

АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона

На правах рукопису

**ДОБИКІНА**  
*Олена Костянтинівна*

ОПІР ВТОМІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ  
ПРИ ЦИКЛІЧНОМУ СТИСНЕННІ  
З УРАХУВАННЯМ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ  
Й ЗАСОБИ ЗБІЛЬШЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ

05.03.06 —

технологія і машини зварювального виробництва

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеню  
кандидата технічних наук

Київ 1993

ЛІНБ України ім. В. Стефаніка



00802678 (V)

Роботу виконано в Інституті електрозварювання  
м. Є. О. Патона АН України й на ОО "НКМЗ" (м. Краматорськ).

Науковий керівник: доктор технічних наук МІХЄЕВ П. П.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук ГАРФ З. Ф.,  
доцент, кандидат технічних наук  
СМЕЛЬЯНОВ О. А.

Головне підприємство: УкрНДІпроектстальконструкція  
(м. Київ)

Захист дисертації відбудеться "27" листопада 1993 р. на  
засіданні спеціалізованої вченої ради (К 016.08.01) при Інституті  
електрозварювання ім. Є. О. Патона АН України (252650, Київ 5, МСП,  
вул. Боженка, 11).

Ваш відгук на автореферат (1 примірник, завірений печаткою)  
просимо надіслати за вказаною вище адресою.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці  
Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона АН України.

Автореферат розісланий "24" вересня 1993 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради, кандидат технічних наук

Нестеренков В. М.

ЛІНБ ім. В. Стефаніка  
АН України

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність. Зварні елементи металокопструкцій машин і споруд в багатьох випадках при експлуатації підпадають під вплив циклічного стиснення. Їх надійність та довговічність визначаються, головним чином, опором зварних з'єднань руйнуванню від втоми. Практика експлуатації цілого ряду зварних металокопструкцій (стріли екскаваторів-драглайнів, прольотні будови залізничних та автодорожніх мостів, підкранові балки та ін.) показує, що незважаючи на виконання вимог норм проектування та розрахунку на втому, у стиснутих зварних вузлах нерідко виникають та розповсюджуються тріщини втоми. В деякій мірі це обумовлено тим, що вітчизняні норми базуються на недостатньо обгрунтованих даних про опір втомі зварних з'єднань при циклічному стисненні, а також тим, що регламентовані розрахункові методики не враховують ролі ряду головних факторів, що визначають опір втомі зварних з'єднань копструкцій, які сприймають дію стиску-ючих навантажень. Подібні недоліки властиві й зарубіжним нормам проектування зварних копструкцій. У зв'язку з цим постановка експериментальних та теоретичних досліджень, спрямованих на визначення закономірностей опору втомі зварних з'єднань при циклічному стисненні з урахуванням конструктивно-технологічних факторів, що відображають працездатність копструкцій, розробка методів розрахункової оцінки меж витривалості з'єднань, обгрунтування областей застосування найбільш ефективних способів збільшення циклічної довговічності з'єднань, є актуальним завданням проблеми удосконалення зварних копструкцій.

Мета роботи. На основі експериментальних та теоретичних досліджень встановити загальні закономірності опору втомі зварних з'єднань в умовах циклічного стиску в залежності від величини та знаку залишкових зварних напружень (ЗЗН), властивостей матеріалу, виду зварних з'єднань, режимів навантажування; розробити метод розрахункового визначення меж витривалості зварних з'єднань з урахуванням ЗЗН, концентрації напружень (КН) та асиметрії циклу; дослідити ефективність конструктивно-технологічних засобів підвищення опору втомі зварних елементів під впливом стиску-ючих навантажень та визначити галузі їх раціонального застосування.

Методи дослідження. Для експериментальних досліджень вибрани зварні з'єднання, які відтворюють не лише масштаб, матеріал, вид з'єднання, технологію зварювання та зварювальні матеріали, а й залишкову напруженість, що відповідає реальним копструкціям, зокрема, стрілам екскаваторів-драглайнів виробництва ОО "НІКМЗ". При випробуваннях на втому зварних з'єднань на машині УРС 200/20 конт-

роль діючих напружень здійснювали методом тензометрії. Для вимірювання вихідних та дослідження кінетики полів залишкових напружень в процесі циклічного навантаження зварних зразків використовувались методи руйнувальної тензометрії та неуруйновий акустичний спосіб. Обробка експериментальних даних та побудова діаграм граничних напружень (ДГН) для області циклічного стиснення здійснювались на ПЕОМ.

Наукова новина. На основі результатів експериментальних та теоретичних досліджень встановлені нові закономірності опору втомі зварних з'єднань конструкцій при циклічному стисненні. Показано, що превалюючим фактором, що знижує опір втомі зварних з'єднань при досліджених режимах навантаження, є розтягуючі ЗЗН. У тих випадках, коли останні досягають граничних значень ( $\sigma_{ост} = \sigma_T$ ), величина КН, обумовлена типом з'єднань, практично не змінює циклічну довговічність та межі витривалості зварних з'єднань. Зі зниженням величини розтягуючих ЗЗН починає у значній мірі проявлятися роль КН в процесах втомі зварних з'єднань. При цьому, характер впливу КН на опір втомі з'єднань стає подібним із впливом КН в умовах знакозмінного чи розтягуючого навантаження.

Застосування неуруйнового акустичного методу виміру ЗЗН показало, що при номінальних напруженнях, які відповідають багаточисловій області навантаження стисненням ( $\sigma_{min} = 0,3 \dots 0,4 \sigma_T$ ), ЗЗН розтягування в більшості видів зварних з'єднань не релаксують.

Розроблено розрахункову методику визначення витривалості зварних з'єднань в області стиснення з урахуванням спільного впливу ЗЗН, КН та асиметрії циклу і прогнозування ефективності зміцнюючих обробок. Обґрунтовані значення розрахункового опору втомі зварних з'єднань при циклічному стисненні, дано оцінку ефективності конструктивно-технологічних засобів збільшення довговічності конструкцій.

