

УДК 620.178.3

- Сочава А. І. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри деталей машин та ПТМ Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: kafedra_dm_ptm@zntu.edu.ua, ORCID: 0000-0003-2418-1312
- Мартовицький Л. М. канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри деталей машин та ПТМ Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: l.martovitskii@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6839-1840
- Глушко В. І. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри деталей машин та ПТМ Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: kafedra_dm_ptm@zntu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-8109-6950
- Фролов Р. О. старший викладач кафедри деталей машин та ПТМ Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: frolovra@i.ua, ORCID: 0000-0001-9967-0220
- Задорожній О. А. провідний інженер-конструктор ТОВ «Південна промислова компанія», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: oleg.zadorozhnyi94@gmail.com

ДО РОЗРАХУНКУ ДЕТАЛЕЙ МАШИН НА ОПІР ВТОМИ

Мета роботи. Метою даної роботи було узагальнення довідкових та експериментальних даних та надання рекомендацій до проектування деталей машин на опір втоми в умовах асиметрії циклу.

Методи дослідження. Для дослідження проблеми опору конструкційних матеріалів втоми в умовах асиметрії циклу була використана установка для випробування зразків при будь-яких коефіцієнтах асиметрії циклу, як при розтягуючих, так і при стискаючих середніх напруженнях. Установка була створена в НУ «Запорізька політехніка». На цій установці були проведенні випробування плоских, гладких зразків з поперечним перетином 5×20 мм, а також зразків перетином 5×24 мм, з концентратором у вигляді отвору діаметром 5 мм із сталі 09Г2С відповідно до ДСТУ 8541. Дослідження гладких зразків проводилися при середніх напруженнях циклу 0, 100, 200, 300, -100, -150, -200 МПа до довговічності 5×10^6 циклів. Опрацьовані довідникові дані сталі з границею міцності $\sigma_s = 520$ МПа для довговічності 2×10^6 циклів і ефективного коефіцієнта концентрації напружень $K_{\sigma} = 1$ після визначення граничних амплітуд σ_a та відповідних їм середніх напружень циклу σ_m при різних коефіцієнтах асиметрії циклу.

Отримані результати. Дослідження роботи конструкційних матеріалів при циклічних навантаженнях з різною асиметрією циклів дозволяє досконаліше зрозуміти фізичні процеси втоми матеріалів деталей машин, а також виявити залежність ефективного коефіцієнта концентрації напружень не тільки від амплітуди, а також від величини середнього напруження циклу. Показано, що дія концентратора напружень залежить від величини середніх напружень циклу.

Наукова новизна. Запропоновано формулу для отримання повної діаграми граничних амплітуд, яка враховує довговічність.

Практична цінність. Робота може бути корисною конструкторам для більш ефективного використання службових властивостей конструкційних матеріалів, а також дослідникам з метою економії відшкодувань при випробуваннях на опір втоми.

Ключові слова: асиметрія циклу, діаграма граничних амплітуд, концентрація напружень, довговічність, границя міцності, криві втоми.

Вступ

Більшість деталей машин під час експлуатації працює в умовах асиметрії циклу. При проектуванні таких деталей для роботи на втому слід мати дані про витривалість конструкційних матеріалів при циклічних навантаженнях з різною асиметрією, подібною експлуатаційним циклам. В довідниках дані про витривалість матеріалів найчастіше обмежуються симетричним циклом, оскільки такий режим порівняно просто реалізувати на машинах конструкції Шенка (згин з

обертанням). Отримання даних, що відповідають необхідним коефіцієнтам асиметрії, шляхом аналітичних апроксимацій Гербера, Гудмана, Одингга, Зодерберга, Сміта та схематизованої діаграми граничних амплітуд Серенсена дають неточні результати, що призводить до обмежених довговічностей, або до завищеної матеріалоемності [1]. Особливо недостатньо зустрічаються дані про витривалість конструкційних матеріалів при середніх стискаючих навантаженнях.

Аналіз досліджень та публікацій

В довіднику [2] дані про витривалість конструкційних матеріалів подаються у вигляді таблиць для конкретних значень коефіцієнтів асиметрії циклу, а тому мають дискретний характер. Опрацьовані довідникові дані сталі з границею міцності $\sigma_{\sigma} = 520$ МПа для довговічності 2×10^6 циклів і ефективного коефіцієнта концентрації напружень $K_{\sigma} = 1$ після визначення граничних амплітуд σ_a та відповідних їм середніх напружень циклу σ_m при коефіцієнтах асиметрії $R = -1.0; -0.8; -0.6; -0.4; -0.2; 0; +0.2$ та режимах $1/R = -0.2; -0.4; -0.6; -0.8$ представлені на рисунку 1.

