

Київський політехнічний інститут

На правах рукопису

УДК 639.432:620.178.3

Пономаренко Тимофій Борисович.

МАЛОЦИКЛОВА ВТОМА МАТЕРІАЛІВ ТА
ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЯ ПРИ СКЛАДНОМУ
НАПРУЖЕНОМУ СТАНІ

Спеціальність : 01.02.06 - динаміка, міцність машин,
приладів та апаратури.

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата технічних наук.

КИЇВ - 1994

АН України
ІНІІ ім. В. Стефанишина



00778899 (5)

Робота виконана у Київському політехнічному інституті.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Можаровський Н.С.

Науковий консультант: доктор технічних наук,
Бобир М.І.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Стрижало В.А.
кандидат технічних наук, старший
наук. співробітник
Ігнатович С.Р.

Провідна установа - АНТК "Антонов"

Захист дисертації відбудеться "21" 02 1994 р.
о 15 годині на засіданні спеціалізованої Ради
068.14.04. Київського політехнічного інституту,
(252056, Київ - 56, проспект Перемоги, 37, КПІ - 1201,
корп. 1, ауд 166).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці
Київського політехнічного інституту

Автореферат розісланий "21" 01 1994 р.
Вчений секретар
спеціалізованої Ради
к.т.н., доцент

Боронко О.А.

ДВ - 20.100
- 3 -

АНОТАЦІЯ.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню закономірностей малоциклової втоми титанових сплавів типу ВТЗ-1, ВТ-14 і конструктивних елементів при м'якому та жорсткому режимах навантаження в умовах складного напруженого стану з урахуванням основних експлуатаційних факторів (виду напружено-деформованого стану, асиметрії циклу і частоти навантаження). Як конструктивні елементи використовувалися трубчаті зразки з кільцеподібною зовнішньою виточкою.

У роботі на основі плану експерименту та статистичної обробки результатів випробувань побудовані математичні моделі, що дозволяють враховувати вищезгадані фактори на базі випробувань до 10⁴ циклів.

Проведено розрахунки напружено-деформованого стану (НДС) у конструктивних елементах на основі методу скінчених елементів у тривимірній постановці з урахуванням виникаючих пружнопластичних деформацій. Отримані результати використовувалися для перевірки сучасних методик розрахунку довговічності елементів конструкцій на стадії їх інженерного проектування. Показано, що врахування виду напруженого стану в розрахункових моделях істотно підвищує точність розрахунків несучої здатності елементів конструкцій.

Результати виконаної роботи знайшли своє застосування у розрахунковій практиці на підприємствах авіаційної промисловості.

Автор захищає:

- нові експериментальні результати, що показують вплив виду напруженого і деформованого стану на малоциклову втому титанових сплавів при м'якому та жорсткому режимах навантаження в умовах плоского напруженого стану при наявності концентрації напружень;

- моделі довговічності титанових сплавів, що враховують вищезгадані фактори, побудовані на основі статистичної обробки експериментальних результатів;

- аналітичні критеріальні залежності типу Кофіна-Менсона для розрахунків довговічності з введеним параметром виду напруженого стану;

- методику розрахунків довговічності елементів конструкцій при малоцикловому навантаженні з використанням скінчено-елементного аналізу напруженого стану та побудованих критеріальних залежностей.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Титанові сплави все більш широко використовуються для виготовлення несучих елементів конструкцій авіаційних газотурбінних двигунів (зокрема дисків компресорів, лопаток та ін.) Сучасні вимоги до робочих параметрів проектуємих літальних апаратів (зростання одиничних потужностей, робота виробів в умовах складних перехідних та форсованих експлуатаційних режимів при одночасному зниженні матеріаломісткості конструкцій)приводять до зростання як загальної, так і місцевої їх навантаженості. Це супроводжується роботою конструкційного матеріалу в умовах малоциклового навантаження при складному напруженому стані. При цьому традиційні розрахункові методи не дозволяють уточнено прогнозувати ресурс таких елементів кострукцій. У наш час, в цілому, досить добре вивчені і узагальнені питання, пов'язані з розв'язанням проблеми малоциклової втоми сучасних і перспективних конструкційних матеріалів в умовах одноосного циклічного навантаження. При цьому, як показують нечисленні експериментальні дослідження, вид напруженого стану суттєво впливає на основні закономірності деформування і довговічності матеріалів при малоцикловому навантаженні (деформування). У ряді робіт показано, що перехід від лінійного напруженого стану до плоского призводить до зниження довговічності до руйнування.

МЕТОЮ РОБОТИ є дослідження основних закономірностей малоциклової втоми титанових сплавів BT3-1 та BT-14 в умовах плоского напруженого стану, оцінка впливу виду напружено-деформованного стану, асиметрії циклу, концентрації напружень на довговічність, а також введення цих параметрів в методику розрахунку несучої спроможності відповідальних елементів конструкцій.