Практична цінність. Розроблена розрахункова методика дозволяє у достатню для практики проектування точністю встановлювати значення меж витривалості зварних з'єднань в залежності від рівня ЗЗН, КН та асиметрії циклу стосовно умов навантаження циклічним знакосталім чи переважним стисненням. Розрахункова методика опробована при оцінюванні циклічної довговічності зварних з'єднань і вузлів стиснених поясів стріл екскаваторів-даглайнів виробництва ОО "НКМЗ".

Обґрунтовано доцільність застосування двох засобів зміцнення (термічна та ультразвукова обробки), які ґрунтуються на перерозподілі ЗЗН, що забезпечують суттєве підвищення опору втомі зварних з'єднань. На ОО "НКМЗ" пройшла дослідно-промислову перевірку і за-  
проваджується у виробництво ультразвукова ударна обробка зварних

з'єднань стріл екскаваторів-драглайнів.

Розроблений і захищений авторським свідоцтвом конструктивний засіб регулювання загального напруженого стану зварних несучих елементів нижніх поясів стріл екскаваторів-драглайнів, що виключають зруйнування від втоми зварних з'єднань в процесі експлуатаційних циклічних стискуючих навантажень. На основі цього винаходу розроблено технічний проект нової стріли екскаватора-драглайна ЕШ 12/100.

Експериментально обґрунтовано доцільність використання в екскаваторах-драглайнах стріл із гратчастими стисненими поясами, як менш металомістких. Економічний ефект у результаті переходу на нову конструкцію стріли в машині ЕШ 12/100 порівняно з базовою моделлю ЕШ 10/100 становитиме приблизно 2,5 млн. крб. за цінами 1992 року. Часткова участь автора - 25%.

На захист вносяться. загальні закономірності опору втомі зварних з'єднань при циклічному стисненні, визначені у взаємозв'язку з умовами проявлення ефектів КН та ЗЗН; встановлено особливості кінетики ЗЗН в залежності від величини зовнішнього стискаючого навантаження й типу зварного з'єднання; результати експериментальних досліджень опору втомі зварних з'єднань при циклічному стисненні, одержані з урахуванням конструктивно-технологічних факторів, які визначають працездатність реальних конструкцій; розрахована методика встановлення меж витривалості зварних з'єднань в області стиснення з урахуванням ЗЗН, КН та асиметрії циклу; обґрунтування областей застосування конструктивно-технологічних засобів підвищення опору втомі елементів зварних конструкцій, які сприймають в умовах експлуатації дію циклічного стиснення.

Апробація роботи. Основні положення роботи докладалися та обговорювалися на всесоюзній нараді "Міцність і надійність екскаваторів для відкритих гірних робіт" (Красноярськ, 1988р.), 1-й Міжнародній конференції молодих фахівців в галузі зварювання та смежних технологій (Київ, 1989р.), Міжнародній конференції "Зварні конструкції" (Київ, 1990р.). В цілому робота обговорювалася на семінарі у відділі міцності та тематичному семінарі "Зварні конструкції" ІЗЗ ім. Є. О. Патона АН України (Київ, 1992р.).

Публікації. Основний зміст дисертаційної роботи викладено в п'ятьох публікаціях, захищено одним авторським свідоцтвом.

Обсяг та структура дисертаційної роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, переліку літератури (105 найменувань), додатка, має 123 сторінки машинописного тексту, 51 ілюстрацію, 12 таблиць.

У вступі обгрунтовано актуальність теми, сформульовано мету, показано наукову цінність і практичну цінність роботи, викладені основні положення, що виносяться на захист.

В першій главі розглянуто й проаналізовано на основі літературних даних причину руйнування від втоми втомленості зварних елементів металоконструкцій, що зазнають в умовах експлуатації дію повторно-амінного стиснення; розглянуто наявні методи розрахунку на втому зварних з'єднань, принципи призначення розрахункових опорів втомі зварних з'єднань стосовно умов стиснення; представлено огляд і аналіз раніше проведених досліджень опору втомі зварних з'єднань в області переважного стиснення; обгрунтовано й сформульовано мету і завдання дослідження.

У другій главі викладено методика випробувань на втому. Наведено результати експериментальних досліджень опору втомі зварних з'єднань при циклічному стисненні. Викладено методика виміру полів ЗЗН у зварних з'єднаннях, а також показано результати досліджень, що дозволили визначити закономірності зміни ЗЗН в умовах дії циклічного стиснення.

У третій главі обгрунтовано вихідні положення методики розрахункової оцінки меж витривалості зварних з'єднань в області циклічного стиснення; узагальнено результати експериментальних досліджень з позицій запропонованого підходу до оцінки спільного впливу ЗЗН, КН та асиметрії циклу на опір втомі зварних з'єднань при циклічному стисненні; наведено розрахункові співвідношення для визначення граничних напружень циклу зварних з'єднань при циклічному стисненні; дане обгрунтування доцільності застосування конструктивно-технологічних засобів підвищення опору втомі зварних з'єднань.

У четвертій главі обгрунтовано значення розрахункового опору втомі зварних з'єднань у вихідному стані і після додаткових зміцнюючих обробок. Дано рекомендації з приводу застосування технологічних і конструктивних засобів підвищення опору втомі зварних з'єднань застосовно умов повторно-амінного стиснення. Наведено приклади практичної реалізації на ОО "ННМЗ" результатів роботи (стріла кскаватора-драглайна).

#### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Значна частина елементів зварних машинобудівних та будівельних металоконструкцій експлуатується в умовах повторно-амінного стиснення. Несуча здатність таких конструкцій визначається головним чином опором зварних з'єднань руйнуванням від втоми. У відомій літературі, керівних технічних матеріалах і нормативних документах немає

достатньо обґрунтованих даних як про опір втомі зварних елементів, що експлуатуються в умовах повторно-змінного стиснення, так і про конструкторсько-технологічні засоби підвищення опору втомі зварних з'єднань і елементів. Як показує практика експлуатації машинобудівельних та будівельних зварних конструкцій, вказані дані необхідні для забезпечення необхідної надійності та довговічності подібних конструкцій.