Для апроксимації результатів у вигляді кривих однакової довговічності діаграми граничних амплітуд використані наступні залежності:

формула Гербера [1]

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

формула Гудмана [1]

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

формула Зодерберга [1]

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

парабола Одінга [3]

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

крива Сміта [1]

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

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

σ_a і σ_m – амплітудне і середнє напруження, МПа;

σ_T – границя текучості, МПа;

σ_{σ} – границя міцності при розтягу, МПа.

Для апроксимації також використана формула, яка обґрунтована в статистичному аспекті в Запорізькому машинобудівному інституті (нині НУ «Запорізька політехніка») [4]:

$$\sigma_a = \sigma_{-1} \cdot \left(\frac{\lg \lg N}{\lg \lg N_B} \right)^{\frac{2\sigma_m}{\sigma_{\sigma} - \sigma_{\sigma c}}} \cdot \frac{(\sigma_m - \sigma_a) \cdot (\sigma_m - \sigma_{\sigma c})}{\sigma_{\sigma} \cdot \sigma_{\sigma c}}, \quad (6)$$

де σ_{-1} – амплітуда симетричного циклу, МПа;

N – розрахункова довговічність, циклів;

N_B – базова довговічність випробувань, циклів;

σ_{σ} – границя міцності при розтягу, МПа;

$\sigma_{\sigma c}$ – границя міцності при стиску, МПа.

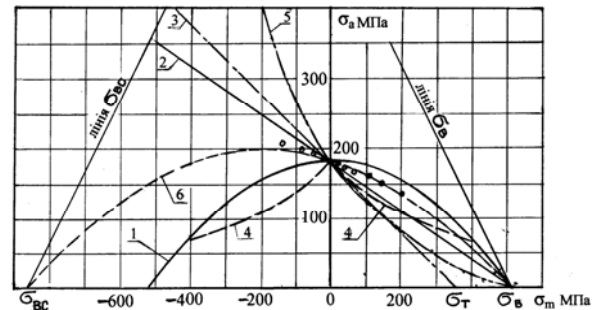


Рисунок 1. Апроксимація діаграми граничних амплітуд:

1 – парабола Гербера, 2 – лінія Гудмана, 3 – лінія Зодерберга, 4 – крива Одінга, 5 – крива Сміта, 6 – парабола «Запорізька політехніка»

Аналізуючи діаграму (див. рис. 1) доходимо висновку, що криві (1)...(5) не враховують характеристик міцності при стисканні, тому, якщо при $\sigma_m > 0$ названі криві якось і наближаються до результатів експерименту, то при середніх напруженнях стиску ($\sigma_m < 0$), вони видають надто суперечливі результати. Ймовірно, що названі залежності отримані були, коли стискаючим напруженням не приділялося необхідної уваги.

Парабола (6) перекидає увесь діапазон можливих середніх напружень і описує повну діаграму граничних амплітуд від σ_{σ} до $\sigma_{\sigma c}$. У формулі (6) значення $\sigma_{\sigma c}$ слід брати зі знаком мінус. Крива 6 задовільно узгоджується з результатами експерименту.

Мета роботи

Для більш глибокого дослідження проблеми опору конструкційних матеріалів втомі в умовах асиметрії циклу в «Запорізькій політехніці» створена і працює унікальна установка для випробування зразків при будь-яких коефіцієнтах асиметрії циклу при розтягуючих і стискаючих середніх напруженнях [5]. На цій установці проведені випробування стандартних гладких плоских зразків перетином 5×20 мм і зразків перетином 5×24 мм з концентратором.

Дослідження гладких зразків проводилися при середніх напруженнях циклу 0, 100, 200, 300, -100, -150, -200 МПа до довговічності 5×10^6 циклів.

Матеріал і методика досліджень

Результати експериментів представлені у вигляді кривих втомі [6 рис. 3] і діаграми граничних амплітуд (рис. 2). Експериментальні дані показують, 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 в залежності від величин середнього і амплітудного напружень з поступовим затуханням. Після цього зразок працює при заданому середньому напруженні і амплітуді циклу.

Така поведінка зразків має місце як при розтягуючих, так і стискаючих середніх напруженнях циклу, якщо максимальні за абсолютним значенням напруження перевищують границю динамічної текучості. Подібні явища спостерігались і на інших металах [7, 8].

