УДК 539.4

Цибаньов Г.В., докт. техн. наук
Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, tsybanov@ukr.net

ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЦІ ВИТРИВАЛОСТІ СТАЛІ У КОНЦЕНТРАТОРІ НАПРУЖЕНЬ ЗА ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ВТОМИ ГЛАДКИХ ЗРАЗКІВ

При розрахунках втомної довговічності елементів конструкцій за вихідні дані матеріалів приймаються дані, одержані на гладких зразках. В той же час конструкції містять деталі і з'єднання, які відрізняються від гладких поверхонь наявністю зон з геометричними переходами різного масштабу і форми, отворів, галтелей, вирізів, заглиблень. При зовнішньому навантаженні на конструкцію в цих концентраторах напружень виникають поля напружень, які суттєво знижують їх опір руйнуванню у порівнянні з гладкими поверхнями. Так як відмова в експлуатації машинобудівних конструкцій в результаті втоми є однією з самих частих, питанню втоми матеріалів за наявності концентраторів напружень присвячена значна частина досліджень. Багато з існуючих методів оцінки втоми матеріалів за наявності концентраторів напружень вимагають визначення додаткових характеристик матеріалу [1], які не завжди маються при розрахунках. Тому проводяться дослідження у напрямку розробки більш простих розрахункових моделей. Одна з таких моделей – розрахунок за критичними відстанями [2].

У доповіді розглянута можливість застосування цієї моделі для прогнозування границі витривалості плоских зразків з глухими отворами і симетричними боковими вирізами за експериментальними даними гладких зразків (всі експерименти виконані к.т.н. Кононученко О.В. [3]). Глухі отвори виконані діаметрами 0,6 і 1,6 мм, а радіус бокових вирізів становив 1,5 мм і глибину 3,5 мм, у перерізі зразки мали розміри 3×10, 4×16 і , 4×17 мм^2 відповідно.

У відповідності з теорією критичних відстаней (ТКВ) припускається, що втомне пошкодження внаслідок підвищених напружень у концентраторі може бути еквівалентним напруженням, які є середнім значенням в межах лінійно-пружного поля у вершині концентратора. При цьому осереднення виконується на розмірі критичної відстані, яка визначається за залежністю:

$$a_{cr} = \frac{1}{\pi}\left(\frac{\Delta K_{th}}{\Delta\sigma_r}\right)^2, \tag{1}$$

де a_{cr} – критична відстань;

ΔK_{th} – розмах порогового значення коефіцієнта інтенсивності напружень;

$\Delta\sigma_r$ – розмах границі витривалості.

Враховуючи той факт, що границя витривалості матеріалів визначається напруженням, за якого у поверхневому шарі зароджується коротка тріщина, яка не розповсюджується, криві втоми для випробуваних зразків були побудовані як за критерієм остаточного руйнування (для гладких зразків і зразків з боковимиими вирізами), так і за моментом зародження тріщини (для зразків з глухими отворами). Для гладких зразків за зародження тріщини була прийнята розрахункова лінія Френча [4], для зразків з глухими отворами діаметрами 0,6 і 1,6 мм криві втоми побудовані для циклічних довговічностей, які відповідають зародженню поверхневої тріщини розмірами 100 мкм (як стадія зародження тріщини) і 1793 мкм (остаточне руйнування).

Для застосування ТКВ необхідно мати епюру пружного розподілу напружень у концентраторі. Хоч у більшості досліджень з використанням ТКВ для цього застосовують метод скінченних елементів, нами використано аналітичне рішення Кірша [5] для пластини з отвором. Таке рішення дозволяють використовувати співвідношення діаметрів отворів і

ширини зразка. Згідно [5], розподіл нормального напруження у отворі по осі, перпендикулярній прикладеному навантаженню, описується залежністю:

$$\sigma_x = 0{,}5\sigma_{nom} \cdot \left[2 + \left(\frac{\rho}{x_i}\right)^2 + 3\left(\frac{\rho}{x_i}\right)^4\right], \quad (2)$$

де σ_x – нормальне напруження у отворі по осі x, перпендикулярній до осі навантаження;

σ_{nom} – номінальне напруження у зразку;

ρ – радіус отвору у пластині;

x_i - поточна координата по осі x, з початком координат у центрі отвору.

Надалі для номінальних напружень у області багатоциклового навантаження зразків з концентратором напружень визначено кількість циклів до зародження тріщини (N_{in}) з використанням рівняння лінії регресії. Для цих же напружень за залежністю (2) пораховано значення напружень у концентраторі на відстані a_{cr} (позначено як σ_{ax}). За рівнянням лінії регресії для стадії зародження тріщини гладких зразків (лінія Френча) визначено напруження σ_a, які відповідають умові $N_{in}= N_{Fr}$ (N_{Fr} – довговічність, визначена по лінії Френча). У відповідності з ТКВ границя витривалості визначається за умови рівності розмахів напружень $\Delta\sigma_a= \Delta\sigma_{ax}$, тобто $\Delta\sigma_a/\Delta\sigma_{ax}$=1. У нижченаведеній таблиці представлені результати такого розрахунку. Зазначимо, що розрахована у відповідності з (1) величина критичної відстані становить a_{cr}= 147 мкм, а границя витривалості для зразків з глухим отвором 2ρ = 0,6 мм становить σ_r = 160 МПа.

