

## ВПЛИВ АСИМЕТРІЇ НАВАНТАЖЕННЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВТОМНОГО РУЙНУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ

А.П.Джус, М.В.Лисканич

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 42430,  
e-mail: public@nuing.edu.ua

*Розглянуто вплив асиметрії циклу навантаження на границю витривалості, і встановлено, що для гладких зразків він посилюється зі збільшенням міцнісних характеристик матеріалу, а для реальних деталей, що містять тріщини, – зі збільшенням розмірів тріщин. Обґрунтовано необхідність врахування такого впливу при дослідженні характеристик втомних руйнувань замкових різьбових з'єднань та індикаторів накопичення втомних пошкоджень.*

Ключові слова: асиметричне навантаження, втомне руйнування, індикатори різьбових з'єднань.

*Рассмотрено влияние асиметрии цикла нагрузки на границу усталости, и установлено, что для гладких образцов оно усиливается с увеличением прочностных характеристик материала, а для реальных деталей, содержащих трещины, – с увеличением размеров трещин. Обоснована необходимость учета такого влияния при исследовании характеристик усталостных разрушений замковых резьбовых соединений и индикаторов накопления усталостных повреждений.*

Ключевые слова: асимметричная нагрузка, усталостное разрушение, индикаторы резьбовых соединений.

*Influence of asymmetrical cycle of loading on the border of fatigue is considered, and it is set that for smooth examples it increases with the increase of strength material descriptions, and for the real anits which contain cracks, – with a jumboizing cracks. The necessity of account of such influence is grounded at research of descriptions of tireless destructions of screw-thread connections and indicators of accumulation of tireless damages.*

Keywords: asymmetrical duty, endurance failure, indicators of the threaded connections.

В процесі експлуатації елементи бурильної колони зазнають впливу асиметричного навантаження. Рівень асиметрії навантаження для різних перерізів колони є різним, що зумовлено зміною значення розтягуючого навантаження по довжині бурильної колони. Основна частина бурильної колони у свердловині перебуває у розтягнутому стані, наявні перерізи, які називають нейтральними, а також стиснута частина, обумовлена необхідністю створення навантаження на породоруйнівний інструмент. Ця стиснута частина комплектується обважненими бурильними трубами (ОБТ), довговічність яких визначається довговічністю різьбових з'єднань [1].

У практиці розрахунково-експериментального прогнозування довговічності елементів бурильної колони використовується особливість їх руйнування під дією асиметричного навантаження, яка полягає в тому, що кут нахилу кривої втоми та кількість циклів до точки її перегину в статистичному плані не залежить від коефіцієнта асиметрії, однак відомі дослідження, результати яких відрізняються від прийнятих припущень [2, 3].

Експлуатація замкових різьбових з'єднань і індикаторів здійснюється саме в таких умовах асиметрії. Зважаючи на це, постає проблема дослідження впливу асиметрії навантаження на довговічність як різьбових з'єднань ОБТ, так і індикаторів втоми.

Асиметрія навантаження різьбових з'єднань ОБТ та індикаторів зумовлена існуванням середніх напружень циклу, що виникають, в основному, внаслідок дії моменту згинчування.

Загалом залежність між середнім напруженням циклу і відповідними значеннями максимальних змінних напружень виражають у вигляді діаграм. Діаграма граничних напружень може бути представлена в координатах: максимальні напруження  $\sigma_{\max}$  – середні напруження циклу  $\sigma_m$  або амплітуди напружень  $\sigma_a$  – середні напруження циклу. Така діаграма складається із двох ліній: перша відповідає границі витривалості, друга – границі плинності (найчастіше – умовній) [4]. Побудова таких діаграм за експериментальними даними є достатньо складним завданням навіть для дослідних зразків малих розмірів. Тому зрозумілими є спроби побудови цих залежностей теоретичним шляхом. Багатьма авторами запропоновані різноманітні залежності між граничною амплітудою і середнім напруженням циклу.