На сьогодні існує відносно обмежений обсяг експериментальних досліджень (Gurney T. R., Oliver R., Ritter W., Дучинський Б. М., Гувевич Ю. Д.), що стосуються вказаної галузі досліджень. Так, наприклад, у роботах Gurney T. R. показано, що при віднульовому розтягу та стисненні меж витривалості однотипних зварних з'єднань однакові. Крім того, для зварних з'єднань з граничним рівнем розтягуючих ЗЗН та КН  $\alpha_{\sigma} = 1,7$  та  $2,5$  при віднульовому стисненні отримано значення меж витривалості  $110 \text{ МПа}$  та  $65 \text{ МПа}$  відповідно. В той же час у дослідженнях, проведених на ОО "НКМЗ", одержана приблизна рівність меж витривалості зварних з'єднань з різною КН ( $\alpha_{\sigma} = 1,4$  і  $2,5$ ) при  $R_{\sigma} = 10$ :  $\sigma_R = 200 \text{ МПа}$  та  $193 \text{ МПа}$ . У каталозі Oliver R., Ritter W. систематизовано великий обсяг експериментальних даних стосовно опору втомі зварних з'єднань в області переважливого стиснення, який свідчить про значне розсіяння меж витривалості зварних з'єднань, але не пояснює його причин і, крім того, не дає можливості виявити загальні закономірності опору втомі зварних з'єднань в області циклічного стиснення. Дучинським Б. М. запропонована побудова ДГН на основі прямолінійної екстраполяції ліній граничних напружень із області розтягу в область стиснення та проведено ряд експериментів, результати яких узгоджуються із запропонованими ДГН. Проведені зіставлення результатів досліджень Ілінойського університету в цій галузі також не суперечать ДГН, побудованим на основі прямолінійної екстраполяції. Однак на ОО "НКМЗ" експериментально отримані криві втомі двох типів зварних з'єднань, що показують суттєве збільшення значень граничних амплітуд (при зростанні абсолютного значення середніх напружень циклу в області стиснення) порівняно з ДГН, рекомендованими Дучинським Б. М. Крім того, використання вказаних ДГН може привести до погрешностей при визначенні меж витривалості зварних з'єднань, оскільки ці діаграми не враховують особливостей опору втомі зварних з'єднань в умовах дії циклічного стиснення, обумовлених впливом основних факторів: КН, ЗЗН та асиметрії циклу. Таким чином, простежуються значні суперечності результатів досліджень, а також пояснень особливостей процесів втомі у вказаних умовах навантаження.

Запобігання руйнуванню елементів зварних конструкцій від втоми при дії змінного стиснення, підвищення їх несучої здатності при одночасному зниженні металомісткості може бути досягнуте на основі удосконалення розрахункових методів, використання в практиці проектування експериментально обґрунтованих даних про опір втоми зварних стиснених елементів, їх раціонального конструктивного оформлення, а також застосування ефективних засобів підвищення опору втоми зварних елементів конструкцій.

Таким чином, з'ясування загальних закономірностей опору втоми зварних з'єднань в умовах переважного стиснення і використання в розрахунках обґрунтованих значень меж витривалості зварних з'єднань, які враховують вплив ЗЗН, КН та асиметрії циклу, є актуальним завданням.

На основі аналізу літературних даних, а також виходячи з вимог проектування та експлуатації зварних конструкцій, сформульовані основні завдання дисертаційної роботи: провести експериментальні дослідження опору втоми при циклічному стисненні основних типів зварних з'єднань; з результатів проведених експериментальних досліджень визначити загальні закономірності опору втоми стиснених зварних елементів, в тому числі визначити роль основних факторів, що визначають опір зварних з'єднань руйнуванням від втоми в умовах вказаного навантаження; опрацювати метод розрахункового визначення меж витривалості з урахуванням основних факторів - ЗЗН, КН та асиметрії циклу; експериментально оцінити ефективність конструктивно-технологічних засобів підвищення опору втоми зварних з'єднань при циклічному стисненні; обґрунтувати значення розрахункових опорів втоми зварних з'єднань елементів конструкцій, що сприймають циклічне стиснення.

Виконаний комплекс експериментальних досліджень містив в собі випробування на втому основних типів зварних з'єднань (матеріал Ст3 та 10ХСНД) та вимірювання полів ЗЗН, в тому числі й їх кінетику при циклічному навантаженні.

Випробування на втому здійснювались на дослідній установці УРС 200/20 з використанням зварних зразків, кожен з яких містив до чотирьох типів зварних з'єднань, характерних зварним вузлам стріл екскаваторів-драглайнів, і відображував не лише конструктивну форму, але й високу залишкову напруженість реальних зварних елементів конструкцій.

Прийнята методика експериментальних досліджень дозволила отримати не лише порівняльні дані про опір втоми зварних з'єднань з різноманітною КН у ході випробування одного зразка, але й суттєво ско-

ротити обсяг і час проведення випробувань.

Отримані результати експериментальних досліджень дали можливість встановити, що основним фактором, який визначає опір втомі зварних з'єднань при дії стискуючих навантажень, є ЗЗН розтягу в зонах концентраторів. КН у вказаних умовах стає другорядним фактором.

Особливо слід відзначити, що зварні з'єднання з відносно малою КН  $\alpha_K=1,4$  (фасонка, приварена у стик) незалежно від режимів навантаження в усіх випадках мали тріщини від втоми в зонах КН. Доречі, навіть зменшення КН (пристрій радіусів біля кінців фасонки) не виключало утворення тріщини від втоми. В той же час в зварних з'єднаннях з більшою КН (повдовжнє ребро  $\alpha_K=2,33$ ) тріщини від втоми виникали не завжди, а останні з'єднання мали набагато більшу довговічність, ніж перші. Це зумовлено тим, що зварні з'єднання з повдовжнім ребром мали знижені ЗЗН розтягу порівняно із з'єднаннями першого виду.

Аналіз раніше отриманих результатів випробувань на втому виявив значний розкид довговічностей і меж витривалості різних видів зварних з'єднань при циклічному стисненні. В ході виконаних досліджень показано, що даний розкид пов'язаний з підвищеною чутливістю зварних з'єднань в умовах стиснення до різня ЗЗН в зонах КН.