Таблиця – Розрахункові дані для визначення границі витривалості зразків з ρ = 0,3 мм

σ_{nom}, МПа	N_{in}, цикл	σ_{nom}, МПа, при $Nin=N_{Fr}$	$2\sigma_{ax}$, МПа, при $x=a_{cr}$	$\Delta\sigma_a/\Delta\sigma_{ax}$
260	16918	265,43	799,28	0,6641
255	19234	265,17	783,91	0,6765
230	38024	263,74	707,06	0,7460
200	95711	261,82	614,83	0,8517
170	279994	259,61	522,61	0,9935
169,64	283942	259,58	521,50	0,9955
168,83	293062	259,52	519,01	1,0000
165	341022	259,21	507,24	1,0220
160	417880	258,79	491,87	1,0522
155	515375	258,36	476,49	1,0844

Як видно з наведених результатів, умові $\Delta\sigma_a/\Delta\sigma_{ax}$=1 відповідає σ_r =168,83 МПа, що на 5,5% перевищує її експериментально визначене значення. Так як експериментальне визначення границі витривалості виконано за кривою втоми для вірогідності 50 %, таку похибку можна вважати цілком прийнятною. Слід відмітити, що таке ж відхилення дає розрахунок границі витривалості при використанні кривої втоми гладких зразків по остаточному руйнуванню, а не по зародженню тріщини, що дає можливість такого розрахунку без даних по зародженню тріщини. Подібні дані одержані і для двох других концентраторів напружень, що підтверджує придатність дослідженої схеми розрахунку.

Список посилань

1. Peng Luo. A survey on fatigue life analysis approaches for metallic notched components under multi-axial loading / Peng Luo, Weixing Yao, Yingyu Wang and Piao L. // Proc. IMech Eng., Part G, Journ, Aerospace Eng. - Nanjing, China, 2018. – October. - P. 1-21.

2. Taylor, D. The Theory of Critical Distances. A New Perspective in Fracture Mechanics: book / D. Taylor – Oxford: Elsevier, 2007. – 284 p.

3. Herasymchuk O. M. and Kononuchenko O. V. Peculiarities of short fatigue cracks growth from a blind hole in specimens made of steel 45. Part 1. Experimental results // Strength of Materials. – 2021. - №53. – P. 213–221.

4. Tsybanyov, G.V. French Line Prediction for Steels Using Experimental Data to Construct a Fatigue Curve. Part 2. Method Verification and Estimation of Calculation Errors / G.V. Tsybanyov // Strength of Materials. – 2023. - №55. – P. 713–719.

5. Kirsch, E.G. Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre / Kirsch, E.G. // Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure. - 1898. - Vol. 42. - C. 797-807.

УДК 621.79:669.15

Кушнарьова О.С., канд. техн. наук
Берднікова О.М., докт. техн. наук
Григоренко С.Г., канд. техн. наук
Алексеєнко І.І. молод. наук. спів.
Кушнарьова Т.М., наук. спів.
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, olgakus@meta.ua

ВПЛИВ ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА СТРУКТУРНІ ПАРАМЕТРИ ТА МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛУ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СТАЛІ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

На сьогоднішній день при виготовлені відповідальних зварних вузлів металоконструкцій та броньової техніки в оборонній промисловості, які працюють в складних умовах експлуатації використовують високоміцні сталі. Слід відмітити, що більшість зварних з'єднань в конструкціях легкої броньової техніки при експлуатації піддають впливу циклічних навантажень. При циклічному навантаженні в матеріалах відбуваються втомні процеси, які можуть призвести до накопичення мікроушкоджень, зниження характеристик міцності, утворення мікротріщин, тріщин втоми та, відповідно до руйнування конструкцій. Тому особливе значення набувають дослідження впливу структурних факторів на тріщиностійкість металу з'єднань сталей спеціального призначення. Актуальними завданнями є дослідження на всіх структурних рівнях особливостей структуро-фазових перетворень, параметрів зеренної, субзеренної та дислокаційної структури металу зварних з'єднань цих сталей під впливом циклічних навантажень.

Метою роботи було вивчення закономірностей структурно-фазового складу та параметрів структури зварних з'єднань броньової сталі Armox 500 при використанні зварювального дроту аустенітного типів (Св-08Х20Н10Т) після зварювання та експлуатаційних навантажень. Зварювання проводили без попереднього підігріву в середовищі захисних газів Ar+CO_2 на режимі Ізв=180А; Uд=25…26В; Vзв=18м/год. Виконано циклічне навантаження зварних з'єднань при σ=60МПа з кількістю циклів Nц=1080000, Nц=1450000, Nц=1800000. Робота проводилась з використанням комплексу методів досліджень: світлової мікроскопії (Versamet-2, Neophot-32), аналітичної растрової мікроскопії (СЭМ515, фірми «PHILIPS», Нідерланди) та просвічувальної електронної мікроскопії (JEM-200CX, фірми JEOL, Японія).

Методами світової мікроскопії встановлено, що у металі швів зварних з'єднань броньової сталі Armox 500 формується аустенітна структура з розміром зерен Dз=20...90мкм та мікротвердістю HV=1700…2450МПа. Після експлуатаційних навантажень в порівнянні з металом шва в зварному з'єднанні безпосередньо після зварювання (у вихідному стані) розмір зерен зменшується в середньому у 1,3, 1,5 та 1,6 разів при підвищенні HV на 10% та 20% відповідно при Nц=1080000, 1450000, 1800000. В зоні термічного впливу (ЗТВ) зварних з'єднань у вихідному стані формується мартенситно-бейнітна структура при Dз=80...200мкм, HV=4010…4640МПа (ділянка перегріву) та