НАУКОВА НОВИЗНА роботи полягає в тому, що :

- отримані нові експериментальні дані по малоциклової втоми сучасних титанових сплавів BT3-1 та BT-14 при м'якому та жорсткому режимах навантаження по пропорційним траєкторіям з урахуванням асиметрії циклу в умовах плоского напруженого стану;
- одержані нові результати про малоцикловою втоми конструктивних елементів при сумісній дії розтягуючо-стискуючих та крутних навантажень;
- на основі регресійного аналізу побудовані критеріальні залежності довговічності сплавів від досліджуваних факторів і апроксимовані у вигляді статистичних моделей та аналітичних виразів;

- розроблено методику розрахунку довговічності елементів конструкцій з використанням отриманих критеріїв та скінченоелементного аналізу полів напружень.

ДОСТОВІРНІСТЬ основних наукових результатів забезпечується широким дослідним обґрунтуванням припущень, постулатів та висновків. Розроблений розрахунковий метод оцінки граничного стану матеріалів при малоцикловою навантаженні (деформуванні) в умовах складного напруженого стану, при зіставленні з даними експерименту при неоднорідному напруженому стані в діапазоні експлуатаційних термосилових параметрів, показали їх ефективність з достатньою для інженерної практики точністю. Достовірність експериментальних даних підтверджується повторенням результатів, відповідним метрологічним забезпеченням вимірів та відповідною статистичною обробкою результатів.

ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ дисертаційної роботи полягає в тому, що:

- отримані характеристики малоциклової втоми титанових сплавів типу BT3-1 та BT-14 в умовах складного напруженого стану в діапазоні експлуатаційної навантаженості компресорів авіаційних ГТД;

- побудовані статистичні моделі по прогнозуванню довговічності титанових сплавів з урахуванням основних експлуатаційних чинників;

- встановлені закономірності впливу концентраторів напружень (деформацій) на малоцикловою втоми титанових сплавів в зоні експлуатаційних навантажень стосовно до авіаційних ГТД. Отримані результати дисертаційної роботи можуть бути використані при вирішенні проблем прогнозування несучої спроможності відповідальних елементів конструкцій виробів нової техніки на стадії їх інженерного проектування.

Експериментальні результати та математичні моделі знайшли своє використання в розрахунковій практиці на Запорізькому моторобудівному об'єднанні "Мотор-Січ", а також в учбовому процесі в Київському політехнічному інституті при вивченні курсів "Опір матеріалів" та "Теорія пластичності і повзучості".

АПРОБАЦІЯ РОБОТИ. Основні результати дисертації доповідались на міжнародній конференції по прогнозуванню довговічності машинобудівних конструкцій при циклічному навантаженні (Німеччина, Вісмар, 1989); міжнародній науково-технічній конференції "Молоді вчені в вирішенні комплексної програми НТП країн-членів РЕВ (Київ, 1989); Всесоюзному симпозиумі " Міцність матеріалів та елементів конструкцій при складному напруженому стані (Житомир, 1989); XXII

Всесоюзній нараді по проблемах міцності двигунів (Москва, 1990); VII наукова - технічна конференція " Проблеми підвищення міцності машинобудівних конструкцій " (Новосибірськ, 1989); наукових конференціях професорсько-викладацького складу Київського політехнічного інституту (1987 - 1992).

ПУБЛІКАЦІЇ. Основні результати дисертації відображені в 10 друкованих роботах.

СТРУКТУРА ТА ОБСЯГ РОБОТИ. Дисертація складається з вступу, 4 розділів, заключення, загальних висновків, списку літератури, що містить 121 найменувань. Повний обсяг роботи 82 сторінок машинописного тексту, 42 малюнків та 12 таблиць.

ЗМІСТ РОБОТИ.

У вступі обґрунтовується актуальність, наукова новизна, практичне значення роботи і викладений її стислий зміст.

У першому розділі надається критичний огляд науково-технічної літератури з проблеми малоциклової втоми матеріалів та конструктивних елементів при різних видах термосилового навантаження.

Відмічається, що сучасні несучі авіаційні конструкції експлуатуються в умовах складної взаємодії силової та температурної навантаженості. Одним із факторів, який суттєво обмежує їх ресурс в таких умовах, є інтенсивне протікання процесів перерозподілу деформацій, зміна структурних параметрів та механічних властивостей матеріалу, накопичення тривалих статичних та малоциклових пошкоджень.

