
УДК 620.178.3

Канд. техн. наук А. І. Сочава, канд. техн. наук В. І. Глушко,
канд. техн. наук Л. М. Мартовицький, Ю. С. Курлаєва

Національний технічний університет, м. Запоріжжя

ДОСЛІДЖЕННЯ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ НА ОПІР ВТОМІ В УМОВАХ АСИМЕТРІЇ ЦИКЛУ

Проведені дослідження в умовах асиметрії циклу зразків низьколегованих сталей, які використовують у кранобудуванні. Обґрунтовані аналітичні залежності для апроксимації кривих діаграми граничних амплітуд і діаграми граничних напружень з урахуванням механічних властивостей на стиск та довговічності.

Ключеві слова: асиметрія циклу, діаграма граничних амплітуд, діаграма Сміта.

У механічних машинах більшість деталей несуть повторнозмінні навантаження при різних коефіцієнтах асиметрії як при розтягувальних, так і стискальних середніх напруженнях циклу. Літературні джерела мають обмежені дані про опір конструкційних матеріалів утомі при асиметричних навантаженнях. Особливо це стосується режимів з середніми напруженнями стиску. Такі обстави-

ни змушують конструкторів використовувати дані випробувань при симетричному згині з наступним перерахуванням їх за допомогою аналітичних залежностей на асиметричні цикли, що не завжди забезпечує правдоподібні оцінки характеристик витривалості конструкційних матеріалів і нерідко призводить до недостатньої міцності виробів або завищеної їх матеріалоємності.

У довідниках дані про витривалість конструкційних матеріалів подаються, як правило, у вигляді таблиць для конкретних значень коефіцієнтів асиметрії циклу і тому мають дискретний характер.

У довіднику про крани [1] наведені границі витривалості низьколегованої сталі з границею міцності $\sigma_B = 520$ МПа. Опрацьовані довідникові дані для довговічності 2×10^6 циклів і ефективного коефіцієнту концентрації напружень $K_\sigma = 1$ після визначення граничних амплітуд σ_a та відповідних їм середніх напружень циклу σ_m при коефіцієнтах асиметрії циклів R : -1; -0,8; -0,6; -0,4; -0,2; 0; +0,2 та режимах з $1/R$, рівними -0,2; -0,4; -0,6; -0,8, подані на рисунку 1.

При цьому апроксимацію кривих діаграми граничних амплітуд (рис. 1) виконано за допомогою формул різних дослідників: крива 1 – за формулою Гербера [2]

$$\sigma_a = \sigma_{-1} \left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_e} \right)^2 \right], \quad (1)$$

крива 2 – за формулою Гудмана [2]:

$$\sigma_a = \sigma_{-1} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_e} \right), \quad (2)$$

крива 3 – за формулою Зодерберга [2]

$$\sigma_a = \sigma_{-1} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_T} \right), \quad (3)$$

криві 4 – за формулою Одінга [3]

$$(\sigma_{-1})^2 = (\sigma_a)^2 + \sigma_a \sigma_m, \quad (4)$$

крива 5 – за формулою Сміта [2]

$$\sigma_a = \sigma_{-1} \frac{1 - \sigma_m / \sigma_e}{1 + \sigma_m / \sigma_e}, \quad (5)$$

де σ_{-1} – границя витривалості при симетричному циклі;

σ_T – границя текучості.

Аналіз кривих за формулами Гудмана, Сміта та Зодерберга показав, що оцінки σ_a є заниженими при середніх напруженнях розтягання і значно завищені при стискальних σ_m . Криві Одінга дають занижені оцінки σ_a як при розтягувальних, так і стискаючих середніх напруженнях циклу. Парабола Гербера завищує оцінки граничних амплітуд при $\sigma_m > 0$ і значно їх знижує при $\sigma_m < 0$.

Параболи Гербера і Одінга передбачають однаковий опір утомі при розтяганні і стисканні, що не підтверджується сучасним досвідом. У більшості металів при збільшенні середніх напружень стиску граничні амплітуди спочатку зростають, приблизно до границі текучості, а далі значення σ_a мають тенденцію до зменшення [4, 5].

Ймовірно, що із збільшенням стискальних та зменшенням розтягувальних напружень циклу змінюються і умови втомного руйнування. Причому у випадку значного середнього напруження стиску з малою розтягувальною складовою ці умови будуть залежати, в першу чергу, від міцності матеріалу на стиск. Останнє доцільно враховувати при побудові діаграми граничних амплітуд. Жодна з розглянутих залежностей не враховує механічних характеристик конструкційних матеріалів на стиск, що обмежує їх адекватність.