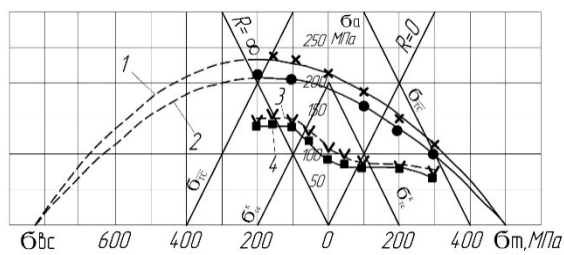


Рисунок 2. Діаграми граничних амплітуд сталі 09Г2С

Слід також відмітити, що при випробуваннях на стиск за границею текучості по мірі накопичення циклів робоча ділянка зразків стає пухкою з появою кількох тріщин на поверхні. Останнє дає підстави припускати, що під час пульсацій має місце проковзування кристалів під кутом до осі зразка. При збільшенні навантаження настає повздовжня втрата стійкості з вибочуванням зразка. Через втрату стійкості неможливо реалізувати режими навантаження за межею σ_{TC} з довговічністю менше ніж 10^5 циклів.

Апроксимацію результатів експериментів виконано за допомогою формули (6), адекватність якої підтверджується результатами випробувань гладких зразків із сталі 09Г2С, а також на зразках із сплавів Д16Т і титану ВТ8 [10].

В роботі [9] вказується, що концентратори напружень впливають лише на значення граничних амплітуд, але, як показано в роботах [10, 11], значення ефективних концентраторів напружень залежать в значній мірі і від рівня середніх напружень циклу.

Дослідження впливу концентраторів напружень на опір втомі зразків із сталі 09Г2С в умовах асиметрії циклу виконано на плоских зразках завтовшки 5 мм з центральним отвором діаметром 5 мм (теоретичний коефіцієнт концентрації $\alpha_\sigma = 2.5$).

Випробування виконані при середніх напруженнях: 0, +50, +100, +200, +300, -50, -150, -200

МПа. Результати експериментів представлені кривими втоми на рис. 3. Криві 2, 3, 4, які належать середнім напруженням розтягу розміщуються природно нижче кривої втоми симетричного циклу (крива 1). Криві 2 і 3 пересікаються при довговічності приблизно 10^6 циклів. Ймовірно, дане явище можна пояснити з точки зору дії суттєвих амплітуд при $N < 10^6$ циклів, а також з погляду механізму формування залишкових напружень в зоні концентратора.

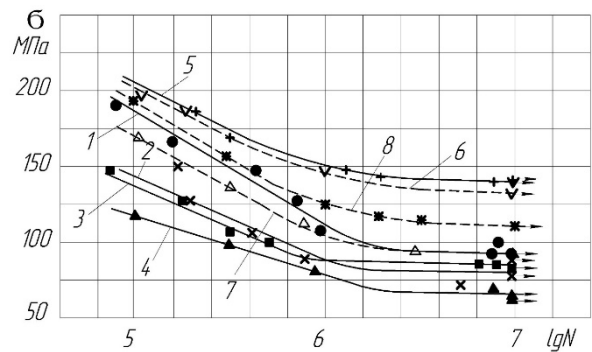


Рисунок 3. Криві втоми зразків з концентратором:

1 – при $\sigma_m = 0$; 2- 100 МПа; 3 – 200 МПа; 4 – 300 МПа; 5 – (-100 МПа); 6 – (-200 МПа); 7 – (50 МПа); 8 – (-50 МПа)

Відомо, що малі пластичні деформації розтягання знижують міцність металевих конструкційних матеріалів, а значні, навпаки, їх зміцнюють. При $\sigma_m = +100$ МПа і амплітуді 75 МПа зразки мають максимальне середнє напруження 175 МПа, яке в зоні концентратора при $\alpha_\sigma = 2.5$ можуть мати максимальне напруження розтягання 437 МПа, що буде причиною невеликих пластичних деформацій.

Крива 3, яка відповідає $\sigma_m = +200$ МПа і $\sigma_a = 75$ МПа, показує можливість виникнення в зразках максимальних локальних напружень 675 МПа. Це призводить до місцевого зміцнення матеріалу зразка, як за рахунок наклепу, так і завдяки релаксації напружень. При цьому виникають залишкові напруження стиску, які зменшують напруження розтягу та створюють сприятливі умови для підвищення опору втомі матеріалу зразка.

На підставі сімейства кривих втоми (рис. 3) побудована діаграма граничних амплітуд, сумісно гладких і зразків з концентратором, яка представлена на рисунку 2.