Вирішення проблеми моделювання процесів пружнопластичного деформування та граничного стану при різних видах напруженого стану здійснюється різними напрямками, основні з яких: дослідження закономірностей кінетики зміни механічних властивостей конструкційних матеріалів в залежності від параметрів цикла навантаження (деформування); вивчення накопичення пошкоджень перерозподілу напруг (деформацій) в умовах неоднорідного напруженого стану; дослідження впливу виду напруженого стану на характеристики міцності та довговічності. Вивчення закономірностей впливу виду напруженого стану на закономірності деформування та руйнування сучасних та перспективних конструкційних матеріалів при малоцикловому навантаженні (деформуванні) є важливою ланкою в обґрунтуванні розрахунків елементів конструкцій на малоциклово втому. При цьому, порівняно невеликий кількісний вплив виду напруженого стану на пружнопластичне деформування матеріалу (зразка) при активному навантаженні, багаторазово накладаючись від цикла до циклу, призводить до істотних змін кінети-

ки його деформування та довговічності порівнюючи, наприклад, з експериментом в умовах розтягу-стиску. Подібних результатів досліджень сьогодні в літературних джерелах опубліковано дуже обмежена кількість по причині їх складнощів.

Аналіз літературних джерел дозволив сформулювати на основі сучасних практичних і теоретичних потреб проблеми, цілі та задачі досліджень по темі роботи.

Другий розділ присвячується основним питанням планування експерименту, описано обладнання і методику проведення експерименту по встановленню основних закономірностей деформування та граничного стану титанових сплавів, а також конструктивних елементів залежно від різних схем прикладення навантажень у вигляді повздожньої сили та крутного моменту.

Оскільки в роботі ставиться задача вивчення відразу великої кількості чинників, то показано, що доцільним є використання теорії планування експерименту та статистичної обробки результатів.

Для побудови регресійної моделі як для м'якого так і для жорсткого режимів навантаження використовували багаточинниковий регулярний план 3 // 27 (з двома паралельними дослідженнями).

Для жорсткого навантаження як незалежні чинники X_1^H, X_2^H, X_3^H були прийняті $X_1^H = \epsilon_A = \sqrt{\epsilon_a^2 + \frac{1}{3}\delta_a^2}$ - амплітуда інтенсивності деформації; $X_2^H = \omega_3 = \arctg(\frac{\delta_a}{\sqrt{3}\epsilon_a})$ - кут орієнтації траєкторії деформування; $X_3^H = R_3 = \epsilon_{amin}/\epsilon_{amax}$ - коефіцієнт асиметрії циклу, який є одночасно блоковим чинником.

При м'якому режимі навантаження як незалежні фактори X_1^M, X_2^M, X_3^M були прийняті $X_1^M = \sigma_a = \sqrt{\sigma_a^2 + 3T_a^2}$ - амплітуда еквівалентних напружень; $X_2^M = \omega_3 = \arctg(\frac{\sqrt{3}T_a}{\sigma_a})$ - кут орієнтації траєкторії напружень; $X_3^M = \alpha$ - величина кривизни в вершині концентратора напруг, є одночасно блоковим чинником.

Такі чинники, як температура ($T = 293$ К), частота ($f = 1/60$ цикл/с), вигляд циклу (пилородібний) залишались однаковими для всіх дослідів. За функції відгуку приймалась довговічність, яка виражена десятичним логарифмом числа циклів до виникнення в зразку наскрізної щілини (lgN).

Для реалізації програми досліджень були використані експериментальні комплекси УСНС-2 та УСНС-3, створені в лабораторії міцності і пластичності кафедри динаміки, міцності машин та опору матеріалів Київського політехнічного Інституту для дослідження механічних властивостей матеріалів при простому та складному

повторно-змінному навантаженні (деформуванні) в умовах плоского напруженого стану. Для дослідження характеристик малоциклової втоми при плоскому напруженому стані використовувались тонкостінні трубчаті зразки. Зовнішній діаметр трубки D - 11 мм, товщина стінки δ - 0,5 мм. Відношення товщини стінки до середнього діаметру не перевищувало 0,05, що забезпечує достатню однорідність напруженого стану.

Як конструктивні елементи використовувались трубчаті зразки з V - подібною зовнішньою кільцевою виточкою. Досліджено два типи конструктивних елементів з радіусами кривизни у вершині концентратора R - 0,63 мм та R - 0,1 мм.

Розроблена методика дозволяє вивчати закономірності деформування та довговічності при різній асиметрії жорсткого та м'якого циклу навантаження по пропорційним і непропорційним траєкторіям навантаження.

Третій розділ дисертаційної роботи присвячений аналізу результатів експериментів, виконаних відповідно плану. Для зручності обробки та інтерпретації результатів експерименту від натуральних значень факторів переходимо до безрозмірних, при цьому факторні моделі постулюються в вигляді ортогональних поліномів Чебишева. Натуральні та кодовані значення рівнів вар'ювання змінних з формулами переходу від одних до других приведені в табл.1 і 2, відповідно, для жорсткого і м'якого режимів навантаження.