Цей недолік можна усунути шляхом введення в параболу Гербера границі міцності на стиск σ_{ec} . При цьому середнє напруження σ_m має змінюватися в інтервалі $\sigma_{ec} \leq \sigma_m \leq \sigma_e$.

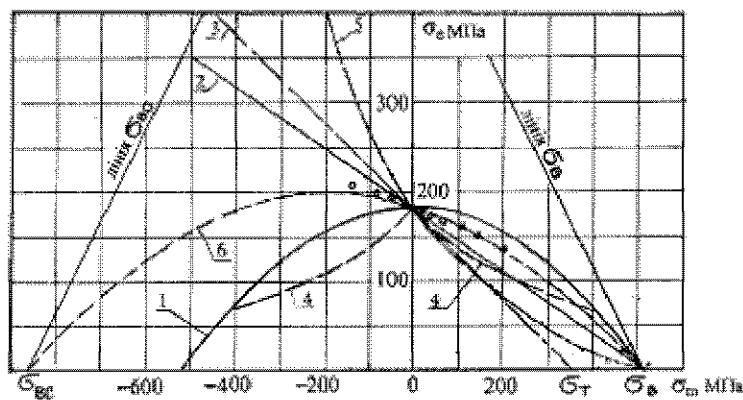


Рис. 1. Апроксимація діаграми граничних амплітуд:

1 – парабола Гербера, 2 – лінія Гудмана, 3 – лінія Зодерберга, 4 – крива Одінга, 5 – крива Сміта, 6 – парабола ЗМІ (ЗНТУ)

Оскільки, коли середні напруження циклу дорівнюють границям міцності $\sigma_a = 0$, то рівняння (1) можна представити таким чином:

$$\sigma_a = \sigma_{-1} \cdot \frac{(\sigma_m - \sigma_\epsilon)(\sigma_m - \sigma_{\epsilon c})}{\sigma_\epsilon \cdot \sigma_{\epsilon c}}. \quad (6)$$

У такому вигляді залежність (6) має екстремум у середині інтервалу $\sigma_{\epsilon c} \dots \sigma_\epsilon$, що не завжди відповідає фактичній поведінці кривих однакової довговічності. При зменшенні довговічності екстремум цих кривих зміщується вліво [5]. Щоб усунути вказаний недолік, у формулу (6) слід ввести показникову функцію. При цьому формула (6) набуває вигляд:

$$\sigma_a = \sigma_{-1} A^{\frac{2\sigma_m}{\sigma_\epsilon - \sigma_{\epsilon c}}} \cdot \frac{(\sigma_m - \sigma_\epsilon)(\sigma_m - \sigma_{\epsilon c})}{\sigma_\epsilon \cdot \sigma_{\epsilon c}}, \quad (7)$$

де A – параметр, що враховує довговічність.

Параметр A визначають за даними експерименту за допомогою методу максимуму правдоподібності, або методу найменших квадратів. Використовуючи метод найменших квадратів, у формулу (7) вводимо заміну:

$$x = \frac{2\sigma_m - \sigma_\epsilon - \sigma_{\epsilon c}}{\sigma_\epsilon - \sigma_{\epsilon c}},$$

$$x_0 = -\frac{\sigma_\epsilon + \sigma_{\epsilon c}}{\sigma_\epsilon - \sigma_{\epsilon c}}.$$

Тоді формула (7) з умовними параметрами запишеться:

$$\sigma_a = \sigma_{-1} A^{x-x_0} \frac{1-x^2}{1-x_0^2}. \quad (8)$$

Для визначення параметра A за результатами експерименту необхідно розв'язати рівняння

$$\sum_{i=1}^k \left[\left(\sigma_{a_i}^{(N)} - \sigma_{-1} A^{x_i-x_0} \frac{1-x_i^2}{1-x_0^2} \right) \cdot \sigma_{-1}^{(N)} (x_i - x_0) \times \right. \\ \left. \times \frac{1-x_i^2}{1-x_0^2} \cdot A^{(x_i-x_0-1)} \right] = 0, \quad (9)$$

де $\sigma_{-1}^{(N)}$ – амплітуда симетричного циклу, яка відповідає розрахунковій довговічності N циклів;

$\sigma_{a_i}^{(N)}$ – значення амплітуди напруження, що відповідає середньому напруженню циклу σ_{m_i} і довговічності N .

k – кількість рівнів середнього напруження.