Для визначення впливу концентраторів дані (рис.3) слід нанести на діаграму граничних амплітуд гладких зразків, що і представлено на рис. 2, криві однакової довговічності діаграми описують витривалість зразків до довговічностей 10^6 і 10^7 циклів, де 1 – гладкі зразки для 10^6 циклів, 2 – гладкі зразки для 10^7 циклів, криві 3 і 4 – зразки з концентратором для довговічностей, відповідно, 10^6 і 10^7 циклів.

Ефективні коефіцієнти концентрації визначають за формулою

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma_a}{\sigma_{a_k}}, \quad (7)$$

де σ_a – гранична амплітуда гладкого зразка, МПа;

σ_{a_k} – гранична амплітуда зразка з концентратором, МПа.

Граничні амплітуди отримані шляхом статистичної обробки результатів протоколів випробувань. За результатами проведених досліджень можна зробити висновок, що максимальні значення ефективного коефіцієнта концентрації напружень мають місце при розтягуючих і невеликих стискаючих середніх напруженнях циклу 0, +50, +100, -50 МПа, де пластичні деформації в зоні концентратора майже не відбуваються. Ця ділянка розміщується між лініями текучості σ_{TC}^K і σ_T^K (див. рис. 2), на якій основним фактором є дія амплітудного напруження в зоні концентратора

$$\sigma_a^K = \frac{\sigma_a}{K_{\sigma}}, \quad (8)$$

де K_{σ} – ефективний коефіцієнт концентрації;

σ_a – значення амплітуди при відповідних середніх напруженнях циклу гладких зразків, МПа.

Дана ділянка кривих однакової довговічності зразків з концентратором має ввігнутий характер. Ймовірно саме про цю ділянку йде мова в роботі [9] про те, що концентратори впливають лише на величину амплітуди циклу. Праворуч і ліворуч від названої ділянки втручаються в роботу пластичні деформації з формуванням залишкових напружень стиску при $\sigma_m > 0$ і розтягу при $\sigma_m < 0$. При цьому криві однакової довговічності мають тенденцію приймати випуклу форму, оскільки розтягуючі залишкові напруження при $\sigma_m < 0$ будуть сприяти виникненню і розвитку тріщин втоми, а стискаючі залишкові напруження при $\sigma_m > 0$ зменшують напруження розтягу і сприяють зміцненню зразка.

На рис. 4 представлена діаграма для визначення залежності ефективного коефіцієнта концентрації напружень від асиметрії циклу, в якій позначені промені, що визначають коефіцієнти асиметрії циклу.

На підставі даної діаграми проведені розрахунки ефективних концентраторів напружень за формулою (7). Результати обчислень зведені до табл. 1.

Максимальні значення k_{σ} мають місце при режимах з коефіцієнтами асиметрії в діапазоні $-2,65 < R < -0,45$, тобто при навантаженнях, близьких до симетричного циклу, де середні напруження циклу порівняно невеликі.

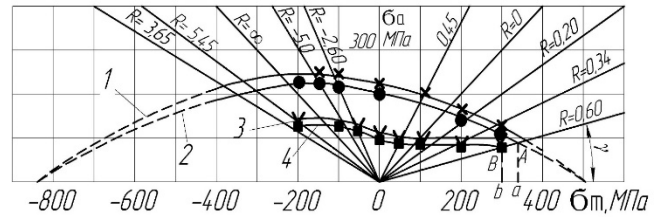


Рисунок 4. Діаграма для визначення залежності ефективного коефіцієнта концентрації напружень від асиметрії циклу

Таблиця 1 – Оцінка ефективного коефіцієнта концентрації напружень

R	N = 10 ⁶			N = 10 ⁷		
	σ_a , МПа	σ_{a_k} , МПа	$K_{\sigma R}$	σ_a , МПа	σ_{a_k} , МПа	$K_{\sigma R}$
-1,00	215	110	1,95	195	92,2	2,10
-0,45	200	100	2,05	170	80,0	2,12
0,00	175	100	1,75	145	95,0	1,52
0,20	150	100	1,50	140	90,0	1,55
0,34	140	100	1,40	125	89,0	1,40
0,60	130	100	1,30	95	80,0	1,90
-2,60	240	130	1,85	215	120	1,79
-5,00	245	135	1,81	220	125	1,76
∞	240	130	1,85	220	130	1,69
5,45	225	130	1,73	200	125	1,60