Криві малоциклової втоми для сплавів ВТ-14 і ВТ3-1 при жорсткому режимі навантаженні в умовах плоского напруженого стану приведені на рис.1. Встановлені закономірності зниження довговічності досліджуваних сплавів в залежності від орієнтації траєкторії деформування. Аналогічні залежності для сплава ВТ3-1 при м'якому режимі малоциклового навантаження показані на рис.2, а довговічність досліджуваних конструктивних елементів в залежності від траєкторії навантаження для різних рівнів концентрації напружень - на рис.3. та 4, показано, що існує неоднозначна залежність довговічності титанових сплавів від орієнтації траєкторії навантаження (деформування).

Табл. 1

Назви та натуральні позначення факторів	Номер фактора	Значення рівнянь фактора	Рівні			Формули переходу від натуральних до кодованих змінних
			F	X	Z	
Амплітуда еквівалентної деформації циклу ε_a , (%)	1	0.65	0	-1	1	$X_1 = \frac{100}{15} (\varepsilon_a - 0.8)$ $Z_1 = 3(X_1^2 - \frac{2}{3})$
		0.8	1	0	-2	
		0.95	2	1	1	
Кут виду формованого стану ω_a , (град)	2	0	0	-1	1	$X_2 = \frac{1}{45} (\omega_a - 45)$ $Z_2 = 3(X_2^2 - \frac{2}{3})$
		45	1	0	-2	
		90	2	1	1	
Коефіцієнт асиметрії циклу деформації R_a	3	-1	0	-1	1	$X_3 = 2(R_a + \frac{1}{2})$ $Z_3 = 3(X_3^2 - \frac{2}{3})$
		-0.5	1	0	-2	
		0	2	1	1	

Табл. 2

Назви та натуральні позначення факторів	Номер фактора	Значення рівнянь фактора	Рівні			Формули переходу від натуральних до кодованих змінних
			F	X	Z	
Амплітуда еквівалентних напружень циклу σ_a , (МПа)	1	465	0	-1	1	$X_1 = \frac{1}{10} (\sigma_a - 475)$ $Z_1 = 3(X_1^2 - \frac{2}{3})$
		475	1	0	-2	
		485	2	1	1	
Кут напруженого стану ω_s , (град)	2	0	0	-1	1	$X_2 = \frac{1}{30} (\omega_s - 30)$ $Z_2 = 3(X_2^2 - \frac{2}{3})$
		30	1	0	-2	
		60	2	1	1	
Кривизна у вершині концентратора α , (мм)	3	0	0	-29	-49	$X_3 = \frac{15}{2} (\alpha - \frac{116}{3})$ $Z_3 = \frac{1}{28} (X_3^2 + 39X_3 - 1082)$
		1.6	1	-17	-32	
		10	2	46	101	

