

УДК 624.014

Про розрахунок сталевих конструкцій на втому за Eurocode

Володимирський В.О., к.т.н.

Київський національний університет будівництва та архітектури, Україна

Анотація. Порівнюється розрахунок на втому на підставі однопараметричного підходу за Eurocode і трипараметричного за СНиП.

Аннотация. Сравняется расчет на усталость на основе однопараметрического подхода по Eurocode и трехпараметрического по СНиП.

Abstract. Comparison fatigue calculation by one-parametry method Eurocode and three-parametry method SNiP.

Ключові слова: сталеві конструкції, втома, діапазон змінності напружень, асиметрія циклу, акумулювання пошкоджень.

Розрахунок несучої здатності на втому за Eurocode 3 – Design of Steel Structures базується на концепції діапазону змінності напружень, який дорівнює амплітуді нормальних $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ або дотичних $\Delta\tau = \tau_{\max} - \tau_{\min}$ напружень.

Якщо в концепції СНиП застосовується коефіцієнт асиметрії циклу $\rho = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$, то циклічна міцність за Eurocode визначається без урахування асиметрії циклу. Передумовою такого підходу є той факт, що в реальних конструкціях у місцях карбів і потенційних втомлювальних тріщин завжди існують розтягувальні напруження як наслідок явища концентрації напружень, які дорівнюють межі текучості σ_t . Тому при повторних навантаженнях циклічні напруження завжди будуть змінюватися від σ_t до σ_{\min} , незалежно від коефіцієнта асиметрії циклу і, таким чином, міцність залежить тільки від діапазону зміни напружень $\Delta\sigma$.

Така передумова вважається справедливою, оскільки конструктивні концентратори або дефекти реальних матеріалів, які існують на рівнях мікро- і макроструктури, завжди зумовлюють напруження на межі текучості. В більшій мірі це притаманне великим зварним елементам і в меншій мірі – малим зварним або незварним елементам. Таким чином для зварних деталей параметр відношення напружень ρ зникає, оскільки σ_{\max} завжди треба приймати як межу текучості сталі при розтягу. Наявність власних напружень, рівних межі текучості, суттєво змінює характер

діапазону зміни напружень. Для сталей ідеально пружнопластичних напруження можуть змінюватися тільки від R_y до σ_{\min} (такий ефект іноді образно називають «ефектом бурульок», що звисають зі стелі).

Сьогодні визнаються принципові недоліки використання концепції відношення напружень $\rho = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ [1]. У більшості випадків зразки лабораторних розмірів, які використовувались для отримання даних при розробленні норм, починаючи з 1950 року, були занадто малими, щоб забезпечити затиснення для формування залишкових напружень. У лабораторіях такі зразки зазвичай мали ширину 100-150 мм і товщину 13 мм. Це означає, що багато з випробуваних зразків не мали високих розтягувальних залишкових напружень, які існують у більшості конструкцій. З цієї причини було вирішено в запас міцності враховувати тільки результати випробувань, отриманих при розтягувальних напруженнях.

У великих конструкціях, у яких не вжито заходів щодо зняття залишкових напружень від зварювання, в потенційних точках руйнування напруження досягають межі текучості основного матеріалу. Таким чином, діючі циклічні напруження в цих точках будуть змінюватися від межі текучості до більш низьких значень, незалежно від номінальних напружень циклу. Отже принциповою особливістю нового підходу до міцності на втому є визнання ролі залишкових напружень як при розтягувальному, так і при стискальному навантаженні. Експериментально доведено, що цикли, які є частково або повністю стискальними, будуть так само небезпечні, як і цикли розтягу. На перший погляд міцність залежить від двох параметрів: R_y до σ_{\min} , але численними дослідженнями доведено, що витривалість зварних швів при великому числі циклів не залежить від статичної міцності матеріалу. Такі результати приймаються для сталей з межею текучості від 230 МПа до 850 МПа. В результаті циклічна міцність для того чи іншого класу стиків залежить тільки від одного параметра $\Delta\sigma$.

Концепція параметра $\Delta\sigma$ має добре експериментальне підтвердження [1]. Результати ілюструють криві регресії σ на N (криві Велера), отримані на «великих» і «малих» зразках. Припускається, що для кожного типу з'єднань ці дані можуть бути описані прямою лінією в логарифмічних координатах. Розрахунки, таким чином, включали обчислення методом найменших квадратів регресивної кривої $\log N$ від $\log \sigma$. В результаті цих розрахунків виявилось, що величина, зворотна нахилу $1/m$ кривої $S - N$, для типів з'єднань, які звичайно вважаються критичними, змінюється приблизно в межах $m = 2,17 - 3,95$.

