

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

С. В. Єпіфанов, Д. Ф. Симбірський, Є. В. Марценюк

МІЦНІСТЬ І РЕСУРС ДЕТАЛЕЙ
АВІАЦІЙНИХ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

Навчальний посібник
до лабораторного практикуму

Харків «ХАІ» 2017

ВСТУП

Відповідальні елементи багатьох сучасних машин і апаратів піддаються при експлуатації інтенсивним впливам змінних (часто – циклічних) температурних і механічних навантажень. Кількість циклів за термін служби може бути невеликою (до $5 \cdot 10^4$), і тоді довговічність лімітується умовами малоциклового руйнування. При чергуванні перехідних режимів роботи, що характеризуються швидкою зміною навантажень і температур, зі стаціонарними режимами, для яких є характерним тривале навантаження деталей, істотний вплив на процеси деформування і руйнування надає повзучість. У таких умовах працює різноманітне технологічне обладнання металургійної та хімічної промисловостей (засипні пристрої та колосники печей, кристалізатори, валки прокатних станів і машин для безперервного лиття заготовок, чаші, хімічні реактори та ін.), а також елементи газових і парових турбін (диски, лопатки, камери згоряння), космічних апаратів і надзвукових літаків, активної зони ядерних реакторів. Забезпечення їхньої міцності й довговічності – складна науково-технічна проблема, актуальність якої зростає у зв'язку з безперервним підвищенням вимог до техніко-економічних показників і надійності машин і апаратів.

У цьому навчальному посібнику наведено цикл лабораторних робіт, призначених для засвоєння основ аналізу ресурсу деталей, які працюють в умовах тривалого статичного навантаження і змінних навантажень, дія яких в умовах високих температур призводить до утворення і росту тріщин, спричиняє пластичне деформування і розвиток малоциклової втоми.

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ І СКОРОЧЕННЯ

ГТД	– газотурбінний двигун
МЦВ	– малоциклова втома
НДС	– напружено-деформований стан
ПЦ	– польотний цикл
ТМ	– тривала міцність
УПЦ	– узагальнений польотний цикл
max	– максимальний
min	– мінімальний
вібр	– вібрації
зл	– злітний
крейс	– крейсерський
МГ	– малий газ
розра	– розрахункове значення
Δ	– приріст, або розмах
α_σ	– коефіцієнт концентрації напружень
δ	– відносне подовження
ε	– деформація
ε_0	– початкова деформація
ε_c	– деформація повзучості
ε_p	– пластична деформація
ε_a	– амплітуда деформацій при циклічному навантаженні
ε_e	– еквівалентна деформація
$\varepsilon_{зал}$	– залишкова деформація
ε_k	– істинна деформація в момент руйнування
ε_n	– пружна деформація
ε_y	– умовна пружна деформація
θ	– кутова координата точок меж тріщини
μ	– коефіцієнт Пуассона
μ^*	– коефіцієнт Пуассона, що відповідає пружно-пластичному деформуванню нестисливого матеріалу
σ	– напруження
σ_0	– початкове напруження
$\sigma_{0,2}$	– умовна границя текучості
σ_{-1}	– границя витривалості для базового числа циклів N_0
σ_θ	– нормальне окружне напруження
σ_i	– інтенсивність напружень
σ_m	– середнє напруження у циклі навантаження
σ_r	– нормальне радіальне напруження
σ_a	– амплітуда напруження при циклічному навантаженні
σ_b	– границя міцності