На основі вищевказаного можна порекомендувати інженерну методику проектного розрахунку деталей машин на опір втоми за допомогою діаграм граничних амплітуд конструкційних матеріалів при стаціонарних режимах:

1. Попередньо визначають робочий коефіцієнт асиметрії циклу за формулами відповідно для розтягуючого, змінання та згину

$$R_{p/c,3M} = \frac{F_{\min}}{F_{\max}}; R_{3\sigma} = \frac{M_{\min}}{M_{\max}} \quad (9)$$

2. Для визначення службових характеристик конструкційного матеріалу слід на діаграмі провести промінь τ під кутом γ , тангенс якого

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{1-R}{1+R}. \quad (10)$$

На рис. 4 σ_a і σ_m представлені в одному масштабі.

При використанні діаграми різних масштабів для σ_a і σ_m (рис. 5)

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\mu_{\sigma_a}(1-R)}{\mu_{\sigma_m}(1+R)}, \quad (11)$$

де μ_{σ_a} – масштаб амплітудного напруження, мм/МПа;

μ_{σ_m} – масштаб середнього напруження, мм/МПа.

Промінь r є місцем положення точок, що відповідають даному коефіцієнту асиметрії R . Діаграма (рис. 5) побудована за результатами експериментів джерела [2].

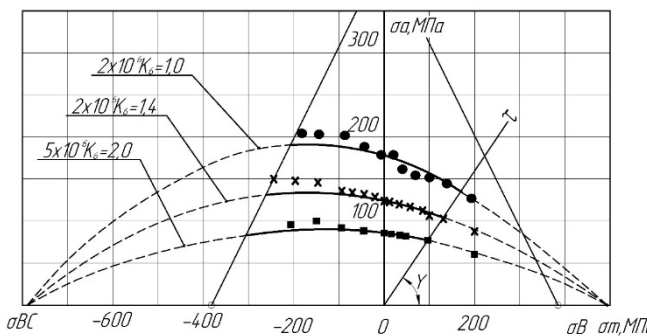


Рисунок 5. Діаграма граничних амплітуд сталі $\sigma_s = 520$ МПа

Місця перетину променя r з відповідними кривими однакових довговічностей діаграми визначають значення σ_a і σ_m для даного коефіцієнта асиметрії циклу.

3. За даними σ_a і σ_m можна визначити допустимі напруження

$$[\sigma_a] = \frac{\sigma_a}{n}; [\sigma_m] = \frac{\sigma_m}{n}, \quad (12)$$

де n – коефіцієнт запасу.

4. Використовуючи умови міцності визначити геометрію розрахункових перетинів.

При осьових навантаженнях і змінанні

$$A = \frac{F_a}{[\sigma_a]}, \quad (13)$$

де F_a – амплітудне навантаження, Н;

A – площа перетину, або площа опорної поверхні

при змінанні при змінанні, мм².

При розрахунках на згин визначити момент опору перетину відносно нейтральної осі, мм³

$$W_x = \frac{M_{3z}}{[\sigma_a]_{3z}}, \quad (14)$$

де M_{3z} – амплітудний момент циклу при навантаженнях згину, Н·мм;

Між розтягом і згином рекомендують співвідношення граничних амплітуд симетричного циклу [13].

$$[\sigma_{-1}]_{pc} \approx 0,75[\sigma_{-1}]_{zg}. \quad (15)$$

За отриманими A і W_x визначають геометрію перетинів, які піддаються деформації.

Подібні розрахунки можна здійснити і аналітично за допомогою системи рівнянь

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_a^{(N)} &= \sigma_{-1}^{(N)} \cdot \left(\frac{\lg \lg N}{\lg \lg N_B} \right)^{\frac{2\sigma_m}{\sigma_B - \sigma_{BC}}} \frac{(\sigma_m - \sigma_B) \cdot (\sigma_m - \sigma_{BC})}{\sigma_B \cdot \sigma_{BC}} \\ \sigma_a^{(N)} &= \frac{\mu_{\sigma_a}(1-R)}{\mu_{\sigma_m}(1+R)} \sigma_m \end{aligned} \right\}, \quad (16)$$

де $\sigma_a^{(N)}$ – амплітуда циклу при даній розрахунковій довговічності N , МПа;

$\sigma_{-1}^{(N)}$ – границя витривалості симетричного циклу при розрахунковій довговічності N , МПа;

N_B – база випробувань до необмеженої витривалості (для сталі $N_B = 10^7$ циклів);

σ_B – границя міцності при розтягу, МПа;

σ_{BC} – границя міцності при стиску, МПа;

σ_m – середнє напруження циклу, МПа.