Прийнято, що для зварних елементів має місце досить стабільний направляючий коефіцієнт $m = 3$, незалежно від коефіцієнта асиметрії циклу ρ .

Вибір $m = 3$ погоджується з кривою Велера на стадії прогресуючого розвитку макроскопічних тріщин у механізмі втомлювального руйнування, який, як відомо, включає дві стадії: першу (підготовчу) – утворення ліній ковзання в результаті дислокаційних спотворень і другу – прогресуючий розвиток мікротріщин.

Для незварних елементів концепція параметра $\Delta\sigma$ менш виразна і коефіцієнт m в більшій мірі залежить від показника асиметрії циклу ρ . Для стиків, підданих стискальним навантаженням, і незварних конструкцій такий підхід дає запас міцності. В нормах це явище враховується в спрощеній формі. Випробування для цих деталей показало, що гранична амплітуда напружень при $\rho = 1$ приблизно в 1,25 раза менша амплітуди напружень при $\rho = 0$ при тому ж числі циклів. Тому ефективна амплітуда напружень $\Delta\sigma_e$ для стискаючої частини циклу зменшується до 60 %. Така редукція у випадку знакозмінних або виключно стискаючих напружень враховується за формулою:

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_t + 0,6\Delta\sigma_c,$$

де $\Delta\sigma_t$ і $\Delta\sigma_c$ – діапазони розтягувальних і стискальних напружень.

Той факт, що за методикою Eurocode межа витривалості при будь-якій асиметрії циклу $\rho = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ залежить тільки від амплітуди напружень $\Delta\sigma$, є суттєвим спрощенням. У результаті для різних класів стиків отримана система паралельних кривих Велера. Ліва – похила гілка діаграми характеризує обмежену, а права горизонтальна гілка – необмежену витривалість. Точка зламу двох гілок розділяє область обмеженої і необмеженої витривалості. Базове число циклів 5×10^5 відповідає розрахунковій міцності. Для найбільш розповсюджених класів з'єднань довговічність при N до 10^7 циклів пропорційна третьому степеню інтервалу напружень $\Delta\sigma$. Вище цієї межі довговічність N приймається пропорційною п'ятому степеню інтервалу напружень.

Несуча здатність конструктивного елемента з точки зору втоми перевіряється за формулами:

$$\Delta\sigma_e \leq \frac{\Delta\sigma_R}{\gamma_{fat}}; \quad \Delta\tau_e \leq \frac{\Delta\tau_R}{\gamma_{fat}},$$

де $\gamma_{fat} = 1-1,2$ – частинний коефіцієнт безпеки при втомі матеріалу; $\Delta\sigma_R$, $\Delta\tau_R$ – міцність на втому, яка визначається в залежності від передба-

чуваної кількості циклів напружень N і втомлювальної категорії $(\Delta\sigma_c, \Delta\tau_c)$, за формулами:

$$\Delta\sigma_R = 0,735\Delta\sigma_c \left(\frac{5 \cdot 10^6}{N} \right)^{\frac{1}{m}} \geq \Delta\sigma_L,$$

$$\Delta\tau_R = \Delta\tau_c \left(\frac{2 \cdot 10^6}{N} \right)^{\frac{1}{5}} \geq \Delta\tau_L,$$

при цьому: $m = 3$, якщо $N \leq 5 \cdot 10^6$ або $m = 5$, якщо $N > 5 \cdot 10^6$. Тривала міцність на втому $\Delta\sigma_L, \Delta\tau_L$ – приймається за нормативними кривими Велера.

Розрахункова міцність при товщині деталей $t > 25$ мм зменшується за формулою:

$$\Delta\sigma_{R,red} = \Delta\sigma_R (25/t)^{1/4}.$$

У випадку складного напруженого стану величину $\Delta\sigma_e$ належить визначати, враховуючи головні напруження.

Якщо в точці конструкції екстремальні величини нормальних і дотичних напружень з'являються одночасно, то несучу здатність на втому можна перевіряти за формулою:

$$\left(\frac{\Delta\sigma_e}{\Delta\sigma_R} \right)^3 + \left(\frac{\Delta\tau_e}{\Delta\tau_R} \right)^5 \leq 1.$$

Приклад. Перевірити на втому при однорідному спектрі напружень балку з прокатного двотавра, яка підтримує вібратор, розташований в середині прогону. Очікуване число циклів змін навантажень протягом експлуатації $N = 2,5 \cdot 10^6$. Прийнято сталь С235. З урахуванням діючих навантажень – постійного від власної ваги і змінного від вібратора підраховано напруження: $\sigma_{max} = 120$ МПа, $\sigma_{min} = -30$ МПа.