σ_e	—	еквівалентне напруження
$\sigma_{лін}$	—	умовне пружне еквівалентне напруження
σ_p	—	границя пружності
$\sigma_{пц}$	—	границя пропорційності
$\sigma_{рл}$	—	контурне навантаження від лопатевого вінця
σ_T	—	границя текучості
$\sigma_{тр}$	—	границя тривалої міцності
τ	—	дотичне напруження
ψ	—	відносне звуження поперечного перерізу
A, m	—	параметри моделі тривалої міцності
a	—	півдовжина тріщини
a_0	—	початковий розмір тріщини
a_i	—	коефіцієнти полінома
$a_{кр}$	—	критична півдовжина тріщини
B, n	—	параметри моделі Нортон
C	—	коефіцієнт моделі Ларсона—Міллера
C_0, n	—	параметри рівняння Періса
C_2, m_2	—	параметри моделі малоциклової втоми
D	—	середньоквадратичне відхилення
E	—	модуль пружності
E_c	—	січний модуль
F_0	—	початкова площа перерізу
F_k	—	кінцева площа перерізу
f	—	власна частота коливань
K	—	коефіцієнт інтенсивності напружень
$K_{1кр}^T$	—	в'язкість руйнування при температурі T або граничне значення коефіцієнта інтенсивності напружень K_1
$[K]$	—	нормоване значення коефіцієнта запасу міцності
$K_{\Delta\varepsilon}$	—	коефіцієнт запасу міцності за критерієм малоциклової втоми
K_σ	—	коефіцієнт запасу міцності за критерієм тривалої міцності
K_N	—	коефіцієнт запасу довговічності за критерієм малоциклової втоми
K_t	—	коефіцієнт запасу довговічності за критерієм тривалої міцності
l	—	довжина
l_0	—	довжина до деформації
l_k	—	сумарна (кінцева) довжина
M	—	функція форми і розташування тріщини
N	—	кількість циклів навантаження
N_0	—	базове число циклів на кривій витривалості матеріалу
N_e	—	кількість еквівалентних циклів навантаження
$N_{e p}$	—	кількість еквівалентних циклів навантаження до

	руйнування
$N_{кр\text{ вібр}}$	– кількість віброциклів до появи тріщини критичного розміру
N_p	– кількість циклів навантаження до руйнування
$n_{зл}, n_{крейс}, n_{МГ}$	– частота обертання ротора ГТД на відповідному режимі роботи
P	– сила
$P_{л-м}$	– параметр Ларсона–Міллера
R_o, R_k	– внутрішній радіус маточини та зовнішній радіус ободу диска відповідно
$R_{мцв\ \Delta\varepsilon}$	– ресурс з малоциклової втоми, встановлений за нормованим запасом міцності
$R_{мцв\ N}$	– ресурс з малоциклової втоми, встановлений за нормованим запасом довговічності
$R_{TM\ \sigma}$	– ресурс з тривалої міцності, встановлений за нормованим запасом тривалої міцності
$R_{TM\ t}$	– ресурс з тривалої міцності, встановлений за нормованим запасом довговічності
r	– коефіцієнт асиметрії циклу навантаження
S_k	– справжня границя міцності
T	– температура
\bar{t}	– відносний час до руйнування
t	– час
t_e	– час еквівалентного сталого режиму навантаження
t_p	– час до руйнування
$t_{p\ e}$	– час до руйнування на еквівалентному сталому режимі навантаження
$t_{упц}$	– тривалість узагальненого польотного циклу
V_c	– швидкість повзучості
$\Pi_{мцв}$	– пошкодження за малоцикловою втомою
$\Pi_{мцв\ \Sigma}$	– сумарне пошкодження за малоцикловою втомою впродовж всього ресурсу
$\Pi_{мцв\ упц}$	– пошкодження за малоцикловою втомою впродовж одного узагальненого польотного циклу
Π_{TM}	– пошкодження за тривалою міцністю
$\Pi_{TM\ \Sigma}$	– сумарне пошкодження за тривалою міцністю впродовж усього ресурсу
$\Pi_{TM\ упц}$	– пошкодження за тривалою міцністю впродовж одного узагальненого польотного циклу

Лабораторна робота № 1

ФОРМУВАННЯ МОДЕЛЕЙ ТРИВАЛОЇ МІЦНОСТІ

ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

ЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ ДАНИМИ

Мета роботи: набуття навичок побудови моделей тривалої міцності високотемпературних конструкційних матеріалів за експериментальними даними, а також використання цих моделей для оцінки запасів міцності та довговічності.