Ці залежності тією чи іншою мірою відповідають дослідним даним, які відносяться до області середніх напружень розтягу, і так само, як і експериментальні, фіксують зниження значення граничної амплітуди з ростом середніх напружень розтягу.

Чутливість границі витривалості гладких взірців до асиметрії циклу навантаження зазвичай оцінюють коефіцієнтом  $\psi_\sigma$ , який характеризує відносну зміну границі витривалості матеріалу при переході від симетричного циклу навантажування до віднульового [4]:

$$\psi_\sigma = \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0}, \quad (1)$$

де:  $\sigma_{-1}$  – границя витривалості при симетричному циклі навантажування;

$\sigma_0$  – границя витривалості при віднульовому циклі навантажування.

Зі зростанням міцнісних характеристик сталей зростає значення коефіцієнта  $\psi_\sigma$ , який може бути визначений за кореляційною формулою [5]:

$$\psi_\sigma = 0,02 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma_B, \quad (2)$$

де  $\sigma_B$  – межа міцності, МПа, тобто від 0,1 при  $\sigma_B=400$  МПа до 0,3 при  $\sigma_B=1400$  МПа. На величину  $\psi_\sigma$  впливають стан матеріалу, поверхневе зміцнення, умови випробування та ряд інших чинників, що не враховуються даною залежністю. Так, коефіцієнт  $\psi_\sigma$  для вуглецевих сталей становить 0,1...0,2 і 0,2...0,3 – для легуваних [4]. Зі збільшенням середніх розтягуючих напружень коефіцієнт  $\psi_\sigma$  також збільшується [4, 5].

За наявності макротріщин умова їх нерозповсюдження при циклічному навантажуванні визначається пороговим коефіцієнтом інтенсивності напружень (КІН). В індикаторах втоми, які використовують в замкових різьбах бурильних труб, згідно із [6] радіус кривизни профілю дна концентратора напружень виконується меншим критичного значення, рівного 0,1...0,6 мм залежно від марки сталі. Для таких випадків згідно з дослідженнями Кудрявцева [7] встановлено, що за значень радіусів кривизни, менших критичних значень, з'являються тріщини, які не розвиваються, а тому існують дві межі втоми матеріалу, що визначаються за критеріями появи перших макроскопічних тріщин втоми і кінцевого руйнування. Границя витривалості за критерієм руйнування вважається такою, що не залежить від радіуса кривизни в концентраторі, тобто залишається постійною із зменшенням його значення нижче критичного. Границя витривалості при цьому визначається з відомої умови нерозвитку тріщини лінійної механіки руйнування [5]

$$\Delta K_{ef} \leq \Delta K_{th}, \quad (3)$$

де:  $\Delta K_{ef}$  – ефективна величина коефіцієнта інтенсивності напружень;

$\Delta K_{th}$  – порогове значення коефіцієнта інтенсивності напружень.

Порогове значення коефіцієнта інтенсивності напружень  $\Delta K_{th}$  використано в [6] для визначення необхідного згинального моменту границі витривалості індикаторів за значень кривизни профілю дна концентратора напружень, менших критичного.

Вплив асиметрії циклу навантажування на порогове значення КІН описується з допомогою різних співвідношень [7], найбільш універсальним з яких є запропоноване Клеснілом і Лукашем [8]:

$$(\Delta K_{th})_R = (\Delta K_{th})_{R=0} (1-R)^V, \quad (4)$$

де:  $R$  – коефіцієнт асиметрії;  
 $V$  – постійна матеріалу.

Дослідження сталей, проведені переважно при  $R \geq 0$ , засвідчили, що  $V=0,7...1,0$  [8]. Результати досліджень, проведених із різними сталями з додатними і від'ємними значеннями  $R$ , свідчать про те, що залежність (4) розповсюджується і на область від'ємних значень  $R$ . При цьому для більшості сталей різної міцності ( $\sigma_T = 250...800$  МПа)  $V=0,6...0,8$ .