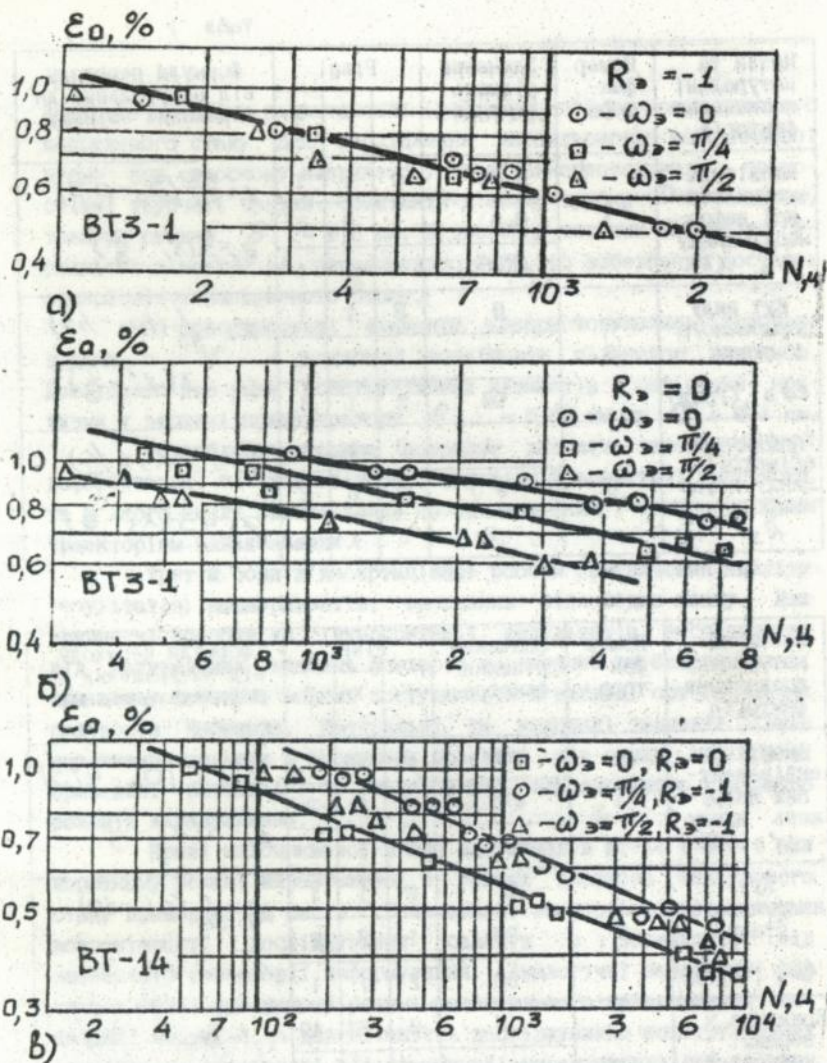


Рис. I. Криві малоциклової втоми сплавів BT3-I та BT-14 при різних асиметриях циклу деформації в умовах пропорційного навантаження

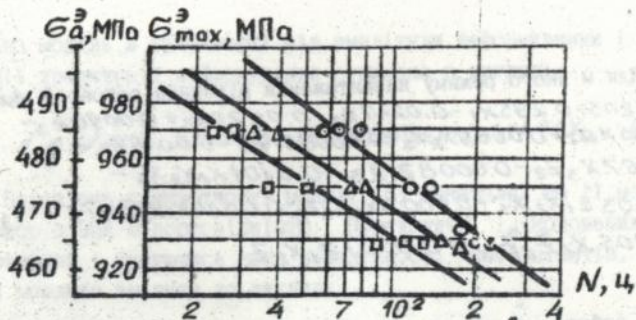


Рис. 2. Криві малоциклової втоми сплава ВТЗ-І при $T=293\text{K}$ та різних кутах навантаження ω_s ($\circ - \omega_s = 0^\circ$; $\Delta - \pi/6$; $\square - \pi/3$).

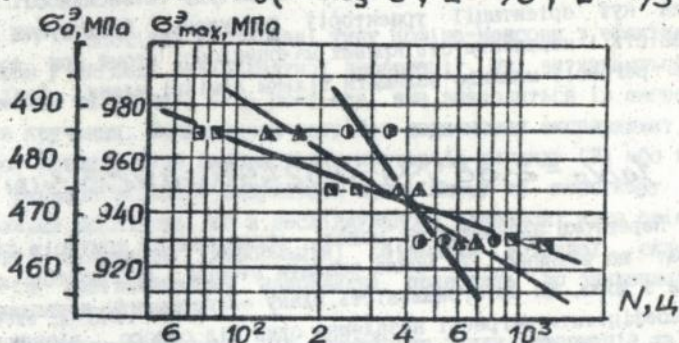


Рис. 3. Криві малоциклової втоми сплава ВТЗ-І / $T=293\text{K}$ для зразка з концентратором $K=1,6$ при різних співвідношеннях напружень σ та τ в мінімальному перерізі зразка ($\circ - \omega_s = 0^\circ$; $\Delta - \pi/6$; $\square - \pi/3$).

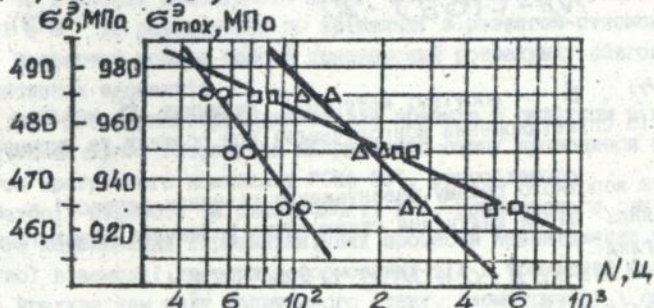


Рис. 4. Криві малоциклової втоми сплава ВТЗ-І $T=293\text{K}$ для зразка з концентратором, $K=10$ при різних співвідношеннях σ та τ в мінімальному перерізі зразка ($\circ - \omega_s = 0^\circ$; $\Delta - \pi/6$; $\square - \pi/3$).