Розрахунковий діапазон змінності напружень:

$$\Delta\sigma_e = \Delta\sigma_t + 0,6\Delta\sigma_c = 120 + 0,6 \cdot 30 = 138 \text{ МПа}.$$

Для перерізу балки без послаблень категорія втоми $\Delta\sigma_c = 160$ МПа. За нормативними кривими Велера у випадку $N = 2,5 \cdot 10^6 < 5 \cdot 10^6$ циклів тривала

вібраційна міцність $\Delta\sigma_L = 65$ МПа. Перевірка міцності за наведеною вище формулою дає:

$$\Delta\sigma_R = 0,735\Delta\sigma_c \left(\frac{5 \cdot 10^6}{N} \right)^{\frac{1}{m}} = 0,735 \cdot 160 \left(\frac{5 \cdot 10^6}{2,5 \cdot 10^6} \right)^{1/3} = \\ = 148 > \Delta\sigma_e = 138 \text{ МПа.}$$

Отже несуча здатність балки забезпечена.

Співставлення результатів розрахунків вібраційної міцності, виконаних для деяких категорій елементів за Eurocode і за СНиП виявляє таку тенденцію: для елементів із малими концентраторами напружень розрахунок за Eurocode дає менш оптимістичні результати порівняно зі СНиП, а для елементів із більшими карбами – більш оптимістичні результати.

Так для прокатних балок без послаблень Eurocode дає перенапруження приблизно 2 % при $\rho < 0$ і 8 % при $\rho \geq 0$, при розрахунку за СНиП має місце відповідно 18 % і 14 % запасу.

Для з'єднання внапусток у діапазоні напружень 90 МПа – 60 МПа при $\rho > 0$ Eurocode дає запас майже 100 %, а СНиП – перенапруження 5 %, а при $\rho < 0$ за методикою Eurocode перенапруження зменшуються до 55 %, а за СНиП – зростають до 72 %. При $\rho = 0$ в діапазоні напружень 90 МПа – 0 МПа має місце перенапруження як Eurocode – 37 %, так і СНиП – 60 %.

До інших основних змін, порівняно зі СНиП, відноситься дозвіл для проектувальників враховувати зміну умов завантаження за допомогою моделі акумулювання пошкоджень. Надається можливість розрахунку міри втомлювального пошкодження при неоднорідних і випадкових режимах зміни напружень. Найпростіший феноменологічний опис ґрунтується на впровадженні певної міри пошкоджень. Гіпотеза підсумовування втомлювальних пошкоджень полягає в тому, що пошкодження, викликане даним циклом напружень, приймається незалежним від попередньої історії навантажень. Тому кожне нове пошкодження підсумовується з пошкодженнями, викликаними попередніми циклами (правило Майнера). Лінійною гіпотезою підсумовування пошкоджень Пальмгрена-Майнера вводиться апріорна міра пошкоджень, пропорційна числу циклів:

$$D = \sum \frac{n_i}{N} \leq 1,$$

де міра пошкоджень $D = 0$ – в неушкодженому стані матеріалу, $D = 1$ – при повному руйнуванні матеріалу, n_i – число циклів i -го діапазону, N – повне число циклів.

Оцінку міцності можна здійснювати як безпосереднім розрахунком міри D за наведеною вище формулою, так і іншим способом із застосуванням однорідного рівноважного діапазону напружень $\Delta\sigma_e = \frac{\max \Delta\sigma}{\alpha_k}$, де $\max \Delta\sigma$ – найбільший з усіх циклів діапазон напружень, $\alpha_k = 1 - \ln K \leq 1$ – коефіцієнт спектра, який обчислюється в залежності від коефіцієнта наповнення спектра:

$$K = \frac{1}{\max \Delta\sigma} \sum \Delta\sigma_i \frac{n_i}{N}.$$

Для встановлення діапазонів циклів $\Delta\sigma_i$ користуються одним із методів числення циклів. До найбільш поширених відноситься метод «резервуара», який має просту фізичну ілюстрацію. Слід уявити, що контур віброграми напружень σ наповнений водою, утворюючи вид збірника. В найглибшій точці графіка випускається вода. Відповідна висота стовпа води $\Delta\sigma_1$ відповідає повному циклу в діапазоні напружень $\Delta\sigma_1$. Таким же чином встановлюються наступні діапазони.

Література

- [1] Гарней Т.Р. Основы новых правил проектирования сварных соединений на выносливость. Сб. Проектирование стальных мостов под ред. А.А. Поталкина. М: Транспорт, 1986. С. 232 – 243.

Надійшла до редколегії 17.12.2009 р.