Аналогічно (1) введемо коефіцієнт  $\psi_\sigma^{mp}$ , який характеризуватиме чутливість границі витривалості матеріалу з тріщиною до асиметрії циклу навантажування. В рамках лінійної механіки руйнування границя витривалості, що відповідає пороговому напруженню  $\sigma_{th}$ , визначається із співвідношення [7]

$$\Delta \sigma_{th} = \Delta K_{th} / \sqrt{\pi l} \cdot Y(l), \quad (5)$$

де:  $l$  – довжина тріщини;

$Y(l)$  – поправочна функція, що залежить від розмірів тіла і тріщини, а також способу навантажування.

З врахуванням виразів (4) і (5) з (1) отримаємо

$$\psi_\sigma^{mp} = 2^V - 1. \quad (6)$$

Приймаючи для сталей  $V = 0,6...0,8$ , із (6) отримаємо  $\psi_\sigma^{mp} = 0,5...0,7$ . Оскільки величина  $V$  майже не залежить від міцнісних характеристик сталі, згідно з (6) це справедливо і для  $\psi_\sigma^{mp}$ .

Результати порівняння наведених для сталей значень  $\psi_\sigma^{mp}$  і  $\psi_\sigma$  свідчать, що чутливість границі витривалості зразків з макротріщинами до асиметрії циклу навантажування значно вища, ніж гладких зразків, а коефіцієнт  $\psi_\sigma^{mp}$  зразків з макротріщинами практично не залежить від міцнісних характеристик сталі, в той час, як для гладких зразків він зростає зі збільшенням міцності.

Згідно з теорією втомного руйнування, границя витривалості гладких зразків визначається умовою нерозповсюдження мікротріщин, поява яких внаслідок неоднорідності структури полікристалічних матеріалів можлива за напружень, нижчих границі втоми [9]. Для ряду сталей довжина таких мікротріщин складає 0,01 мм [10]. Відмінності чутливості границі витривалості гладких зразків і зразків з макротріщинами до асиметрії циклу навантажування пояснюється здебільшого особливістю кінетики коротких тріщин.

На даний час для визначення характеристик опору втомному руйнуванню матеріалів з позиції механіки руйнування [10, 11] застосовується модель тіла з ефективною тріщиною, що прогнозує прискорений розвиток малих тріщин і добре корелюється з експериментальними даними [7]. Слід зауважити, що для даної моделі як і для інших підходів, де за критерій руйнування прийнято тільки КІН, не можливо врахувати впливу більшості із найбільш сутте-

вих параметрів на розвиток малих тріщин. Це пояснюється поданням в лінійній механіці руйнування розподілів напружень і деформацій у вершині тріщини з допомогою наближених розв'язків, які містять тільки сингулярні члени.

Аналітичні методи визначення границі витривалості тіл з малими тріщинами, які базуються на повному розв'язку для компонентів тензора напружень, розглянуті в [12]. З врахуванням впливу регулярних членів на розмір пластичної зони у вершині тріщини і гіпотези про постійність розміру цієї зони для нерозповсюджуваних при циклічному навантажуванні тріщин довільної довжини отримано вираз, за яким визначимо межу витривалості гладких зразків.

$$\sigma_R = \frac{\sigma_{fc}}{\sqrt{\pi \cdot l \cdot \left(\frac{\sigma_{fc}}{K_{th}}\right)^2 + [1 - \mu(1 - \mu)]}}, \quad (7)$$

де:  $\sigma_{fc}$  – циклічна границя плинності (для різних сталей  $\sigma_{fc} = 0,7\sigma_T$ );

$\mu$  – коефіцієнт Пуассона.

За виразом (7) отримано кінцеве значення  $\sigma_R$  при  $l \rightarrow 0$ , що добре корелюється з експериментальними даними для зразків з малими тріщинами і гладких зразків за наявності в них тріщин, довжина яких співмірна із структурним параметром матеріалу [12].