Пошук параметра A можна здійснити чисельним методом. За нашим досвідом для зразків з ефективним коефіцієнтом концентрації $K_\sigma = 1$ для довговіч-

ностей $10^5 \dots 10^7$ циклів параметр A рекомендується шукати в інтервалі $0,7 \dots 1,0$.

Задовільна апроксимація наведених даних (рис. 1) має місце, якщо прийняти:

$$A = \frac{\lg \lg N}{\lg \lg N_B}, \quad (10)$$

де N_B – базова довговічність.

При цьому формула (7) для довговічності N набуває вигляд у:

$$\sigma_a^{(N)} = \sigma_{-1}^{(N)} \left(\frac{\lg \lg N}{\lg \lg N_B} \right)^{\frac{2\sigma_m}{\sigma_\epsilon - \sigma_{\epsilon c}}} \cdot \frac{(\sigma_m - \sigma_\epsilon)(\sigma_m - \sigma_{\epsilon c})}{\sigma_\epsilon \cdot \sigma_{\epsilon c}}. \quad (11)$$

На рисунку 1 кривою 6 показана апроксимація за допомогою залежності (11) вище наведених даних довідника [1] для довговічності 2×10^6 циклів та $N_B = 10^7$ циклів. Для цієї сталі величини σ_{mc} та $\sigma_{\epsilon c}$ визначені за принципом пропорційності за зразками зі сталі 09Г2С експериментально за стандартною методикою. При збільшенні N_B кривизна параболи при $\sigma_m > 0$ зменшується, а при $\sigma_m < 0$ збільшується, що можна використати для поліпшення результатів апроксимації кривих.

Із аналізу залежності (11) видно, що для побудови кривих однакової довговічності діаграми граничних амплітуд достатньо мати одну втомну характеристику σ_{-1} та статичні характеристики міцності σ_ϵ та $\sigma_{\epsilon c}$. Дві останні величини можна визначити на випробувальних машинах статичної дії.

Для перевірки адекватності формули (11) в Запорізькому національному технічному університеті проведені дослідження зразків зі сталі 09Г2С, яка використовується для виробництва металоконструкцій кранів заводом «Запоріжжкран» і за механічними характеристиками є аналогом сталі, результати дослідження якої запозичені з довідника [1] та наведені на рисунку 1. Випробування зразків типу III (ГОСТ 25.502-79) із листа товщиною 5 мм промислової поставки виконано на установці осьового циклічного навантаження [6].

У випробуваннях використовувались зразки з ефективним коефіцієнтом концентрації напружень $K_\sigma = 1$. Оскільки більш зручним для конструкторів є представлення результатів досліджень на втому у вигляді діаграм граничних амплітуд або діаграм граничних напружень, випробування виконані при середніх напруженнях циклу 0, +200, +300, -100, -150 МПа до довговічності 5×10^6 циклів.

Результати експерименту представлені на рисунку 2 у вигляді кривих втоми. Із рисунка видно, що збільшення розтягувальних середніх напружень циклу стимулює зменшення σ_a , при цьому помічається відхилення кривих втоми від прямолінійності. При збільшенні

σ_m стискання спостерігається спочатку зростання σ_a , а потім його затухання при подальшому збільшенні стискаючих σ_m .

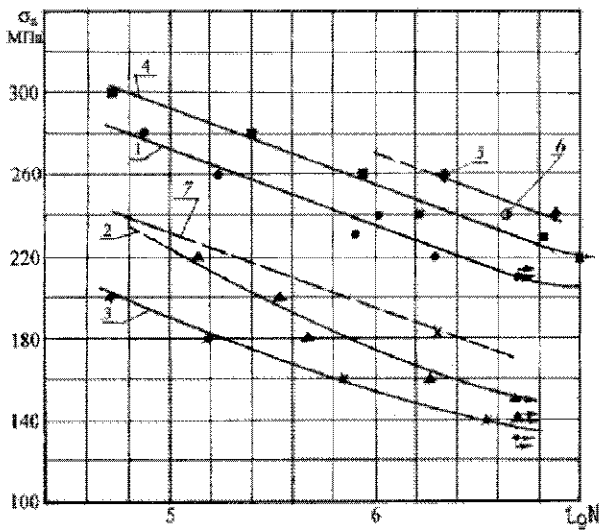


Рис. 2. Криві втоми сталі 09Г2С:

- 1 – при $\sigma_m = 0$, 2 – при $\sigma_m = +200$ МПа,
- 3 – при $\sigma_m = +300$ МПа, 4 – при $\sigma_m = -100$ МПа,
- 5 – при $\sigma_m = -150$ МПа, 6 – при $\sigma_m = -200$ МПа,
- 7 – апріорна крива при $\sigma_m = 0$ низьколегованої сталі $\sigma_e = 520$ МПа [1]