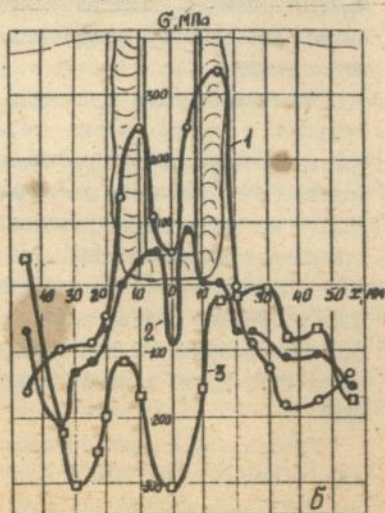
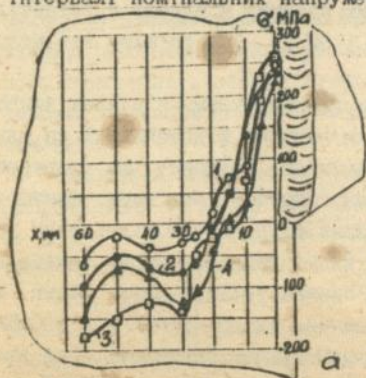
Найбільш важливою особливістю, встановленою в результаті проведених випробувань на втому при циклічному стисненні, є те, що при  $R_K=3,0 \dots 3,3$  в жодному з досліджених зварних з'єднань в інтервалі зміни коефіцієнта концентрації від 1,32 до 2,5 тріщини від втоми не виникали.

Частина зразків з чотирма досліджуваними видами з'єднань випробувалась у стані після термообробки (високе відпускання) та ультразвукової ударної обробки, заснованих на зніманні та перерозподілі ЗЗН. Тим чином досліджено вплив одного з основних факторів (ЗЗН), що визначає опір зварних з'єднань руйнуванням від втоми при стискаючих навантаженнях. Результати випробувань на втому показали, що в жодному з досліджених зварних з'єднань тріщини від втоми не спостерігались при навантаженні стисненням аж до  $\sigma_{\text{min}} = -200 \text{ МПа}$ . Одержані результати підтвердили, що домінуючим фактором, який визначає опір втомі зварних з'єднань у вказаних умовах навантаження, є ЗЗН.

Паралельно з випробуваннями на втому в аналогічних зразках виконано вимір полів ЗЗН неакуризованим ультразвуковим методом. Сперше отримані закономірності перерозподілу ЗЗН під дією циклічних стискаючих навантажень. Вимірювались початкові ЗЗН, а також ті, які

встановилися після навантаження зовнішнім стисненням різного рівня, що викликає номінальні напруження  $\sigma_{\text{min}}=0,4\sigma_t$ ;  $0,78\sigma_t$ ;  $0,9\sigma_t$ . Рівень навантаження  $\sigma_{\text{min}}=0,4\sigma_t$  відповідав напруженням, при яких в досліджуваних зонах зразака зароджувалися й поширювалися тріщини від втоми в ході випробувань при віднольовому стисненні. Встановлено, що зміна початкового рівня ЗЗН відбувається при перших циклах навантаження. З підвищенням рівня зовнішнього стискаючого навантаження інтенсивність змінення початкових ЗЗН зростає. Змінення початкового рівня ЗЗН розтягу під дією зовнішнього навантаження стисненням відбувається головним чином за рахунок зміни зрівноважувачих їх початкових ЗЗН стиснення. Останні змінюються лише тоді, коли сума напружень від зовнішнього навантаження стисненням й ЗЗН стиснення перевищує межу текучості матеріалу при стисненні.

У всіх досліджуваних типах зварних з'єднань після навантаження стисненням до  $\sigma_{\text{min}}=0,4\sigma_t$  ЗЗН розтягу в зонах концентраторів повністю не зникають. При цьому в окремих типах з'єднань ЗЗН розтягу змінюються незначно та зберігають початковий рівень (мал. 1, а). Тому в ході випробувань на втому даних зразків при віднольовому циклічному стисненні з напруженнями  $\sigma_{\text{min}}=-120 \dots -160\text{МПа}$  в цих з'єднаннях тріщини від втоми зароджувалися і розповсюджувалися в полях ЗЗН розтягу. Вказана особливість, яка складається в тому, що для багатьох досліджуваних типів зварних з'єднань при навантаженні стисненням в інтервалі номінальних напружень, що відповідають багатоцикловій об-



Мал. 1. Розподіл ЗЗН в зварних вузлах: а - фасонка, приварена у стик; б - поздовжнє ребро, приварене вугловим швом по контуру. 1 - початкові ЗЗН; 2-4 - ЗЗН, що встановилися після зовнішнього навантаження стисненням  $-160\text{МПа}$ ;  $-270\text{МПа}$ ;  $-350\text{МПа}$  віднольово.

ласті ( $\sigma_{\min}=0,3 \dots 0,4 \sigma_t$ ), ЗЗН розтягу практично не змінюються, врахована в розрахунковій методиці визначення меж витривалості зварних з'єднань.

Із збільшенням рівня навантаження стисненням до  $\sigma_{\min}=0,75 \sigma_t$  та  $\sigma_{\min}=0,9 \sigma_t$  у більшості типів зварних з'єднань залишкові напруження розтягу знімаються і навіть переходять у стискаючі (мал. 1,б). Однак в зварних елементах реальних конструкцій такі рівні навантаження стисненням в переважній більшості випадків не припускаються із-за обмежень за критерієм стійкості несучих елементів. Більш того, навантаження стисненням до граничного рівня, близького з напруженнями, рівними границі текучості основного металу, не гарантує знімання ЗЗН розтягу в зонах КН, наприклад, біля фасонки, привареної у стик (мал. 1,а).