Стосовно розмаху граничних напружень  $\Delta\sigma_R$  у випадку довільного значення коефіцієнта асиметрії циклу навантажування формулу (7) можна подати у вигляді

$$\Delta\sigma_R = \frac{2\sigma_{fc}}{\sqrt{\pi \cdot l \cdot \left(\frac{2\sigma_{fc}}{\Delta K_{th}}\right)^2 + [1 - \mu(1 - \mu)]}}, \quad (8)$$

записаному для циклічної зони пластичності, розмірність якої пропорційна  $(\Delta K / 2\sigma_T)^2$ . Для довгих тріщин вираз (8) прийме вигляд (5).

Записавши (8) для симетричного і віднульового циклів навантажування і прийнявши залежність  $\Delta K_{th}$  від  $R$  у вигляді (4), за аналогією з (1) знайдемо вираз для  $\psi_{\sigma}^{mp}$ . З метою спрощення і приведення його до зручного для подальших розрахунків вигляду приймемо  $\sigma_{fc} = 0,7\sigma_T$  і  $\mu = 0,3$ . У випадку використання максимального порогового КІН, який відповідає симетричному циклу навантажування, отримаємо залежність

$$\psi_{\sigma}^{mp} = \sqrt{\frac{2^{2v} l + 0,5(K_{th} / \sigma_T)^2}{l + 0,5(K_{th} / \sigma_T)^2}} - 1. \quad (9)$$

Відповідно для розмаху порогового КІН, що відповідає віднульовому циклу навантажування, отримаємо

$$\psi_{\sigma}^{mp} = \sqrt{\frac{l + 0,5(\Delta K_{th} / 2\sigma_T)^2}{2^{-2v} l + 0,5(\Delta K_{th} / 2\sigma_T)^2}} - 1. \quad (10)$$

Із співвідношень (9) і (10) випливає, що чутливість границі витривалості матеріалу до асиметрії циклу навантажування залежить від таких чинників: розміру тріщини  $l$ , границі плинності  $\sigma_T$  і порогового КІН  $\Delta K_{th}$ , а також від величини  $v$ . Як бачимо вплив середніх напружень на границю витривалості матеріалу фіксується тільки при  $l \neq 0$  і  $v \neq 0$ . Якщо величини  $l$  і  $v$  рівні нулю, то  $\psi_{\sigma}^{mp} = 0$ . Для великих за розміром тріщин вирази (9) і (10) приймають вигляд (6).

Зауважимо, що зміна параметрів, які входять до цих виразів, по-різному впливає на  $\psi_{\sigma}^{mp}$ . Так, зі збільшення значень  $l$ ,  $\sigma_T$  і  $v$  значення  $\psi_{\sigma}^{mp}$  повинно зростати, а зі збільшенням  $\Delta K_{th}$  – спадати.

Розглядаючи вплив окремих параметрів на коефіцієнт  $\psi_{\sigma}^{mp}$  та виконуючи цей аналіз стосовно сталей, для яких  $(K_{th})_{R=-1} = 4...6$  МПа  $\sqrt{m}$  і  $v = 0,6...0,8$ , отримано розрахункові криві, зображені на рис. 1, 2.

За формулами (9), (10) можливо встановити вплив на коефіцієнт  $\psi_{\sigma}^{mp}$  зміни механічних властивостей і порогового КІН, які можуть залежати від розмірів зразків.