На підставі даних рисунка 2 побудована діаграма граничних амплітуд (рис. 3), яка показує, що зразки працюють досить тривало і за границею текучості, але з меншими амплітудами. При режимах навантаження за границею текучості на перших циклах спостерігається так звана циклічна повзучість, при якій пластична деформація накопичується дискретно щодня в момент, коли знаки σ_m і σ_a співпадають. Явище триває протягом приблизно п'яти тисяч циклів залежно від величин σ_m та σ_a з поступовим затуханням. Після цього зразок тривало працює при заданому середньому напруженні та амплітуді циклу.

Така поведінка зразків має місце як при розтягувальних, так і стискаючих середніх напруженнях циклу, якщо максимальні за абсолютним значенням напруження перевищують границю динамічної текучості. Подібні явища спостерігались і на інших металах [7–9].

Слід також відзначити, що при випробуваннях на стискання за границею текучості по мірі накопичення циклів робоча ділянка зразків стає пухкою з появою кількох тріщин на поверхні. При подальшому навантаженні настає поздовжня втрата стійкості з вибохуванням зразка. Останнє дає підстави припускати, що під час пульсацій має місце ковзання кристалів під кутом до осі зразка.

Через втрату стійкості неможливо отримати режими за межею σ_{TC} з довговічністю 10^5 циклів.

Апроксимація кривих однакової довговічності діаграми граничних амплітуд виконана за допомогою залежності (11). Рисунок 3 підтверджує задовільну адекватність формули для сталі 09Г2С.

Формула (11) також використана для апроксимації даних сталі з $\sigma_e = 520$ МПа [1], розглянутої раніше для довговічності 2×10^6 циклів (рис. 1, крива 6). З рисунка видно, що дана крива краще за інші наближається до довідникових результатів. Аби побудувати криві діаграми для інших довговічностей, необхідно мати

відповідні значення $\sigma_{-1}^{(N)}$. Ці труднощі можна подолати, якщо вважати криві втоми аналогічних матеріалів при симетричному циклі еквідистантними. Такою кривою є крива 7 (рис. 2), яка проходить через точку з координатами $\lg N = 6,3$, $\sigma_{-1} = 182$ МПа (табл. 1.5.6 [1]).

За допомогою залежності (11) та запозичених із названої кривої даних побудовані криві діаграми граничних амплітуд для довговічностей 2×10^6 , 5×10^5 та 10^5 циклів, які представлені на рисунку 4. Аналогічно неважко розрахувати і побудувати криві діаграми для будь-яких довговічностей.

Наявність кривих однакової довговічності та формул, що їх описують, дає можливість виконати розрахунок на опір втомі деталей машин, які працюють при