В окремих типах зварних вузлів, наприклад, прикріплення трапецієвидної фасонки у стик, ЗЗН розтягу в зонах концентраторів не знімаються навіть після навантаження стисненням високого рівня  $0,9 \sigma_t$ . Обумовлено це тим, що початкові ЗЗН стиснення мають порівняно низькі рівні, та зони їх розподілу значно віддалені від зон концентрації робочих напружень. На прикладі цього з'єднання досить переконливо підтверджується компенсаційний характер змінення ЗЗН розтягу при зовнішньому навантаженні елементів конструкцій стисненням.

Проведенні дослідження показали, що в усіх випадках тріщини від втоми утворюються біля КН, розташованих в зонах ЗЗН розтягу. В зонах ЗЗН стиснення тріщини від втоми не зароджувались.

Встановлені особливості перерозподілу ЗЗН в елементах конструкцій при зовнішньому навантаженні стисненням необхідно враховувати при оцінці їх впливу на опір втоми зварних з'єднань.

На основі результатів випробувань на втому і встановлених особливостей перерозподілу ЗЗН запропоновано розрахункову методику визначення меж витривалості зварних з'єднань, що сприймають циклічне навантаження стисненням, побудованої на таких вихідних положеннях:

- змінення ЗЗН розтягу має головним чином компенсаційний характер, тобто ЗЗН розтягу змінюються внаслідок релаксації ЗЗН стиснення, яка відбувається в тому випадку, коли сумарні напруження від зовнішнього стискаючого навантаження і початкових ЗЗН стиснення в зоні концентратора перевищують межу текучості при стисненні;
- оскільки при навантаженні стисненням в інтервалі номінальних напружень що відповідають багатоцикловій області ( $0,3 \dots 0,4 \sigma_t$ ), ЗЗН розтягу в більшості випадків практично не релаксують, то цілком при-

пустимо їх початковий рівень при наступному циклічному навантаженні стисненням вважати встановленим;

- опір втомі зварного з'єднання можна розглядати як опір втомі гладкого зразка, напружений стан якого в процесі навантаження відповідає напруженому стану зварного з'єднання в зоні КН з урахуванням ЗЗН. Тоді за граничні значення напружень зварного з'єднання можна прийняти граничні напруження в металі, що відповідає за властивостями досліджуваній зоні з'єднання при відповідних параметрах зовнішнього навантаження.

Рівняння ліній граничних напружень в області стиснення отримані на основі аналізу дійсних циклів з урахуванням ЗЗН в зонах КН в аварних з'єднаннях та лінеаризованих ДГН основного металу і мають вигляд:

$$\sigma_{min}^H = \text{tg}d \cdot \sigma_m^H + \frac{\text{tg}d \cdot \sigma_{ост} - \sigma_{-1} - \sigma_{ост}}{d\sigma} \quad (1)$$

або

$$\sigma_{min}^H = \sigma_{R\sigma} = \frac{(\text{tg}d - 1)\sigma_{ост} - \sigma_{-1}}{d\sigma(1 - \text{tg}d) + (1 + R\sigma)/2R\sigma} \quad (2)$$

де  $\text{tg}d = \frac{\sigma_B + \sigma_{-1}}{\sigma_B}$ ;

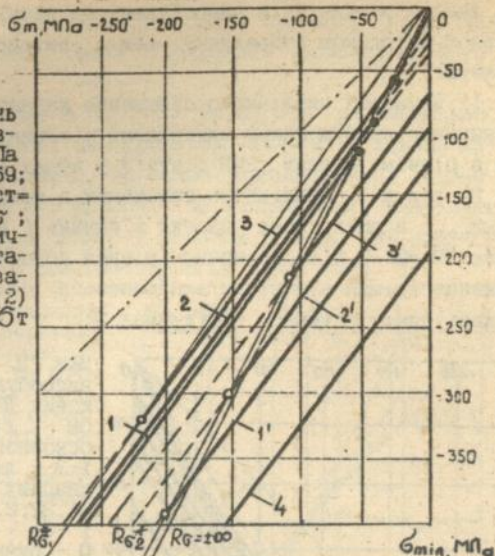
$\sigma_{min}^H$  и  $\sigma_m^H$  - номінальні мінімальні та середні напруження циклу;  $\sigma_{ост}$  - залишкові аварувальні напруження;  $d\sigma$  - теоретичний коефіцієнт концентрації напружень;  $\sigma_{R\sigma}$  - номінальні напруження з урахуванням коефіцієнта асиметрії циклу;  $R\sigma$  - коефіцієнт асиметрії циклу;  $\sigma_B$  - тимчасовий опір основного металу;  $\sigma_{-1}$  - межа витривалості основного металу при симетричному циклі.

На мал. 2 зображені отримані у відповідності з рівняннями (1), (2) лінії граничних напружень аварних з'єднань сталі 10ХСНД при властивих для реальних аварних конструкцій значеннях коефіцієнта концентрації і двох рівнях ЗЗН розтягу, рівних  $\sigma_T$  та  $0,25 \sigma_T$ .

Отримані граничні напруження циклу однотипних аварних з'єднань СтЗ та 10ХСНД в ЗЗН розтягу, рівними  $\sigma_T$ , практично співпадають. Результати випробувань на втому також не показують суттєвої різниці в межах витривалості.

Побудовані на основі розрахункових співвідношень (1), (2) ДГН циклу відчать про те, що значення меж витривалості аварних з'єднань при циклічному стисненні у великій мірі визначаються рівнем початкових ЗЗН розтягу. Окрім того, при циклічному стисненні ЗЗН розтягу можуть змінювати опір втомі аварних з'єднань в більшій мірі, ніж КН, обумовлена формою з'єднання: з'єднання з підвищеною КН

Мал. 2. ДГН зварних з'єднань сталі 10ХСНД: 1-3 - при рівні ЗЗН  $\sigma_{ост} = \sigma_t = 400 \text{ МПа}$  та відповідних  $\alpha \sigma = 1,32; 1,69; 2,33$ ; 1'-3' - при рівні  $\sigma_{ост} = 0,25 \sigma_t = 100 \text{ МПа}$  й тих же  $\alpha \sigma$ ; 4 - лінія мінімальних граничних напружень основного металу;  $R_{\sigma 1}$  та  $R_{\sigma 2}$  - межі застосовності рівнянь (1), (2) за  $R_{\sigma}$  для  $\sigma_{ост} = \sigma_t$  й  $0,25 \sigma_t$  відповідно.



