знижує місцеве кручення верхнього поясу і пов'язані з цим додаткові перемінні напруження в елементах прогонової будови. Все це призводить і до зниження вібрації елементів. Така конструкція достатньо технологічна у виготовленні. Натурні випробування протягом декількох років запропонованої суцільнозварної прогонової будови моста на експериментальному кільці ВНДІЗТ показали її високу стійкість втомним руйнуванням.

Подовження ресурсу прогонових будов, що експлуатуються, теж може забезпечуватись конструктивними заходами, які сприяють центрованій передачі навантаження від рухомого складу на головні балки. Позитивний ефект дають спеціальні центратори, які приварюються до верхніх поясів головних балок. Більш радикальним є використання мостового полотна на баласті або безбаластного мостового полотна (БМП). Що стосується конструктивного оформлення зварних вузлів, то можуть бути використані оригінальні способи прикріплення вертикальних ребер жорсткості до стінки і поясу головної балки. Наприклад, з відсутнім вирізом у ребрі для пропуску поясного шва. Прикріплення ребра до стінки і поясу балки здійснюється неперервними кутовими швами з повним проваром.

Підвищення опору втомі зварних з'єднань високочастотною механічною проковкою (ВМП)

Загальновідомо, що опір втомі зварних з'єднань у вихідному стані нижчий порівняно з основним матеріалом. Чим вище міцність матеріалу, тим ця різниця більша. Одним із шляхів підвищення циклічної довговічності з'єднань є додаткові обробки при виготовленні металоконструкцій. Дія деяких з них заснована на зменшенні концентрації напружень у зоні

з'єднання (наприклад, механічна й електро-дугова обробки швів), інших – на перерозподілі залишкових зварювальних напружень біля концентраторів (наприклад, загальна і місцева термічна обробка, локальний нагрів, попереднє статичне перевантаження, поверхневий наклеп, вібраційна і вибухова обробка).

В останні роки велика увага приділяється одному із найпривабливіших економічно та за можливістю реалізації на виробництві і в польових умовах способу поверхневого пластичного деформування металу зварного з'єднання в зонах концентраторів напружень, який використовує енергію ультразвуку [5 – 7]. Це – ударна обробка поверхні металу високоміцними стрижнями, механічні коливання яких збуджуються ультразвуковим (УЗ) генератором через п'єзокерамічний випромінювач (перетворювач електричних коливань у механічні) з вихідною потужністю 0,3...0,5 кВт. Частота коливань УЗ складає близько 27 кГц, а бойків – у 8...10 разів менше. Загальний вигляд комплексу для ВМП зварних з'єднань ілюструє рис. 2.

а)



б)



Рис. 2. Комплекс для високочастотного механічного проковування (ВМП) зварних з'єднань металоконструкцій (вихідна потужність 0,3 кВт)
а): 1 – комп'ютер; 2 – УЗ генератор; 3 – ручний інструмент для ВМП з п'єзокерамічним випромінювачем;
б): знімні головки ручного інструменту для ВМП: однойко́ва – діаметром 4 мм; трибойко́ва – 3xØ 4 мм; чотирийбойко́ва – 4xØ 3 мм; семибойко́ва – 7xØ 5 мм

Уперше оцінили можливість УЗ-технології з підвищення опору втомі зварних з'єднань в ІЕЗ

ім. Є. О. Патона НАН України в 1982 р. при використанні устаткування на магніострикційному перетворювачі [8]. Таке устаткування великогабаритне і стаціонарне через необхідність його охолодження, яке здійснюється проточною водою. В результаті обробки циклічна довговічність стикових з'єднань низьковуглецевої сталі збільшилась у 18...20 разів. Це дало поштовх для проведення систематичних досліджень, пов'язаних з розробкою УЗ технології і оцінкою її ефективності в підвищенні опору втомі зварних з'єднань сталей різного класу міцності та алюмінієвих сплавів. Виявилось, що обробляти достатньо тільки вузьку зону переходу від металу шва до основного матеріалу шириною близько 4...7 мм. При цьому головними факторами підвищення циклічної довговічності та границі витривалості зварних з'єднань слугують наступні:

- перерозподіл залишкових розтягувальних напружень і створення стискувальних в зоні обробки;

- зменшення коефіцієнта концентрації робочих напружень α_σ ;

- деформаційне зміцнення поверхневого шару металу.