1.1. Основні теоретичні положення

З підвищенням температури механічні властивості матеріалів змінюються: границі міцності, пропорційності й текучості, а також модуль пружності зменшуються; пластичність, зазвичай, збільшується, але при деяких температурах вона може і знижуватися.

Для більшості конструкційних матеріалів при нормальній температурі статична міцність практично не залежить від часу прикладання навантаження. При підвищених температурах, а для деяких матеріалів (наприклад, полімерів) навіть при нормальній температурі статична міцність залежить від тривалості навантаження, оскільки з плином часу можуть змінюватися механічні властивості матеріалу, розміри деталі й розподіл напружень у ній. Тому в умовах високих температур визначають не тільки звичайні механічні характеристики матеріалу при короточасних випробуваннях, але і характеристики при тривалій роботі. Міцність матеріалу в цьому випадку називають **тривалою міцністю (ТМ)**.

Напруження, при якому зразок, нагрітий до температури T , руйнується не раніше заданого часу t_p , називають границею тривалої міцності σ_{mp} .

Тривала міцність проявляється у вуглецевих сталей при $T > 300^\circ\text{C}$, у легированих сталей при $T > 350^\circ\text{C}$, у алюмінієвих сплавів – при $T > 100^\circ\text{C}$.

В основу визначення кількісних зв'язків між границею тривалої міцності матеріалу σ_{mp} , температурою T і часом до руйнування t_p покладено експериментальні дані випробувань зразків матеріалу при одноосьовому розтягуванні або стисненні. Ці дані узагальнюються шляхом побудови моделей тривалої міцності, з яких найбільш використовуваними є так звані «криві тривалої міцності» і моделі Ларсона–Міллера.

1.1.1. Модель «криві тривалої міцності»

При достатній кількості експериментальних точок $\{\sigma_{mp}; T; t_p\}$ може бути побудована модель «криві тривалої міцності», яка описується залежністю

$$\sigma^m \cdot t = A, \quad (1.1)$$

де $m = m(T)$ і $A = A(T)$ – параметри, які визначаються за експериментальними даними; вони істотно залежать від температури T .

При незмінній температурі матеріалу параметри моделі (1.1) залишаються незмінними, тобто $m(T) = \text{const}$, $A(T) = \text{const}$ при $T = \text{const}$. Чим вище температура, тим менше показник ступеня m і тим швидше зменшується за часом границя тривалої міцності.

Залежність (1.1) може бути перетворена до вигляду

$$m(T) \cdot \lg \sigma_{mp} + \lg t_p = \lg A(T). \quad (1.2)$$

У подвійних логарифмічних координатах ($\lg t_p$; $\lg \sigma_{mp}$) залежність (1.2) у певних межах має вигляд відрізка прямої лінії (рис. 1.1). Чим вище температура, тим менше показник ступеня m і тим швидше зменшується за часом границя тривалої міцності.

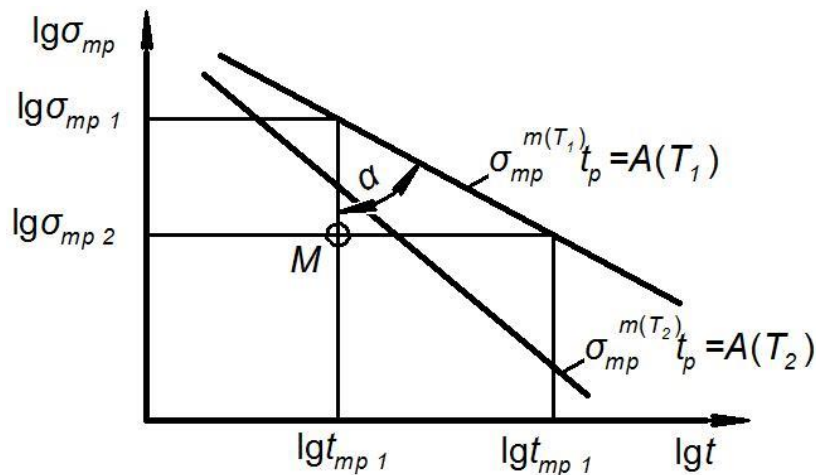


Рис. 1.1. Криві тривалої міцності при різних постійних температурах ($T_2 > T_1$)