Для м'якого режиму навантаження рівняння регресії має вигляд:

$$\begin{aligned} \lg N_p = & 2.5205 - 0.295X_1 - 0.0247Z_2 - 0.0279X_3 + 0.0090Z_3 - \\ & - 0.1325X_1X_2 + 0.0069X_2X_3 + 0.0008X_1Z_3 - 0.0018Z_3 - \\ & - 0.0067X_3Z_2 - 0.0008Z_1Z_3 - 0.0101X_1X_2X_3 - \\ & - 0.00303Z_1X_2X_3 + 0.0003X_1Z_2Z_3 - 0.0044X_1X_2Z_3 - \\ & - 0.0005X_1Z_2Z_3 + 0.0001Z_1X_2Z_3 \end{aligned} \quad (1)$$

В роботі отримано рівняння регресії без врахування впливу концентрації напружень, залишив лише амплітуду інтенсивності напружень та кут орієнтації траєкторії напружень. Враховуючи прямолінійність і паралельність кривих малочислової атома при побудові рівнянь регресії можливо залишити тільки лінійні члени. Тоді отримаємо:

$$\lg N_p = 2.88994 - 0.32491X_3 - 0.17258X_2 \quad (2)$$

Перевірка адекватності моделі, проведена по критерію Фішера, показала, що рівняння (2) можна вважати вірним з 96% достовірністю. Виходячи з того, що ортогональність плану експерименту дозволяє визначити коефіцієнти регресії незалежно один від одного, рівняння (2) можливо замінити таким (переходячи від кодових величин до натуральних):

$$N_p = C(\sigma_a^2)^m \cdot 10^{B \omega s} \quad (3)$$

де C , m , B - постійні матеріалу. Величину B можливо визначити із співвідношення довговічності при розтягу та скручуванні.

Для жорсткого режиму навантаження рівняння регресії в кодіваних змінних після видалення статистично незначних коефіцієнтів приймає вигляд:

$$\begin{aligned} \lg N_p = & 2.95663 - 0.408X_1 - 0.20036X_2 + \\ & + 0.38606X_3 - 0.0976Z_3 - 0.06326X_3X_1 - \\ & - 0.18417X_2X_3 \end{aligned} \quad (4)$$

Для знакопостійного циклу деформування ($R_2 = 0$)

регресійна модель в залежності від амплітуди деформування і куту орієнтації траєкторії деформування отримана в вигляді:

$$Lg N_p = 3.24508 - 0.48005X_1 - 0.41471X_2 \quad (5)$$

Перевірка адекватності моделі (5) показала, що її можна вважати вірною з 95%-ю достовірністю. Переходячи від кодованих величин до натуральних і базуючись на незалежності коефіцієнтів, рівняння регресії можливо змінити до вигляду:

$$N_p = C(\epsilon_\alpha)^m \cdot 10^{B\omega} \quad (6)$$

де C і m - постійні у рівнянні типу Кофіна-Менсона з ефективним параметром у вигляді еквівалентної деформації, які визначаються з експерименту на розтяг; B - постійна, яка знаходиться із експерименту на кручення. Таким чином потрібен додатковий експеримент для того, щоб можливо було використання критеріїв вигляду (3) або (6).

Експериментальні результати при м'якому та жорсткому режимі навантаження показують, що в досліджуваному діапазоні кута орієнтації траєкторії напружень (деформацій) збільшення дотичної складової частини в еквівалентному напруженні приводить до зниження довговічності до 50%.

Знайдена кореляція між асиметрією циклу деформацій та видом деформованого стану. Якщо при симетричному циклі навантаження криві малоциклової втоми при розтязі-стиску та крученні практично співпадають, то в умовах пульсуючого циклу число циклів до руйнування при крученні в 8 - 10 разів менше по зрівнянні з розтягом-стиском.

Четвертий розділ роботи присвячений розрахунку довговічності конструктивних елементів.

Всі розрахунки проводилися для зразків з радіусом в вершині вирізки $R = 0.63$ мм. Розрахунок напруженого стану проводився за допомогою програмного комплексу "ОКА-86", розробленого в лабораторії міцності та пластичності КНІ, призначеного для числового моделювання термомеханічних процесів навантаження та контактної взаємодії твердих деформованих тіл в тримірній постановці з урахуванням виду напруженого стану, геометричної і силової циклосиметрії тіла та умов його навантаження.

Спочатку був проведений розрахунок конструктивного елементу при пружному навантаженні осью розтягуючою силою і крутним момен-

том. Отримані числові значення теоретичних коефіцієнтів концентрації при розтязі, крученні. Потім ті ж коефіцієнти були вираховані при використанні відомого рішення Нейбера. Отримані такі значення $\alpha_\sigma = 2,339$; $\alpha_\epsilon = 1,215$. Похибка не перевищила 3%, тобто можна сказати, що точність числового розрахунку задовільна. Потім була виконана серія розрахунків цього ж конструктивного елемента з граничними умовами, які моделювали умови його експериментального дослідження. Всього виконано дев'ять розрахунків при різних значеннях номінальної інтенсивності напружень та номінального кута.