Спільна дія вказаних трьох факторів достатньо ефективно підвищує циклічну довговічність і границі витривалості σ_R зварних з'єднань конструкційних матеріалів (табл. 1). Залежно від умов циклічного навантаження (асиметрія циклу), механічних властивостей основного матеріалу, концентрації напружень, обумовленої типом і формою з'єднання, залишкових напружень і інших чинників, циклічна довговічність після ВМП підвищується у 8...10 разів, а границя витривалості на базі $2 \cdot 10^6$ циклів перемін навантаження – на 30...200 %. Рівень підвищення опору втомі зварних з'єднань суттєво залежить і від параметрів ВМП. Шляхом їх підбору (в ІЕЗ ім. Є. О. Патона розроблена відповідна методика) досягається максимально можливе у відповідності з вказаними чинниками збільшення границі витривалості. При цьому основні закономірності зростання ефективності ВМП такі:

- з підвищенням міцності вихідного матеріалу;

- для зварних з'єднань з високою початковою концентрацією робочих напружень, обумовленою формою шва (наприклад, з'єднання з поперечними ребрами, привареними кутовими швами) порівняно зі стиковим;

- при зниженні коефіцієнта асиметрії циклу зовнішнього навантаження R_σ .

Для прикладу можна навести такі дані. При оптимальному режимі ВМП підвищення границі витривалості зварного з'єднання (високоміцна сталь – $\sigma_b = 1000$ МПа) з поперечними ребрами, привареними кутовими швами, при симетричному циклі навантаження ($R_\sigma = -1$) досягає 200 %, а при знакопостійному ($R_\sigma = +0,6$) – 30 % (див. табл. 1). Отримані результати експериментальних досліджень ефективності ВМП для підвищення опору втомі зварних з'єднань сталей різних класів міцності і алюмінієвих сплавів, досвід її використання в суднобудівництві, дослідно-промислові перевірки у мостобудуванні при виготовленні та ремонті прогонових будов мостів та в інших галузях можуть слугувати основою для включення ВМП до норм проектування і виготовлення зварних металоконструкцій. Порівняно з іншими способами поверхневого пластичного деформування зварних з'єднань, ВМП має цілий ряд переваг: високу продуктивність і економічність; компактність і мобільність устаткування; незначну площу обробки (зона переходу від металу шва до основного матеріалу); обробку в довільному просторовому положенні; можливість прогнозування ефективності обробки.

Підвищення ресурсу зварних металоконструкцій за допомогою ВМП

Нещодавні дослідження показали, що ВМП результативна при підвищенні опору втомі не тільки на стадії виготовлення зварних металоконструкцій (обробка зварних з'єднань відразу після зварювання), але і після деякого терміну їх експлуатації і значного накопичення втомних пошкоджень в зонах концентраторів напружень, включаючи зародження втомної тріщини глибиною до 1 мм [9, 10]. Випробування на втому проводили при віднульовому циклі перемінного навантаження ($R_\sigma = 0$) на зразках із сталі СтЗсп з поперечними ребрами жорсткості, привареними з повним проваром ручним електродуговим зварюванням. Перша серія зразків була у вихідному стані після зварювання, друга – оброблена ВМП одразу після зварювання, третя – оброблена ВМП після циклічного навантаження і накопичення в зварних з'єднаннях втомних пошкоджень на рівні приблизно 50 % і 95 % від тих, які відповідають зародженню тріщини.