( $\alpha \sigma = 2,33$ ) та низьким рівнем ЗЗН розтягу мають вищі межі витривалості (приблизно  $210 \text{ МПа}$  при  $R_{\sigma} = 100$ ), ніж з'єднання із зниженою КН ( $\alpha \sigma = 1,32$ ), але високим рівнем початкових ЗЗН розтягу (приблизно  $110 \text{ МПа}$  при  $R_{\sigma} = 100$ ). Результати випробувань на втому показали, що й довговічність за моментом зародження тріщини від втоми у з'єднань з вищою КН та низькими ЗЗН розтягу більша, ніж у з'єднань з малою КН, але високими ЗЗН розтягу.

Крім того, різниця (за абсолютною величиною) між межами витривалості зварних з'єднань з різними КН і високими ЗЗН стає меншою, ніж різниця між межами витривалості зварних з'єднань в низьких ЗЗН розтягу.

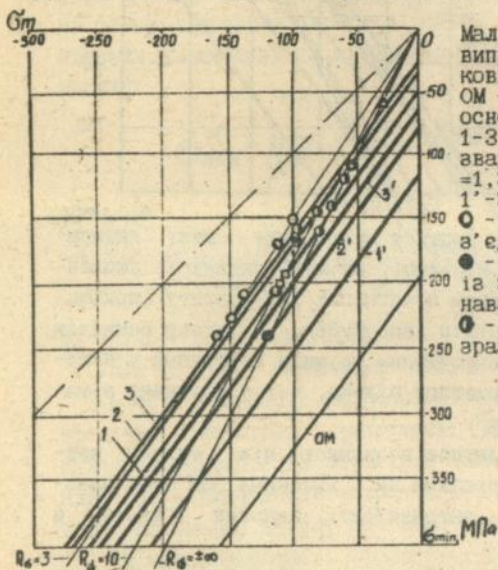
При граничному рівні ЗЗН розтягу межі витривалості зварних з'єднань незначно змінюються в залежності від КН. При  $\sigma_{ост} = \sigma_t$  змінення  $\alpha \sigma$  от 1,32 до 2,33 веде до зниження межі витривалості з'єднань сталі 10ХСНД лише на  $50 \text{ МПа}$ , а з'єднань сталі Ст3 - на  $45 \text{ МПа}$ . При ЗЗН розтягу  $\sigma_{ост} = 0,25 \sigma_t$  підвищення КН з 1,32 до 2,33 викликає зниження меж витривалості зварних з'єднань сталі 10ХСНД на  $162 \text{ МПа}$ , а сталі Ст3 - на  $99 \text{ МПа}$ .

Зіставлення експериментальних даних і ДГН в області стиснення, одержаних аналітичним шляхом, свідчить, що розрахункові дані цілком узгоджувалися з результатами експериментів інших досліджень. Зокрема, на мал. 3 показані межі витривалості зварних з'єднань  $\alpha \sigma = 2,5$  та  $1,7$  з і, ширчим рівнем ЗЗН розтягу, одержаним Curney T. R. ( $\Delta$ ); межі витривалості зварних з'єднань з високими ЗЗН розтягу в зонах КН ( $\alpha \sigma = 2,5$  та  $1,4$ ), одержаними на 00"НМЗ" ( $\square$ ).

Аналіз результатів випробувань на втому у зіставленні з запропонованою методикою розрахунку меж витривалості зварних з'єднань показує:

1) в умовах циклічного стиснення характерна значна різниця між граничними напруженнями однотипних з'єднань, яка пов'язана перш за все з рівнем сталей ЗЗН розтягу у зонах КН (мал. 3);

2) при дії циклічного стиснення з коефіцієнтом асиметрії циклу  $R_{\sigma} = 3 \dots 1$  в усіх типах зварних з'єднань (навіть у з'єднаннях з великою КН  $\alpha_{\sigma} = 2,5$  та граничним рівнем початкових ЗЗН розтягу  $\sigma_t$ ) виникнення тріщин від втоми виключається аж до рівня мінімальних напружень циклу  $\sigma_{\min} = -\sigma_t$  (мал. 3).



Мал. 3. Зіставлення результатів випробувань на втому та розрахункових ДГН:

OM - лінія граничних напружень основного металу (сталь 10ХСНД);  
1-3 - лінії граничних напружень зварних з'єднань відповідно  $\alpha_{\sigma} = 1,32; 2,0; 2,33$  та  $\sigma_{\text{ост}} = \sigma_t$ ;  
1'-3' - те ж при  $\sigma_{\text{ост}} = 0,25 \sigma_t$ ;  
○ - руйнувань немає в жодному із з'єднань;  
● - руйнування є хоча б в одному із з'єднань на заданому режимі навантаження;  
⊙ - руйнування є, але не на усіх зразах.

Запропонована та експериментально обгрунтована розрахункова методика дозволяє визначати значення меж витривалості необроблених зварних з'єднань при знакосталому циклічному стисненні в залежності від величини ЗЗН розтягу, КН та коефіцієнта асиметрії циклу  $R_{\sigma}$ .

При визначенні меж витривалості необроблених зварних з'єднань з ризику проектування зварних елементів, що сприймають циклічне стиснення, напевне, доцільно виходити із заданих (в залежності від відповідальності зварних елементів) значень ЗЗН в зонах КН. Для особливо відповідальних зварних елементів, в яких при експлуатації тріщини від втоми неприпустимі, при визначенні меж

витривалості з'єднань за формулою доцільно приймати граничний рівень ЗЗН розтягу, рівним межі текучості основного матеріалу  $\sigma_{\text{т}}$ .