Виходячи з повного розв'язку для компонентів тензора напружень, на основі виразу (8) з врахуванням (4) і спрощень, прийнятих під час виведення формул (9), (10), отримаємо

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} = \sqrt{\frac{l + 0,5(K_{th} / \sigma_T)^2}{2^{2v} (1 - R)^{-2v} l + 0,5(K_{th} / \sigma_T)^2}} \quad (11)$$

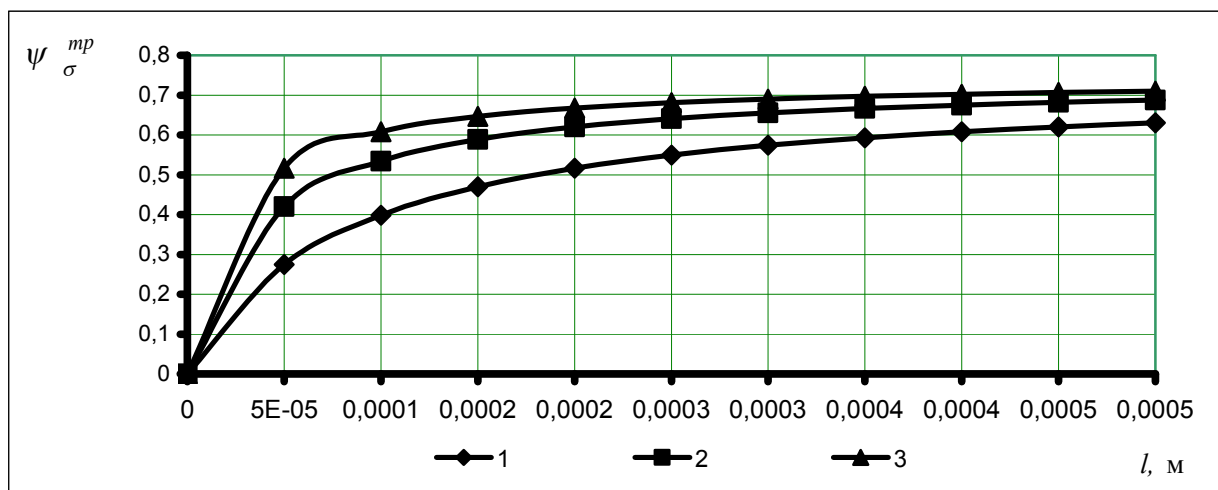
для максимального значення КІН, що відповідає симетричному циклу навантажування, і

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} = \sqrt{\frac{2^{-2v} l + 0,5(\Delta K_{th} / 2\sigma_T)^2}{(1 - R)^{-2v} l + 0,5(\Delta K_{th} / 2\sigma_T)^2}} \quad (12)$$

для розмаху порогового КІН, що відповідає віднульовому циклу навантажування.

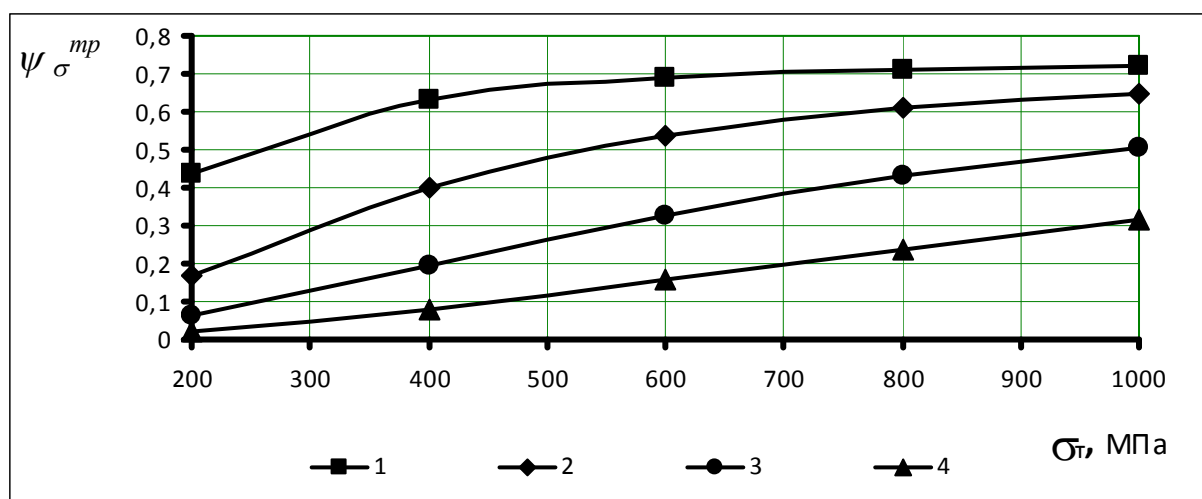
Згідно з даними виразами діаграма граничних відносних амплітуд напружень залежить від границі плинності, порогового КІН і довжини тріщини. Повні діаграми граничних відносних амплітуд напружень, визначені за формулами (11), (12) для тріщин розміром 0,01 мм і різних значень  $\sigma_T$  зображені на рис. 3.