Отримані криві втомі (рис. 3) демонструють підвищення довговічності зразків третьої серії (залиті кружки), випробуваних в діапазоні змін напружень $\sigma_{max} = 175...225$ МПа, порівнюючи

зі зразками першої (залиті трикутники) та другої (світлі кружки) серій відповідно на порядок і більше ніж у 2 рази. При цьому межі витривалості на базі $2 \cdot 10^6$ циклів теж зросли порівняно з вихідним станом відповідно на 66 і 50 %. Підвищення рівня напружень $\sigma_{\max} = 175 \dots 225$ МПа при напрацюванні 50 % довговічності й випробуванні зразків третьої серії пов'язані з тим, що навіть після накопичення близько 95 % пошкоджень від втомленості й ВМП довговічність виявилась більше нормативної $2 \cdot 10^6$ циклів (залитий квадрат на рис. 3). Такий високий (наближений до границі текучості) рівень напружень сприяв значному пластичному деформуванню металу біля концентратора і утворенню залишкових напружень стискування (як при перевантаженні). В результаті цього додаткового ефекту підвищився опір втомі зварних з'єднань після напрацювання і ВМП (залиті кружки) відносно до оброблених ВМП відразу після зварювання (світлі кружки).

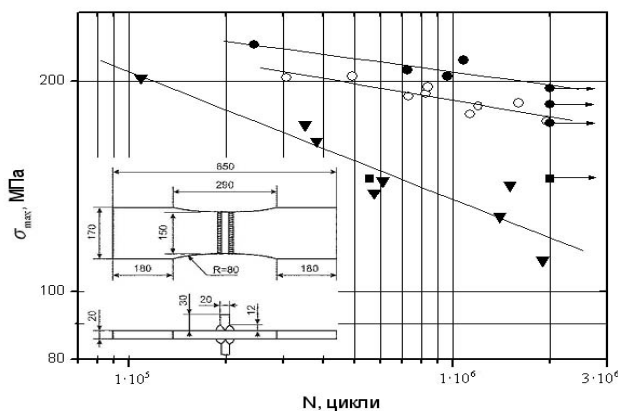


Рис. 3. Криві втоми таврових зварних з'єднань (СтЗсп): ▼ – вихідний після зварювання стан; ○ – ВМП відразу після зварювання; ● – ВМП після випробування до 50 % довговічності; ■ – те саме до 95 %

Суттєве підвищення довговічності після ВМП спостерігається і для зварних з'єднань металоконструкцій, що мають тріщини від втомленості глибиною до 1 мм. Так, довговічність таврового з'єднання із сталі 10ХСНД у вихідному стані після зварювання досягла приблизно 300 тис. циклів змін навантажень ($\sigma_{\max} = 220$ МПа, $R_{\sigma} = 0$). В результаті ВМП зони переходу від металу кутового шва до основного матеріалу, в якій виникла тріщина втомі (глибина до 1 мм), довговічність зразка перевищила $2 \cdot 10^6$ циклів.

Наведені результати свідчать про високу ефективність використання ВМП для подовження ресурсу металоконструкцій, що експлуатуються, зі значними накопиченнями пошкод-

жень від утомленості в зонах концентраторів напружень зварних швів.

Способи гальмування втомних тріщин

В зварних металоконструкція, які експлуатуються в умовах перемінного навантаження, зароджуються і розвиваються тріщини втоми. Необхідність в подовженні ресурсу таких металоконструкцій вимагає розробки надійних способів гальмування тріщин, що розвиваються. З метою співставлення поряд з новими розглядалися відомі способи, які сьогодні використовують на практиці. Серед них висвердлювання в зоні вершини тріщини втоми отвору без або з установленням в нього високоміцного болта для створення стискувальних напружень [11].