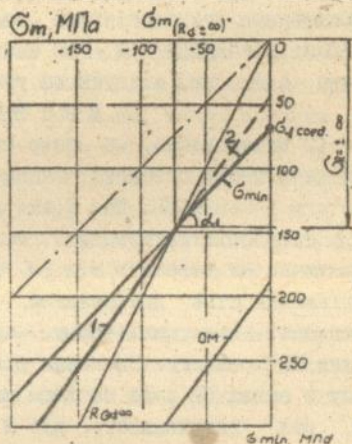
В області асиметрії циклу з  $R_{\sigma} = \pm\infty$  до  $R_{\sigma} = -1$  рекомендовано обчислювати межі витривалості необроблених зварних з'єднань виходячи з ліній граничних напружень, на основі прямолінійної апроксимації шляхом з'єднання на ДГН крапок, що відповідають значенням меж витривалості зварних з'єднань з високим річнем ЗЗН розтягу при віднульовому стисненні та при симетричному циклі (мал. 4).

Мал. 4. Визначення меж витривалості зварних з'єднань в області переважного стиснення в межах асиметрії циклу навантаження з  $R_{\sigma} = -1$  до  $R_{\sigma} = \pm\infty$ : 1 - лінія граничних напружень в області знакосталого стиснення; 2 - те ж в області переважного стиснення з  $R_{\sigma} = -1$  до  $R_{\sigma} = \pm\infty$ .

Рівняння лінії граничних напружень для області переважного стиснення  $R_{\sigma} = \pm\infty$ :

$$\sigma_{R_{\sigma}} = \frac{\sigma_{\pm\infty} \cdot \sigma_{\pm\infty}}{2(\sigma_{\pm\infty} - \sigma_{1(\text{серед})})} + \frac{\sigma_{\pm\infty}}{2R_{\sigma}} - \sigma_{\pm\infty}$$

$\sigma_{\pm\infty}$  та  $\sigma_{1(\text{серед})}$  межі витривалості зварного з'єднання при віднульовому стискаючому та симетричному циклах.



Встановлені експериментально та обґрунтовані з позицій розрахункової методики особливості опору втомі зварних з'єднань в області циклічного стиснення дозволили рекомендувати як конструктивний засіб підвищення опору втомі зварних елементів стріли екскаватора-драглайна попереднє (додаткове) дотиснення останньої, що забезпечує більш сприятливу асиметрію циклу у зварних вузлах. На основі результатів експериментальних досліджень встановлено й обґрунтовано значення коефіцієнту асиметрії циклу  $R_{\sigma} = 3,0$ , при якому виникнення тріщин від втоми у зварних з'єднаннях навіть з граничними рівнями ЗЗН розтягу, виключається. Стосовно ґратчастих конструкцій стріл великої довжини екскаваторів-драглайнів на цій основі запропоновано засіб збільшення довговічності зварних вузлів стріли екскаватора-драглайна ЕШ 12/100, який захищено авторським свідоцтвом і використано при проектуванні стріли нового типу.

Встановлені в даній роботі закономірності опору втомі зварних з'єднань при циклічному стисненні обумовлюють принципи відміни у

підході до вибору й обґрунтуванню засобів обробок, спрямованих на підвищення опору втомі конструкцій порівняно з умовами навантаження з'єднань переважним розтягом. Це зумовлене насамперед тим, що при циклічному стисненні опір зварних з'єднань руйнуванням від втоми визначається головним чином величиною ЗЗН розтягу. Роль КН при цьому стає другорядною. Виходячи з цього, засоби підвищення опору втомі зварних з'єднань несучих елементів конструкцій, навантажуваних в умовах експлуатації змінним стисненням, повинні базуватися насамперед на зніманні ЗЗН розтягу та їх перерозподілі. Найбільш ефективними технологічними засобами підвищення опору втомі зварних елементів конструкцій, що експлуатуються в умовах циклічного стиснення, є високий відпуск та ультразвукова ударна обробка.

### В И С Н О В К И

1. Встановлено, що опір зварних з'єднань руйнуванням від втоми при циклічному стисненні визначається головним чином величиною ЗЗН розтягу в зонах КН. При рівні вихідних ЗЗН розтягу, що досягає межі текучості матеріалу, межі витривалості зварних з'єднань практично не залежать від КН, тобто фактор КН у вказаних умовах навантаження стає другорядним. Вплив КН на опір втомі зварних з'єднань при циклічному стисненні збільшується із зменшенням рівня ЗЗН розтягу. Змінення рівней початкових та усталених ЗЗН розтягу в зонах КН веде не лише до значного розсіяння довговічностей та меж витривалості, але й визначає можливість ініціювання або виключає виникнення тріщин від втоми при тих самих режимах навантаження, або наявність тріщин від втоми з меншою КН та меншим розмахом напружень та їх відсутність при більших значеннях КН та розмахах напружень.

2. У всіх випадках тріщини від втоми утворюються біля КН, розташованих в зонах сталих ЗЗН розтягу. В зонах ЗЗН стиснення тріщини від втоми не зароджувалися. Дальший розвиток тріщин спостерігався як в зонах розтягуючих, так і стискаючих ЗЗН.

3. Змінення ЗЗН розтягу при зовнішньому навантаженні стисненням має компенсаційний характер, тобто суттєве зниження ЗЗН розтягу спостерігається лише у тих випадках, коли діючі напруження стиснення викликають релаксацію ЗЗН стиснення. Для деяких типів зварних з'єднань при навантаженні стисненням в інтервалі номінальних напружень, що відповідають багаточисловій області ( $-120\text{МПа} \dots -160\text{МПа}$ , тобто  $3 \dots 0,4 \sigma_t$ ), ЗЗН розтягу практично не змінюються. Більш того, навантаження стисненням до рівня, близького до напружень, рівних межі текучості основного металу, не гарантує знімання ЗЗН розтягу в зонах КН в багатьох типах зварних з'єднань.

4. Розроблена методика розрахункової оцінки меж витривалості зварних з'єднань при циклічному стисненні з урахуванням ЗЗН, КН та асиметрії циклу узгоджується з одержаними у роботі результатами випробувань на втому і може бути використана в інженерній практиці при призначенні розрахункового опору втомі зварних з'єднань, що сприймають в умовах експлуатації дію змінного стиснення.