За рівнянням (1.1) можна визначити величину границі міцності $\sigma_{mp}(T, t_p)$, якщо задати значення T і t_p , або ж знайти час до руйнування $t_p(\sigma, T)$ при відомих рівнях напружень σ і температури T .

Кожному з двох відрізків кривих тривалої міцності при постійній температурі T відповідають свої значення параметрів $m(T)$ і $A(T)$.

1.1.2. Оцінка параметрів кривих тривалої міцності

Із побудованої описаним вище способом моделі Ларсона–Міллера (1.8), задаючись різними значеннями температури T , можна отримати графічну форму моделі «криві тривалої міцності» (див. рис. 1.1) будь-якого ступеня дискретності за T .

Однак, як указано вище, область її існування не повинна виходити за

експериментально реалізовані діапазони значень T і t_p .

Із моделі «криві тривалої міцності» можна визначити параметри $m(T)$ і $\lg A(T)$ її алгебраїчної форми (1.2), якщо задатися значеннями температури T . Тоді у практично актуальному діапазоні зміни $\lg t_p$ від 1 до 4 (тобто терміну роботи від t_p 10 до 10000 часів) модель (1.2) виражається прямою лінією, що проходить через дві точки з координатами $(\lg t_{p1}; \lg \sigma_{mp1})$ і $(\lg t_{p2}; \lg \sigma_{mp2})$. Таким чином, за умови сталості параметра A при заданій постійній температурі T можна знайти значення постійних m і $\lg A$:

$$\sigma_{mp1}^{m(T)} \cdot t_{p1} = \sigma_{mp2}^{m(T)} \cdot t_{p2} = A(T) = \text{const};$$

$$\lg(\sigma_{mp1}^{m(T)} \cdot t_{p1}) = \lg(\sigma_{mp2}^{m(T)} \cdot t_{p2});$$

$$m(T) \cdot \lg \sigma_{mp1} + \lg t_{p1} = m(T) \cdot \lg \sigma_{mp2} + \lg t_{p2},$$

звідки

$$m(T) = \frac{\lg t_{p2} - \lg t_{p1}}{\lg \sigma_{mp1} - \lg \sigma_{mp2}}, \quad (1.3)$$

$$\lg A(T) = m(T) \cdot \lg \sigma_{mp1} + \lg t_{p1}. \quad (1.4)$$

1.1.3. Зв'язок між запасами міцності й довговічності

З двох параметрів, що входять до розглянутої моделі тривалої міцності, особливо важливу роль відіграє параметр $m(T)$:

– по-перше, $m(T)$ разом із $A(T)$ визначає криві тривалої міцності (1.1) для заданих T ;

– по-друге, $m(T)$ дозволяє, як це зазначено в курсі лекцій, встановити важливий для практики зв'язок між запасами тривалої міцності $K_\sigma = \frac{\sigma_{mp}}{\sigma_{екв}}$ і

довговічності $K_t = \frac{t_p}{t}$, яка виражається залежністю

$$K_t = (K_\sigma)^m. \quad (1.5)$$

На рис. 1.2 у графічній формі наведено сенс коефіцієнтів запасів міцності й довговічності та зв'язок (1.5) між ними.