Великомасштабні плоскі зразки для досліджень із сталі 10ХСНД і ВСтЗсп товщиною відповідно 12 і 14 мм мали початкову наскрізну тріщину від утомленості довжиною $2a_0$. Після застосування зазначених в табл. 2 способів гальмування тріщин циклічне навантаження зразків здійснювали у м'якому режимі (підтримка постійним зусилля) при віднольовій асиметрії ($R_{\sigma} = 0$) і максимальному напруженні $\sigma_{\max} = 150$ МПа. За побудованими залежностями підростання тріщини від кількості циклів змінного навантаження до повного руйнування зразків визначався коефіцієнт збільшення довговічності K_d (табл. 2).

З розглянутих способів заслуговують на увагу створення на шляху розвитку тріщини від утомленості залишкових напружень стискування за допомогою короткочасного локального нагрівання металу до температури близько 350 °С на невеликій відстані від вершини тріщини ($K_d = 19$). Для конкретних випадків технологічні параметри нагрівання визначаються за допомогою розв'язання термопружної задачі за умови створення на шляху розвитку тріщини від утомленості максимальних напружень стискування. Достатньо ефективним ($K_d = 21$) є установлення в отвір біля вершини тріщини від утомленості високоміцного болта з натягом 20 тс. $K_d > 41$ дає ремонт тріщин за допомогою зварювання. Найбільш радикальним способом запобігання розвитку тріщини втоми є її ремонт зварюванням і ВМП зони переходу від металу ремонтного шва до основного матеріалу. Довговічність в цьому випадку перевищує нормативну – $2 \cdot 10^6$ циклів (табл. 2).

На базі проведених досліджень для Укрзалізниці складено відповідні «Рекомендації» з подовження ресурсу суцільностінчастих звар-

них прогонових будов залізничних мостів з пошкодженнями від утомленості, в яких започатковано ремонт тріщин за допомогою зварювання і ВМП [12].

Висновки

Забезпечення довговічності зварних прогонових будов залізничних мостів передбачає вжиття відповідних заходів на всіх стадіях їх

життєвого циклу, який включає проектування, виготовлення і експлуатацію. В роботі не ставилась задача детально проаналізувати весь комплекс заходів, що сьогодні використовуються, а висвітлити тільки ті з них, які недостатньо ефективні і запропонувати шляхи попередження зародження і розвитку руйнування.

Таблиця 1

Границя витривалості зварних з'єднань σ_R на базі $2 \cdot 10^6$ циклів навантаження

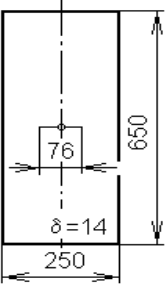
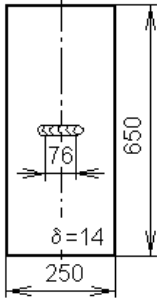
Тип з'єднання	Умови випробувань		σ_R , МПа		Підвищення границі витривалості, %
	Навантаження	Коеф. асиметрії циклу, R_σ	Вихідний стан	Після обробки	
Маловуглецева сталь ($\sigma_B = 435 \dots 460$ МПа)					
Стикове	Розтяг	0	140	220	57
З поперечними ребрами, привареними кутовими швами	Розтяг	0	113	164	45
Хрестоподібне	4-точковий згин	0,25	142	234	64
		-0,5	165	282	71
Низьколегована сталь ($\sigma_B = 520 \dots 590$ МПа)					
Таврове	Згин	0	168	290	73
З поперечними ребрами, привареними кутовими швами	Згин	0	198	341	72
З поздовжніми планками, привареними кутовими швами	Розтяг	0	86	180	110
Високоміцна сталь ($\sigma_B = 820 \dots 1000$ МПа)					
Стикове	Згин	-1	180	300	66
	Розтяг	0	129	224	74
	Згин	0,6	135	175	30
З поперечними ребрами, привареними кутовими швами	Згин	-1	80	240	200
	Згин	0	110	230	109
	Згин	0,6	80	105	31
Таврове	Згин	0,1	135	397	192
Алюмінієві сплави ($\sigma_B = 290 \dots 335$ МПа)					
Стикове	Розтяг	0,1	71	86	21
Напускне з поперечними кутовими швами	Розтяг	0,1	20	35	78
З поздовжніми планками, привареними кутовими швами	Розтяг	0,1	35	68	95