5. На основі результатів випробувань на втому зварних зразків та моделей ґратчастих конструкцій встановлено, що при циклічному стисненні з коефіцієнтом асиметрії циклу  $R_{\sigma} = 3,0 \dots 3,3$  в усіх досліджуваних зварних з'єднаннях тріщини від втоми не зароджуються аж до рівней мінімальних напружень циклу  $\sigma_{\min} = -210 \text{ МПа} \approx 0,88 \sigma_{\text{т}}$  для Ст3 та  $\sigma_{\min} = -240 \text{ МПа} \approx 0,68 \sigma_{\text{т}}$  для 10ХОНД. Аналіз, проведений з використанням розробленої розрахункової методики, також показав, що в умовах циклічного стиснення з коефіцієнтом асиметрії циклу  $R_{\sigma} = 3,3 \dots 1,0$  у всіх досліджуваних типах зварних з'єднань (навіть з максимальною КН та граничним рівнем ЗЗН розтягу) ініціювання тріщин від втоми практично виключається аж до рівня мінімальних напружень циклів  $\sigma_{\min} = -\sigma_{\text{т}}$  (де  $-\sigma_{\text{т}}$  - межа текучості основного металу при стисненні).

6. Виходячи із встановлених закономірностей опору втомі зварних з'єднань при циклічному стисненні обґрунтовані загальні принципи й обумовлені значення розрахункових опорів втомі для основних типів зварних з'єднань.

7. Експериментально встановлено, що стосовно умов циклічного стиснення технологічні засоби підвищення опору втомі зварних з'єднань, побудовані на перерозподілі чи усуненні ЗЗН розтягу в зонах КН (ультразвукова ударна обробка та високий відпуск), виключають утворення тріщин від втоми і рекомендуються для практичного використання.

8. Обґрунтовано доцільність використання в екскаваторах-доглядальниках стріл із ґратчастими стисненими поясами, що відрізняються зниженою металомісткістю порівняно з трубчастими. З урахуванням встановлених закономірностей опору втомі зварних з'єднань запропоновано конструктивний засіб підвищення циклічної довговічності стиснених зварних вузлів, побудований на регулюванні загального напруженого стану несучих елементів шляхом їх попереднього (додаткового) дотиснення, наприклад, стягуючими канатами.

Основний зміст дисертації викладений у роботах:

1 Буренко А. Г., Добычина Е. К. Сопротивление усталости сварных соединений и несущая способность сварных конструкций при циклическом сжатии // Новые технологии и материалы в тяжелом машиностроении.

- Киев: ИЭС АН Украины, 1987, - с. 99-104 - ДСП.

2. Добыкина Е. П. Особенности сопротивления усталости сварных соединений в условиях циклического сжатия // Тез. докл. I Междунар. конф. молодых специалистов в области сварки и смежных технологий, 16-20 мая 1989г. - Киев: ИЭС АН Украины, 1989, - с. 221-222.

3. Буренко А. Г., Добыкина Е. К. Особенности сопротивления усталости сварных соединений при циклическом сжатии // Тез. докл. Междунар. конф. "Сварные конструкции", 24-28 сент. 1990г. - Киев: ИЭС АН Украины, 1990 - с. 148-149.

4. Добыкина Е. К., Буренко А. Г., Гуца О. И., Михеев П. П., Кот В. Г. Особенности перераспределения остаточных сварочных напряжений в сварных соединениях при циклическом сжатии // Техническая диагностика и неразрушающий контроль - 1992, N 1, с. 38-43.

5. Добыкина Е. К., Буренко А. Г., Михеев П. П., Кудрявцев Ю. Ф. Влияние остаточных напряжений на сопротивление сварных соединений разрушению при циклическом сжатии // Автомат. сварка, 1992, N1, с. 11-14.

6. Буренко А. Г., Добыкина Е. К., Михеев П. П., Кудрявцев Ю. Ф. Особенности усталостного разрушения сварных соединений при циклическом сжатии // Автомат. сварка, 1993, № 1, с. 7-12.

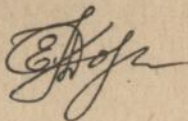
7. Буренко А. Г., Добыкина Е. К., Михеев П. П., Кудрявцев Ю. Ф. Расчетное определение пределов выносливости сварных соединений при циклическом сжатии // Автомат. сварка, 1993, № 2, с. 16-18.

8. Буренко А. Г., Добыкина Е. К., Михеев П. П., Кудрявцев Ю. Ф. Повышение сопротивления усталости несущих элементов сварных конструкций при циклическом сжатии // Автомат. сварка, 1993, № 3, с. 8-12.

9. А. С. 1650880 СССР, МКИ E 02 F 3/48 "Способ повышения несущей способности решетчатой стрелы экскаватора-драглайна" / А. Г. Буренко, Н. А. Стецук, Е. К. Добыкина, А. И. Марченко, В. Н. Синицын. Опубл. 25.05.1991, Бюл. N 19.

Особистий внесок автора. В [1] узагальнені наявні результати випробувань в. втому в області циклічного стиснення. В [2-5] пред- ставлені особливості опору втомі аварних з'єднань в області стиснення, показана особлива роль ЗЗН розтягу при даних умовах навантаження, систематизовані результати виконаних експериментальних досліджень при стисненні з урахуванням впливу основних факторів: ЗЗН, КН та асиметрії циклу; запропоновано розрахункову методику виз-

начення меж витривалості зварних з'єднань при циклічному стисненні. В [6] рекомендовані конструктивно-технологічні засоби підвищення опору втомі несучих елементів зварних конструкцій, що сприймають дію циклічного стиснення.



Підп. до друку 26.07.93. Формат 60x84/16. Пап. офс. № 2. Офс. друк.  
Ум. друк. арк. 0,93. Ум. фарбо-відб. I, I6. Обл.-вид. арк. 0,96.  
Тираж 100 прим. Зам. 398. Безкоштовно.

---

ІЕЗ ім. Є.О.Патона. 252650 Київ 5, МСП, вул. Горького, 69.  
ПОД ІЕЗ ім. Є.О.Патона. 252650 Київ 5, МСП, вул. Горького, 69.

1003020

AB 28.190

Безкоштовно