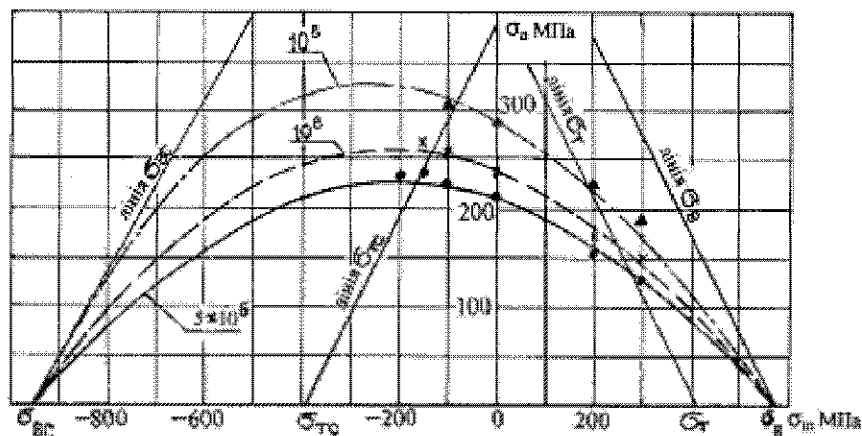


Рис. 3. Діаграма граничних амплітуд сталі 09Г2С

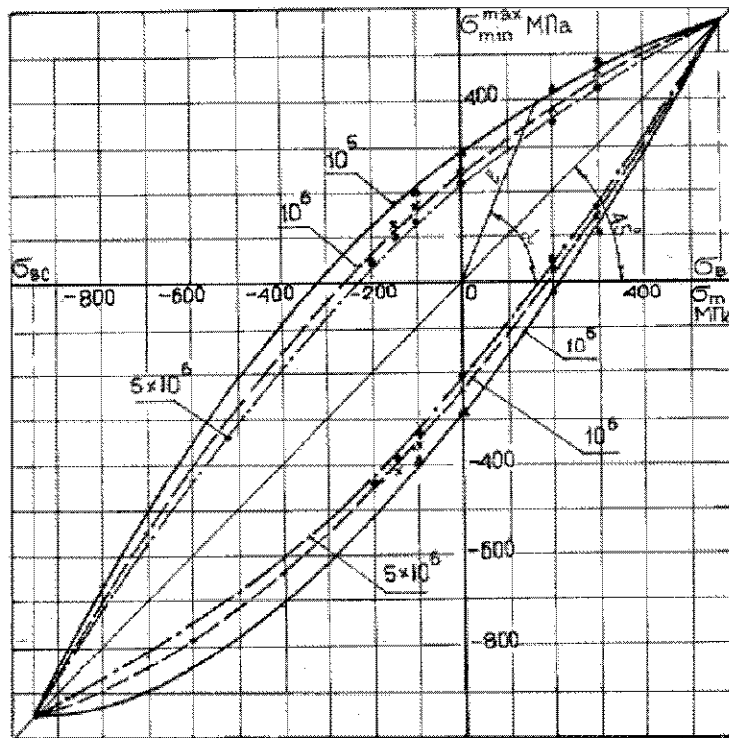


Рис. 5. Діаграма граничних напружень сталі 09Г2С

Список літератури

1. Справочник по кранам, том 1 / [В. И. Брауде, М. М. Гохберг, И. Е. Звягин и др.] ; под ред. М. М. Гохберга. – Л. : Машиностроение, 1988. – 536 с.
2. Форрест П. Н. Усталость металлов / Форрест П. Н. – М. : Машиностроение, 1973. – 352 с.
3. Одинг И. А. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов / Одинг И. А. – М. : Машгиз, 1962. – 260 с.
4. Кеннеди А. Д. Ползучесть и усталость в металлах / Кеннеди А. Д. – М. : Металлургия, 1965. – 312 с.
5. Сочава А. И. Об аппроксимации диаграммы предельных амплитуд с учетом области средних напряжений сжатия / Сочава А. И. // Проблемы прочности. – 1977. – № 10. – С. 18–21.
6. Стенд для испытания металлов при осевых нагрузках в условиях асимметрии цикла : Реферативная информация о законченных научно-исследовательских работах в вузах УССР / Михайлов П. А., Сочава А. И. – К. : Вища школа, 1974. – вып. 13.
7. Minoru Kawamoto. Fatigue Deformation Preceding Fracture under Combined Cyclic and Steady Loads / Minoru Kawamoto, Toshinobu Shibata // Memoirs of the Faculty of Engineering Kyoto Univ. vol. XXXIV, part 1, Japan, Kyoto. – 1972. – P. 125–134.
8. Neuman R. Strain Bursts and Coarcts Slip During Cyclic Deformation of F.C.C. and H.C.P. Single Crystals / Neuman R., Neuman P. // Scripta Metallurgica. USA. – 1970. – N 4. – P. 645–650.
9. Малышев П. Н. Циклическая ползучесть и ее роль в формировании остаточных напряжений при осевых нагрузках : тезисы докладов / Малышев П. Н., Михайлов П. А., Сочава А. И. // Циклическая прочность и повышение несущей способности изделий. – Пермь : ППИ, 1978.

Одержано 04.07.2011

Сочава А.И., Глушко В.И., Мартовицкий Л.М., Курлаева Ю.С. Исследования низколегированных сталей на сопротивление усталости в условиях асимметрии цикла

Проведены исследования в условиях асимметрии цикла образцов из низколегированных сталей, используемых в краностроении. Обоснованы аналитические зависимости для описания кривых диаграммы предельных амплитуд и диаграммы предельных напряжений с учетом механических характеристик материала при сжатии и долговечности.

Ключевые слова: асимметрия цикла, диаграмма предельных амплитуд, диаграмма Смита.

Soshava A., Glushko V., Martovytskyi L., Kurlayeva J. Investigation of low-alloy steels for fatigue resistance in the asymmetry cycle

Samples of low-alloyed steels used in crane building were investigated in asymmetrical cycles conditions. Analytical dependencies were grounded for description of limit amplitudes diagram curves and diagram of maximum – minimum tensions, which take into account mechanical characteristics of materials at tensile and durability tests.

Key words: asymmetrical cycles, diagram of limit amplitudes, Smith's diagram.