Результати експериментальних досліджень ефективності способів гальмування втомних тріщин
в плоских зразках із сталі ВСт3сп ($2a_0 = 76$ мм; $R_\sigma = 0$, $\sigma_{\max} = 150$ МПа)

Тип зразка	Спосіб гальмування тріщини	Довговічність, N, цикли	Коефіцієнт збільшення довговічності, K_d
1	Вихідний стан	35000	
2	Висвердлювання отворів Ø23мм біля вершин тріщин	52200	1,45
2'	Те саме з наступним наклепом поверхні отворів височастотною механічною проковкою (ВМП)	84500	2,41
3	Установка в отвори високоміцних болтів Ø22мм з натягом 20 тс	730550	20,87
4	Локальна вибухова обробка	277700	7,93
5	Локальний нагрів	668300	19,09
6	Ремонт тріщин зварюванням	1450000	41,43
6'	Те саме і ВМП	$> 2 \cdot 10^6$	

Таблиця 3

Ефективність застосування височастотної механічної проковки (ВМП) при ремонті зварюванням пошкоджених тріщинами елементів конструкцій (максимальне напруження при випробуванні зразків на втому $\sigma_{\max} = 150$ МПа, асиметрія циклу $R_\sigma = 0$)

№ п/п	Ескіз зразка	Спосіб гальмування тріщини	Сумарне число циклів до утворення тріщини і руйнування зразка
1		Вихідний стан	35000
2		Ремонт тріщини зварюванням і ВМП зони переходу від металу шва до основного матеріалу	598600* 403800* середнє: 501200 (збільшення довговічності в 14,00 разів) >2000000**
		Те саме без ВМП	1450000** (збільшення довговічності в 41,43 разів)

Примітки: * – тріщини зароджувались від внутрішніх дефектів з'єднання;

** – з'єднання без дефектів зварювання, тріщини зароджувались з поверхні перехідної зони

Стадія проектування

Для зварних металокопструкцій, які експлуатуються в умовах перемінного навантаження, принципове значення має конструктивне оформлення зварних вузлів. Його недосконалість в прогонових будовах залізничних мостів призводить до виникнення в елементах додаткових локальних напружень і вібрацій, які сприяють ранньому зародженню тріщин втоми. В таких випадках навряд чи раціонально вживати інших заходів для компенсації зниження довговічності вузлів за рахунок факторів, які не приймаються до уваги при розрахунках на втому.

Основні принципи конструювання зварної прогонової будови, не схильної до зародження тріщини втоми, започатковані в ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.

Стадія виготовлення

Для підвищення опору втомі зварних з'єднань, який у вихідному стані після зварювання нижчий порівняно з основним матеріалом, доцільно використовувати високочастотну механічну проковку (ВМП) зони сплавлення. В результаті зменшення коефіцієнта концентрації напружень, утворення за рахунок пластичного деформування залишкових стискальних напружень і деформаційного зміцнення поверхневого шару металу, циклічна довговічність підвищується у 8...10 разів, а границя витривалості на базі $2 \cdot 10^6$ циклів перемін навантаження на 30...200 % залежно від умов циклічного навантаження, механічних властивостей основного матеріалу, концентрації напружень, обумовленої типом і формою з'єднання, залишкових напружень і параметрів ВМП.

Стадія експлуатації

Для подовження ресурсу зварних металокопструкцій після деякого терміну їх експлуатації і накопичення втомних пошкоджень в зонах концентраторів напружень, включаючи зародження втомної тріщини глибиною до 1 мм, ефективно використання ВМП. В результаті ВМП довговічність практично відновлюється.