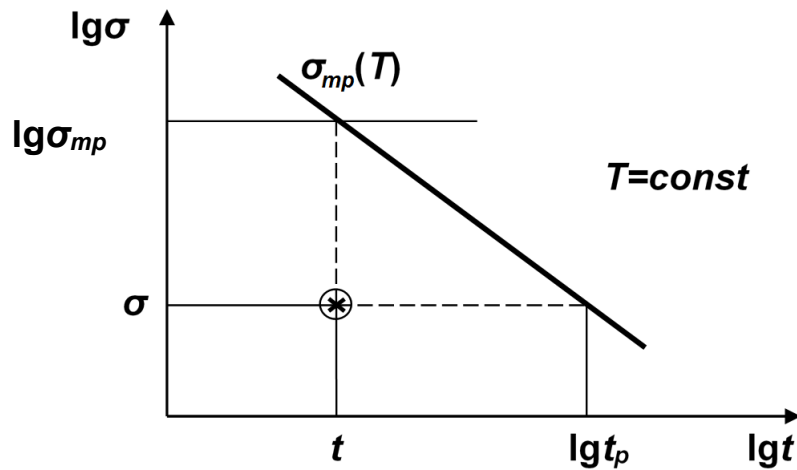


Рис. 1.2. Зв'язок між границею тривалої міцності й часом до руйнування

1.1.4. Модель Ларсона–Міллера

Модель «криві тривалої міцності» є функцією двох аргументів (часу t і температури T). Спроби дослідників сформувати модель з одним аргументом, таким, щоб його зв'язок з температурою і часом до руйнування мав універсальний характер для усіх матеріалів, дали змогу використовувати параметри Ларсона–Міллера, Шербі–Дорна, Менсона–Саккопа (або Клауса), Менсона–Хеферда. Усі ці параметри містять час до руйнування і температуру, а також деякі константи. Аналіз показав, що відхилення значень границі тривалої міцності, визначених із використанням запропонованих критеріїв, від експериментальних даних становлять від ± 5 до $\pm 10,5\%$, при цьому найбільшу точність має критерій Менсона–Саккопа.

Широке застосування на практиці отримала модель Ларсона–Міллера

$$\lg \sigma_{mp} = \varphi \left[P_{л-м}(T, t_p) \right], \quad (1.6)$$

де параметр $P_{л-м}$ визначається виразом

$$P_{л-м}(T, t_p) = T(\lg t_p + C). \quad (1.7)$$

Тут C – постійна величина, що залежить від матеріалу і визначається з експерименту, а для температури T і часу до руйнування t_p використовуються розмірності K і година відповідно.

Із технічної літератури відомо, що для більшості конструкційних матеріалів $15 < C < 30$. Зокрема, для матеріалів турбін і камер згоряння авіаційних ГТД параметр C зазвичай змінюється в межах від 15 до 20.

Слід мати на увазі, що наведені моделі тривалої міцності можуть бути використані тільки в експериментально реалізованому діапазоні σ_{mp} , T і t_p . Лише в окремих випадках допускається екстраполяція за t_p на ± 1 порядок.

На рис. 1.3 показано залежність границі тривалої міцності від параметра Ларсона–Міллера.

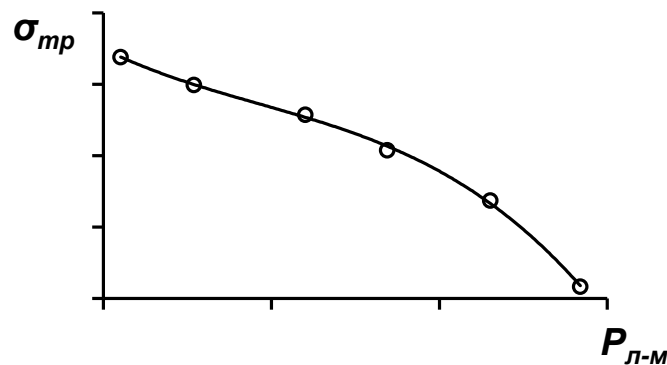


Рис. 1.3. Графічна форма моделі Ларсона–Міллера:
точки – експериментальні дані; суцільна лінія – результат апроксимації

Модель Ларсона–Міллера може бути апроксимована поліномом другого ступеня (за необхідністю третього) і подана у такій алгебраїчній формі:

$$\lg \sigma_{tr} = a_0 + a_1 (P_{л-м}) + a_2 (P_{л-м})^2 + \dots, \quad (1.8)$$

де a_i – коефіцієнти полінома, які розраховують за експериментальними даними.