Результати однієї із таких розрахунків приведені на рис.5 в вигляді ізополос інтенсивності напружень. Отримане рішення порівнювалось з рішенням по залежностях Нейбера та М.А. Махутова, відповідно:

$$K_\sigma \cdot K_\epsilon = \alpha_\sigma^2 \quad (7)$$

$$\frac{K_\sigma \cdot K_\epsilon}{\alpha_\sigma^2} = F[\alpha_\sigma \bar{\sigma}_n; f(\bar{\sigma}_n, \bar{\epsilon}_n)] \quad (8)$$

де K_σ, K_ϵ відповідно коефіцієнти концентрації напружень та деформацій, а $\bar{\sigma}_n, \bar{\epsilon}_n$ - відповідно номінальні напруження та деформації в відносних величинах (до границі текучості). Функція F для

ступеневого закону зміцнення має вигляд:

$$F = 1/(\alpha_\sigma \bar{\sigma}_n)^{n(1-m)[1-(\bar{\sigma}_n - 1/\alpha_\sigma)]} \quad (9)$$

де n - постійна матеріалу, яка визначається із розрахунку або експерименту для даних α_σ та $\bar{\sigma}_n$; m - показник ступеневої апроксимації діаграми деформування.

Показано, що найбільш прийнятним для розрахунків коефіцієнтів концентрації в умовах повторно-зміного пружнопластичного деформування є підхід М.А. Махутова. При цьому максимальна похибка при знаходженні максимальних напружень не перевищує 2% по відношенню до розрахунків по МКЕ.

Для приведення отриманих моделей довговічності до зручного практичного їх використання, вони були перебудовані з введенням параметру Надаї-Лоде. Так для м'якого режиму навантаження отримано:

$$N_p = A \sigma_a^m 10^6 (1 - 1/\sigma_a) \quad (10)$$

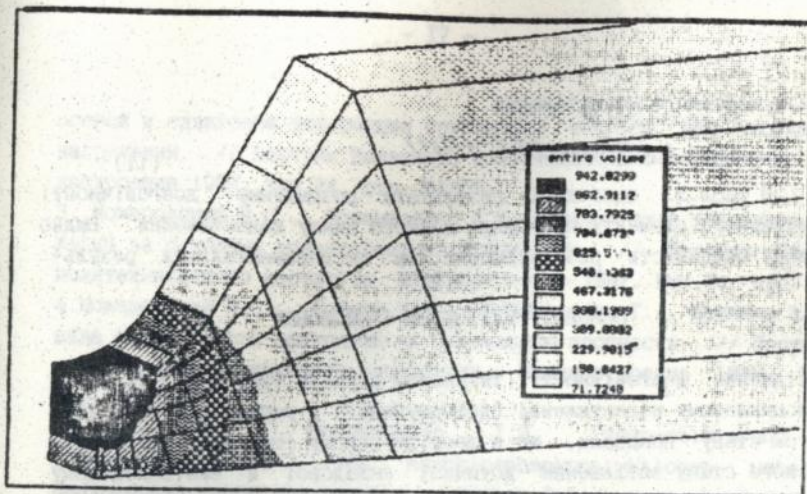


Рис. 5. Ізополоси інтенсивності напружень (МПа), отриманих для конструктивного елемента $\alpha = 1,6$ при номінальних напруженнях $\sigma_{in} = 970 \text{ МПа}$ та $\omega_s = \pi/3$.

Табл. 3

$\sigma_i^{\text{ном}}$, МПа	$\omega_{\text{ном}}$	$\sigma_{\text{max}}^{\text{МКЗ}}$, МПа	$1 - \chi_i $	$l_q N_p$	$l_q N_p^{\text{експ}}$
930	0	960,8	1,0	2,6414	2,7235
	$\pi/6$	946,6	0,886	2,8724	2,8385
	$\pi/3$	935,5	0,366	3,0146	2,934
950	0	964,6	1,0	2,8584	2,6215
	$\pi/6$	950,9	0,886	2,7656	2,6025
	$\pi/3$	939,4	0,366	2,9388	2,4530
970	0	968,6	1,0	2,4728	2,4775
	$\pi/6$	954,9	0,886	2,6902	2,1865
	$\pi/3$	942,0	0,366	2,6905	1,9135

для жорсткого навантаження

$$N_D = A \varepsilon_a^n \cdot 10^{6(1-12\varepsilon_1)} \quad (11)$$

В табл.3. приведені результати розрахунку довговічності конструктивного елемента по моделі м'якого циклу навантаження. Видно задовільну сходиність розрахункових та експериментальних результатів.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