Друге рівняння системи описує геометрію променя r .

5. Після визначення і корегування геометрії деталі здійснити перевірку прийнятих рішень за допомогою умов міцності. При цьому фактичні напруження можна визначити за допомогою формул: для розтягу – стиску і змінання

$$\sigma_{a\phi} = \frac{F_a}{A_\phi} \leq [\sigma_a], \quad (17)$$

для згину

$$\sigma_\phi = \frac{M_a}{W_{x\phi}} \leq [\sigma_a]_{3z}, \quad (18)$$

де F_a – амплітудне зусилля, що діє в даному перетині, Н;

A_ϕ – фактична площа перетину, мм²;

M_a – амплітудний момент, що діє на перетин, Нм;

$W_{x\phi}$ – фактичний момент опору відносно нейтральної осі, мм³;

$[\sigma_a]$ – допустиме амплітудне напруження матеріалу, при розтягу, стиску або змінанні, МПа;

$[\sigma_a]_{3\sigma}$ – допустиме амплітудне напруження при згині, МПа.

6. Визначити коефіцієнт запасу міцності n за формулою

$$n = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma'_{\max}} = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma'_{\min}} = \frac{\sigma_a}{\sigma'_a} = \frac{\sigma_m}{\sigma'_m} \geq [n], \quad (19)$$

де $\sigma_{\max}, \sigma_{\min}, \sigma_a, \sigma_m$ – граничні значення циклічних характеристик конструкційного матеріалу, МПа;

$\sigma'_{\max}, \sigma'_{\min}, \sigma'_a, \sigma'_m$ – фактичні значення робочих характеристик циклу, МПа;

$[n]$ – допусковий запас міцності.

Коефіцієнт запасу міцності n може бути визначеним відповідно будь-якого напруження, що складає робочий цикл.

При наявності діаграми граничних амплітуд можна визначити фактичний запас міцності за допомогою амплітуди циклу за формулою

$$n = \frac{\sigma_{a\lim} \cdot \beta}{K_{\sigma} \cdot \sigma_{af} \cdot \varepsilon_{\sigma}} \geq [n], \quad (20)$$

де $\sigma_{a\lim}$ – границя витривалості (амплітудна) гладких зразків ($K_{\sigma} = 1$) для коефіцієнта асиметрії R , МПа;

K_{σ} – ефективний коефіцієнт концентрації напружень;

ε_{σ} – масштабний фактор, [9, 12];

β – коефіцієнт, який враховує якість поверхні [9, 12];

σ_{af} – фактичне амплітудне робоче напруження циклу, МПа;

$[n]$ – нормативний коефіцієнт запасу міцності.

Нормативний запас міцності визначають за допомогою галузевих норм або диференціальним методом [3, 9, 12].

Висновки

Отримані результати дослідження роботи конструкційних матеріалів на циклічні навантаження з різною асиметрією циклів дозволяє досконаліше зрозуміти фізичні процеси втомі матеріалів деталей машин, а також виявити залежність ефективного коефіцієнта концентрації напружень не тільки від амплітуди, а також від величини середнього напруження циклу [14, 15].

Пропонуються методичні рекомендації по проектним розрахункам деталей машин на опір втомі з використанням діаграм граничних амплітуд конструкційних матеріалів.

Робота може бути корисною конструкторам для більш ефективного використання службових властивостей конструкційних матеріалів, а також дослідникам з метою економії відшкодувань при випробуваннях на опір втомі.