Підводячи підсумки, можна сказати, що асиметрія циклу навантажування на границю витривалості тією чи іншою мірою здійснює вплив у кожному випадку. Для гладких зразків він підсилюється зі збільшенням міцнісних характеристик матеріалу, а для реальних деталей, які містять тріщини, - зі збільшенням розмірів тріщин. Тому, беручи до уваги, що індикатор



1 -  $\sigma_T = 400$  МПа; 2 -  $\sigma_T = 600$  МПа; 3 -  $\sigma_T = 800$  МПа

Рисунок 1 – Залежності коефіцієнта  $\psi_{\sigma}^{mp}$  від довжини тріщини  $l$ , отримані за формулами 9, 10



1 -  $l = 0,5$  мм; 2 -  $l = 0,1$  мм; 3 -  $l = 0,03$  мм; 4 -  $l = 0,01$  мм

Рисунок 2 – Залежності коефіцієнта  $\psi_{\sigma}^{mp}$  від міцнісних характеристик матеріалу, отримані за формулами 9, 10

втомні виготовлений із сталі з  $\sigma_T = 600$  МПа і містить концентратор напружень у вигляді V-подібної кільцевої виточки з радіусом заокруглення вершини меншим 0,1 мм, його можна з певним наближенням розглядати як такий, що містить тріщини, а, отже, зазнає значного впливу асиметрії циклу навантажування на границю його витривалості. Таким чином, отримані результати необхідно враховувати під час розроблення методики та обладнання для дослідження втомних характеристик індикаторів різьбових з'єднань.

#### Література

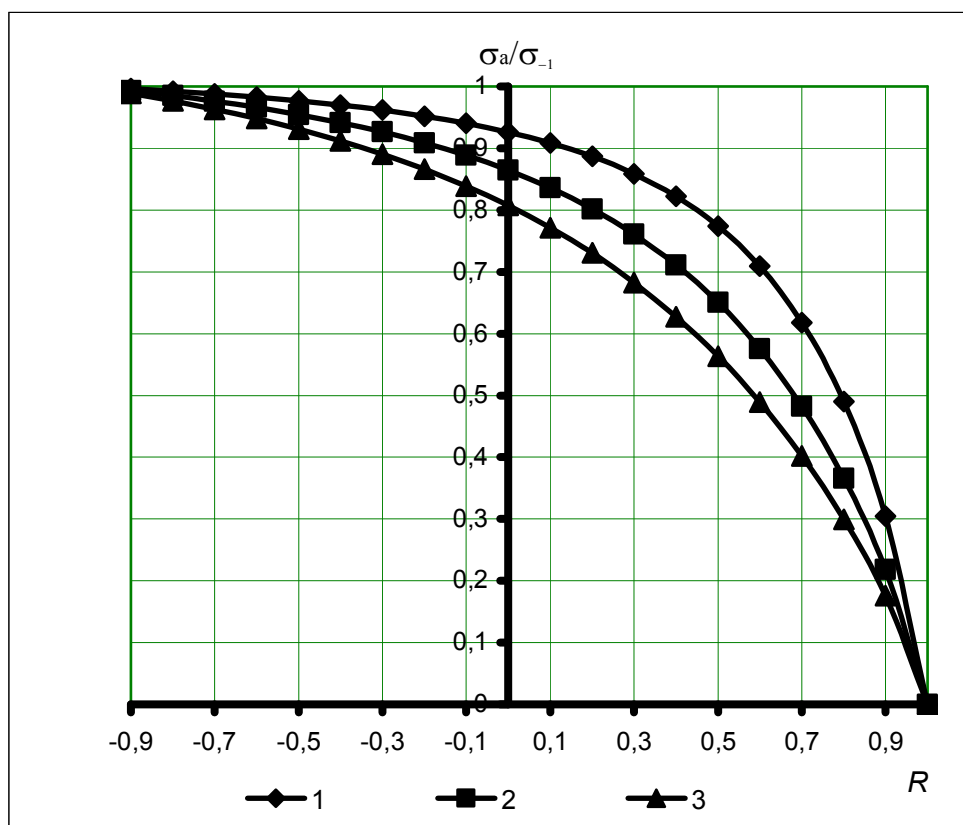
1 Щербюк Н.Д. Резьбовые соединения труб нефтяного сортамента и забойных двигателей / Н.Д. Щербюк, Н.В. Якубовский. — М.: Недра, 1974. — 235с.