Тріщини втоми, які розповсюджуються, пропонується гальмувати створенням на шляху їх розвитку залишкових напружень стискування за допомогою короткочасного локального нагрівання металу до температури близько 350°C на невеликій відстані від вершини тріщини. Для конкретних випадків технологічні параметри нагрівання визначаються за допомо-

гою розв'язку термопружної задачі за умови створення на шляху розвитку тріщини максимальних напружень стискування. При цьому довговічність підвищується до 20 років.

Подібний ефект дає висвердлення отвору біля вершини тріщини втоми і встановлення в нього високоміцного болта з натягом 20 тс.

Довговічність елемента конструкції після ремонту тріщини за допомогою зварювання і ВМП перевищує нормативну – $2 \cdot 10^6$ циклів.

БІБЛЮГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. ДБН В.2.3-14:2006 Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування [Текст] / А. І. Лантух-Лященко та ін. – К.: Мінбуд України, 2006. – 359 с.
2. Лучко, Й. Й. Механіка руйнування мостових конструкцій та методи прогнозування їх залишкової довговічності [Текст] / Й. Й. Лучко, Г. Т. Сулим, В. І. Кир'ян; за ред. Й. Й. Лучка // НАН України. Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка. Механіка руйнування та міцність матеріалів: Довідник. Посібник. – Т. 6. – Львів: Каменяр, 2004. – 885 с.
3. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках [Текст] / В. И. Труфяков др.; под ред. В. И. Труфякова. – К.: Наук. думка, 1990. – 256 с.
4. New approach to the creation of solid-walled welded span structures of railway bridges [Текст] / V. I. Trufiyakov et al. // Welding and Surfacing Rev. – 1997. – V. 8. – P. 249-255.
5. Михеев, П. П. Повышение сопротивления усталости сварных соединений конструкций ультразвуковой ударной обработкой [Текст] / П. П. Михеев // Проблемы сварки и специальной электротехнологии: Сб. науч. тр. – К.: Наук. думка. 1990. – С. 41-47.
6. Спосіб обробки зварних з'єднань металокопструкцій високочастотною проковкою [Текст]. Пат. України № 60390 / Л. М. Лобанов та ін. – Опубл. 15.10.2003. – Бюл. № 10.
7. Повышение сопротивления усталости сварных соединений металлокопструкций высокочастотной механической проковкой (Обзор) [Текст] / Л. М. Лобанов и др. // Автомат. сварка. – 2006. – № 9. – С. 3-11.
8. Эффективность применения ультразвуковой обработки для повышения сопротивления усталости сварных соединений [Текст] / П. П. Михеев и др. // Автомат. сварка. – 1984. – № 3. – С. 4-7.
9. Лобанов, Л. М. Підвищення ресурсу зварних металокопструкцій високочастотною механічною проковкою [Текст] / Л. М. Лобанов, В. І. Кир'ян, В. В. Книш // ФХММ. – 2006. – № 1. – С. 56-61.
10. Кир'ян, В. І. Продовження терміну експлуатації зварних металевих прогонових будов мостів з

- тріщинами втоми [Текст] / В. І. Кир'ян, В. В. Книш, Г. О. Линник // Автомобільні дороги та дорожнє будівництво. Сучасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення. – 2006. – № 73. – С. 121-126.
11. Кир'ян, В. І. Продовження ресурсу металевих прогонових будов залізничних мостів з втомними пошкодженнями [Текст] / В. І. Кир'ян, В. В. Книш, О. З. Кузьменко // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. – К.: ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, 2006. – С. 358-360.
12. ЦП-0176 Рекомендації з огляду, підсилення, ремонту та збільшення експлуатаційного ресурсу суцільностінчатих зварних прогонових будов [Текст] / В. І. Кир'ян та ін. – К.: Укрзалізниця. Головне управління колійного господарства, 2007. – 48 с.

Надійшла до редколегії 20.12.2008.