Список літератури

1. Форрест П. Усталость металлов./Форрест П. – М. : Машиностроение, 1973/–352 с.
2. Справочник по кранам, том 1 / Под общей редакцией М.М. Гохберга. – М. : Машиностроение, 1988. – 536 с.
3. Одинг И. А. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов / Одинг И. А. – М. : Машгиз, 1962. – 260 с.
4. Сочава А. И. Об аппроксимации диаграммы граничных амплитуд с учетом области средних напряжений сжатия / А. И. Сочава // Проблемы прочности. – 1977. – №10. – С. 18–21.
5. Михайлов П. А. Стенд для испытания металлов при осевых нагрузках в условиях асимметрии цикла / Михайлов П. А., Сочава А. И. // Реферативная информация о законченных научно-исследовательских работах в вузах УССР, вып. 13. – К. : Вища школа, 1974.
6. Про апроксимацію кривих діаграми граничних амплітуд низьколегованих сталей / Сочава А. І., Глушко В. І., Мартовицький Л. М. и др. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2006. – № 1. – С. 11–14.
7. Minoru Kawamoto Fatigue Deformation Preceding Fracture under Combined Cyclic and Steady Load/Minoru Kawamoto, Tochinobu Shibota memoirs of the Faculty of Engineering Kyoto Univ., vol.XXXIV, part 1, Japan, Kyoto, 1972, P. 125–134.
8. Михайлов П. А. Циклическая ползучесть и ее роль в формировании остаточных напряжений при осевых нагрузках / Михайлов П. А., Малышев П. Н., Сочава А. И. // Сб. циклическая прочность и повышение несущей способности изделий. Тезисы докладов. – Пермь : ППИ, 1978.
9. Серенсен С. В. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность / Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М. –М. : Машиностроение, 1975. – 488 с.
10. Сочава А. И. Исследование сопротивления усталостному разрушению легких конструкционных сплавов в условиях асимметрии цикла : авторефер. канд. дис. /А. И. Сочава – М., 1977. – 22 с.
11. Характеристики сопротивления усталости. Расчетные методы оценки / М. Н. Степнов, С. П. Чернышов, И. Е. Ковалев, А. В. Зинин // М. : Издательский центр «Технологии машиностроения», 2010. – 255 с.
12. Павлице В. П. Основы конструирования та розрахунок деталей машин / В. П. Павлице // К. : Вища школа, 2003. – 558 с.
13. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений // Касаткин Б.С., Кудрин А. Б., Лобанов Л.М. и др. // К. : Наукова думка, 1981. – 583 с.
14. Вплив асиметрії циклу на величину ефективного коефіцієнта концентрації напружень / А. І. Сочава, Л. М. Мартовицький, В. І. Глушко и др. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2017. – № 1. – С. 70–76. Режим доступу : http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nmt_2017_1_15.

15. Подовження ресурсу важкозавантажених про-
гінних кранових балок [Електронний ресурс] /

35. Режим доступу:
http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pidtt_2016_3_5.

Одержано 24.04.2023

Л. М. Мартовицький, А. І. Сочава, В. І. Глушко ідр. //
Підйомно-транспортна техніка. – 2016. – № 3. – С. 27–

TO THE CALCULATION OF MACHINE PARTS FOR FATIGUE RESISTANCE

- Sochava A. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Machine parts and lifting - transport mechanisms National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: kafedra_dm_ptm@zntu.edu.ua, ORCID: 0000-0003-2418-1312
- Martovitskii L. Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Machine parts and lifting - transport mechanisms, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: l.martovitskii@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6839-1840
- Hlushko V. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Machine parts and lifting - transport mechanisms, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: kafedra_dm_ptm@zntu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-8109-6950
- Frolov R. Senior lector of the Department of Machine parts and lifting - transport mechanisms, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: frolovr@i.ua, ORCID: 0000-0001-9967-0220
- Zadorozhnii O. Leading Design Engineer at "Southern Industrial Company" LLC, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: oleg.zadorozhnii94@gmail.com

Purpose. The aim of the work was to summarize the reference and experimental data and to provide recommendations for the design of machine parts for fatigue resistance under conditions of cycle asymmetry.

Research methods. To study the problem of resistance of structural materials to fatigue under conditions of cycle asymmetry, an installation for testing samples at any coefficients of cycle asymmetry, both at tensile and compressive average stresses, created at the National University "Zaporizhzhia Polytechnic". On this installation, tests were carried out on flat smooth specimens with a cross section of 5×20 mm and specimens with a cross section of 5×24 mm, with a form-hole concentrator with a diameter of 5 mm, made of 09Г2С steel in accordance with DSTU 8541. The smooth specimens were tested at average cycle stresses of 0, 100, 200, 300, -100, -150, -200 MPa up to a service life of 5×10^6 cycles. The reference data of steel with a tensile strength of $\sigma_b = 520$ MPa for a service life of 2×10^6 cycles and the effective stress concentration factor $K_{\sigma} = 1$ were processed after determining the ultimate amplitudes σ_a and the corresponding average cycle stresses σ_m at different cycle asymmetry factors.

Results. The obtained results of studying the work of structural materials under cyclic loads with different cycle asymmetries allow us to better understand the physical processes of fatigue materials of machine parts, as well as to reveal the dependence of the effective stress concentration factor not only on the amplitude, but also on the value of the average cycle stress. The work shows that the effect of the stress concentrator depends on the value of the average cycle stress.

Scientific novelty. A formula for obtaining a complete diagram of ultimate amplitudes that takes into account durability is proposed.