2 Крыжановский Е.И. Влияние асимметрии цикла на сопротивление коррозионной усталости соединений буровых труб / Е.И. Крыжановский // Физ.-хим. механика материалов, — 1990. — Т. 26. — №4. — С. 87-89.

3 Артим В.І. Оцінка пошкоджуючої дії асиметричного навантаження на елементи бурових і штангових колон / В.І. Артим // Нафтогазова енергетика. — 2009. — №4. — С. 26-32.

4 Серенсен С.В. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность / С.В. Серенсен, В.П. Когаев, Р.М. Шнейдерович. — М.: Машиностроение, 1977. — 232с.

5 Когаев В.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность : Справочник / В.П. Когаев, Н.А. Махутов, А.П. Гусенков. — М.: Машиностроение, 1985. — 224 с.



1 -  $\sigma_T = 400$  МПа; 2 -  $\sigma_T = 600$  МПа; 3 -  $\sigma_T = 800$  МПа

Рисунок 3 - Діаграма граничних відносних амплітуд напружень за наявності тріщин розміром 0,01 мм

6 Лисканич М. В. Методика вибору межі витривалості індикатора накопичення пошкоджень від утомленості різьбових з'єднань / М.В. Лисканич, А.П. Джус, Я.С. Гриджук: Зб. тез доповідей НТК проф.-виклад. складу ІФДТУНГ. — Івано-Франківськ, 2001. — С. 72-73.

7 Кудрявцев П.И. Нераспространяющиеся усталостные трещины / П.И. Кудрявцев. — М.: Машиностроение, 1982. — 171с.

8 Klesnil M. Effekt of stres cycle asymetry on fatigue crack growth / M. Klesnil, P.Lukas: Mater. Sci and Eng. — 1972. — VII, №4. — P. 231-240.

9 Иванова В.М. Природа усталости металлов / В.М. Иванова, В.Ф. Терентьев. — М.: Металлургия, 1975. — 456с.

10 Трощенко В.Т. Исследование влияния концентрации напряжений на характеристики сопротивления усталостному разрушению сталей по критерию зарождения трещины / В.Т. Трощенко, В.И. Драган // Проблемы прочности. — 1986. — № 2 — С. 3-6.

11 Романив О.Н. Припороговый рост коротких усталостных трещин / О.Н. Романив, В.Н. Симинькович, А.Н. Ткач // Физ.-хим. механика материалов. — 1982. — №3. — С. 50-57.

12 Доможиров Л.И. Теоретический анализ влияния коротких трещин на предел выносливости материалов / Л.И. Доможиров // Проблемы прочности. — 1983. — №7. — С. 35-40.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
20.04.10  
Рекомендована до друку професором  
**Івасівим В.М.**