1. Дослідження довговічності титанових сплавів типу ВТ3-1 та ВТ-14 при малоциклового навантаженні (деформувани) в умовах плоского напруженого стану показали, що в досліджуваному інтервалі кутів виду напруженого стану збільшення дотичної складової в еквівалентному напруженні приводить до зниження довговічності, тобто єдиної кривої малоциклової втоми для досліджуваних сплавів не існує.
2. Встановлена кореляція між асиметрією циклу та видом деформованого стану для досліджуваних сплавів в умовах жорсткого режиму малоциклового навантаження.
3. Показано, що при симетричному циклі навантаження криві малоциклової втоми при розтягу-стиску і крученні практично співпадають, а в умовах пульсуючого циклу довговічності в 8 - 10 разів менше, чим при розтязі-стиску. Отримані статистичні моделі довговічності при м'якому і жорсткому режимах навантаження, враховуючи параметр виду напруженого (деформованого) стану. Показ даних в вигляді статистичних моделей істотно полегшує їх подальше використання.
4. Проведені числові розрахунки напружено-деформованого стану конструктивних елементів з урахуванням виду напруженого стану. Підтверджено задовільну відповідність розрахункових даних, результатам, отриманих при використанні підходу М.А. Махутова. Зроблений розрахунок довговічності цих елементів. Результати показали задовільну відповідність експерименту.

Основні результати роботи відображені в публікаціях:

1. Шукаев С.Н., Григорьев И.Н., Пономаренко Т.В. Малоцикловая прочность стали Х18НЮТ при жестком пропорциональном нагружении. // Вестник Киевского политехнического института. Машиностроение 1988. Вып.26, стр. 17-18.
2. Шукаев С.Н., Юфа М.М., Пономаренко Т.В. Устройство для измерения

осевой и сдвиговой деформации трубчатого образца при малоцикловом нагружении. // Вестник Киевского политехнического института. Машиностроение 1987. Вып.24, стр. 64-67.

3. Можаровский Н.С., Пономаренко Т.В. Влияние вида девиатора напряжений на основные характеристики ползучести. // Вестник Киевского политехнического института. Машиностроение 1987. Вып.24, стр. 73-75.

4. Можаровский Н.С., Вобирь Н.И., Пономаренко Т.В. Функция влияния вида напряженного состояния на длительную прочность. // Вестник Киевского политехнического института. Машиностроение 1989. Вып.26, стр. 34-37.

5. Bobir N.I., Ponomarenko T.B. Prognostizierung der lebensdauerregerven von maschinenbankonstruktionen unter den Bedingungen zusammengesetzter zyklischer Belastungen. Konferenz Junger nachunchs - Wissenschaftler an der TH Wismar. 29-30 juni 1989. h.86.

6. Пономаренко Т.В. Долговечность жаропрочной стали X19NiCr при пропорциональном малоцикловом нагружении. Тезисы докладов V Межреспубликанской студенческой конференции "Проблемы повышения прочности машиностроительных конструкций", Киев, 3-5 февраля 1987 г., стр.36.

7. Заховайко А.А., Шукаев С.Н., Григорьев И.Н., Пономаренко Т.В. Многоосная малоцикловая усталость конструкционных материалов. Тезисы докладов международной научно-технической конференции "Молодые ученые в решении комплексной программы НТП стран-членов СЭВ", Киев, 19-22 апреля 1989 г., стр. 14-15.

8. Шукаев С.Н., Григорьев И.Н., Пономаренко Т.В. Малоцикловая усталость конструкционных материалов при непропорциональном нагружении. Тезисы докладов научно-технической конференции "Проблемы повышения прочности элементов машиностроительных конструкций". Новосибирск, февраль 1989 г., стр.27.

9. Можаровский Н.С., Заховайко А.А., Шукаев С.Н., Григорьев И.Н., Пономаренко Т.В. Малоцикловая усталость конструкционных материалов при различных траекториях нагружения в условиях плоского напряженного состояния. Тезисы докладов III Всесоюзного симпозиума "Прочность материалов и элементов конструкций при сложном напряженном состоянии", Житомир, 24-26 октября 1989 г., стр.21.

10. Заховайко А.А., Пономаренко Т.В., Судницкий Ф.С., Шукаев С.Н. Конструкционная прочность материалов и элементов газотурбинных двигателей при малоцикловом одноосном и многоосном нагружении. Тезисы докладов XIII Всесоюзного научного совещания по проблемам прочности двигателей. Москва, 1990, стр.95.

MS 5712

THE UNIVERSITY OF CHICAGO
LIBRARY

659567

AB 29.159

AB 29.159

Подписано к печати *Л. П. П.* Формат 60x84, 1/16
Объем *1, 2* печ. лист. Заказ № *6* Тираж *100*

ОИТМПД УкрНПМО