Practical value. The work can be useful for designers to more effectively use the service properties of structural materials, as well as for researchers to save reimbursements in fatigue resistance tests.

Key words: cycle asymmetry, diagram of ultimate amplitudes, stress concentration, durability, tensile strength, fatigue curves.

References

1. Forrest, P. (1973). Uсталost metallov [Fatigue of metals]. Mechanical engineering, 352.
2. Hochberg, M. M. (1988). Spravochnyk po kranam, tom 1. Pod obshchei redaktsyei M.M. Hoxhberha [Handbook of cranes. Under the general editorship of M.M. Hochberg]. Mechanical engineering, 1, 536.
3. Oding, I. A. (1962). Dopuskaemye napryazheniya v mashinostroenii i tsiklicheskaya prochnost metallov [Permissible stresses in machine-building and cyclic strength of metals]. Mechanical engineering, 260.
4. Sochava, A. I. (1977). Ob approksymatsyy dyahrammy hranychnukh amplytud s uchetom oblasti

sred-nykh napriazheniy szhatyia [On approximation of the diagram of ultimate amplitudes taking into account the region of average compressive stresses]. Problem of strength, 10, 18 – 21.

5. Mikhailov, P. A., Sochava, A.I. (1974). Stend dlya ispytaniya metallov pri osevykh nagruzkah v usloviyah asimmetrii tsikla [Test bench for testing metals under axial loads in conditions of cycle asymmetry]. Abstract information on completed research works in the universities of the USSR, Kyiv, Higher School, 13, 138.

6. Sochava, A. I., Glushko, V. I., Martovitsky, L. M. et al. (2006). Pro aproksymatsiiu kryvykh diahramy hranychnykh amplitud nyzkolehovanykh stali [On approximation of the diagrams of the limiting amplitudes of low-alloy steels]. New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering, 1, 11–114.

7. Minoru, K., Tochinobu, S. (1972) Fatigue Deformation Preceding Fracture under Combined Cyclic and Steady Load. Memoirs of the Faculty of Engineering Kyoto University, 24, 1, Japan, Kyoto, 125–134.

8. Mikhailov, P. A. Malyishev, P. N., Sochava, A. I. (1978) Tsiklicheskaya polzuchest i ee rol v formirovani ostatochnykh napryazheniy pri osevykh nagruzkah [Cyclic creep and its role in the formation of residual stresses under axial loads]. Collection of cyclic stability and increase the bearing capacity of products. Abstracts of reports, Perm.

9. Serensen, S. V., Kogaev, V. P., Shneyderovich, R. M. (1975) Nesuschaya sposobnost i raschety detaley mashin na prochnost [Bearing capacity and calculations of machine parts for strength]. Moscow, Mechanical engineering, 488.

10. Sochava, A. I. (1977) Issledovanie soprotivleniya ustalostnomu razrusheniyu legkih konstruksionnykh splavov v usloviyah asimmetrii tsikla [Investigation of resistance to fatigue fracture of light structural alloys under conditions of cycle asymmetry]. Moscow, 22.

11. Stepnov, M. N., Chernyshov, S. P., Kovalev, I. E., Zinin, A.V. (2010) Harakteristiki soprotivleniya ustalosti. Raschetnyie metody otsenki [Characteristics of fatigue resistance. Calculation methods of evaluation]. Moscow, Publishing Center “Engineering Technologies” 255.

12. Pavlyshche, V. P. (2003) Osnovy konstruyuvannya ta rozrahunok detaley mashyn [Fundamentals of design and calculation of machine parts]. Kyiv, Higher School, 558.

13. Kasatkin, B. S., Kudrin, A. B., Lobanov, L. M. et al. (1981) Eksperimentalnyie metody issledovaniya deformatsiy i napryazheniy [Experimental methods of studying deformations and stresses]. Kyiv, Naukova dumka, 583.

14. Sochava, A. I., Martovitsky, L. M., Glushko, V. I. et al. (2017) Vplyv asymetrii tsyklu na velychynu efektyvnoho koefitsiienta kontsentratsii napruzhen [Influence of cycle asymmetry on the value of the effective stress concentration coefficient]. New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering, 1, 70–76.

15. Martovitsky, L. M., Sochava, A. I., Glushko, V. I. et al. (2016) Podovzhennia resursu vazhkozavantazhenykh prohinykh kranovykh balok [Extension of the resource of heavily loaded span crane tanks]. Lifting and transport equipment, 3, 27–35.