1.2. Задачі до лабораторної роботи

До виконання пропонуються такі завдання:

1. Побудова моделі Ларсона–Міллера для тривалої міцності в графічній (рис. 1.3) і алгебраїчній (1.8) формах за експериментальними даними.

2. Графічне відображення моделі «криві тривалої міцності» у формі, зображених на рис. 1.1. Визначення її параметрів $m(T)$ і $A(T)$ у рівнянні (1.1) з використанням моделі Ларсона–Міллера, отриманої на попередньому етапі.

3. Визначення коефіцієнтів запасів тривалої міцності й довговічності деталі з досліджуваного матеріалу за заданими умовами навантаження σ , T у критичній області та за заданим ресурсом деталі t_p .

1.3. Вихідні дані

1. Основними вихідними даними до завдань 1 – 3 є наведені у додатку 1 експериментальні дані, отримані при випробуваннях високотемпературних

конструкційних матеріалів.

2. Вибір матеріалу узгоджується з викладачем.
3. Величину константи **C** у формулі (1.7) прийняти **C=20**.
4. Вихідні дані до задачі 3 (значення σ , T^* у критичній точці деталі й час її роботи t) задає викладач.

1.4. Порядок виконання роботи

Після засвоєння теорії і установчої співбесіди студент погоджує з викладачем вид матеріалу і розпочинає виконувати зазначені у розд. 2 завдання роботи.

1.4.1. Задача 1. Побудова моделі Ларсона–Міллера

Отримані вихідні дані необхідно занести у табл. 1.1.

Таблица 1.1

Вихідні дані до побудови моделі тривалої міцності

i	T_i , К	$\sigma_{тр м i}$, МПа	$t_{p i}$, ч	$P_{л-м}(T, t_p)$	$Lg \sigma_{тр}$	$Lg \sigma_{тр i}^{розр}$	$(Lg \sigma_{тр} - Lg \sigma_{тр i}^{розр})^2$
1	2	3	4	5	6	7	8
1							
2							
3							
⋮							

Далі необхідно:

- 1) визначити параметри моделі Ларсона–Міллера ($P_{л-м i}$; $Lg \sigma_{тр i}$) за формулою (1.7) і занести їх у стовпці 5 і 6 табл. 1.1;
- 2) для всього масиву розрахованих експериментальних точок:
 - побудувати графічну модель Ларсона–Міллера (див. рис. 1.3 і додаток 2);
 - подати (апроксимувати) її в алгебраїчній формі (1.8) (додаток 3);
- 3) зробити статистичну оцінку розкиду експериментальних даних, для чого:
 - використовуючи побудовану модель типу (1.8), знайти значення границі тривалої міцності $Lg \sigma_{тр i}^{розр}$ для початкових даних T_i і $t_{p i}$ та занести їх у стовпець 7 табл. 1.1;
 - розрахувати значення $(Lg \sigma_{тр i}^{розр} - Lg \sigma_{тр i})^2$ і математичне очікування

$$\overline{\lg \sigma_{mp i}^{розр}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg \sigma_{mp i}^{розр} ;$$

– знайти значення дисперсії за формулою

$$D_{\lg \sigma_{mp}}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\lg \sigma_{mp i}^{розр} - \lg \sigma_{mp i} \right)^2 ;$$

– визначити середньоквадратичне відхилення $D_{\lg \sigma_{mp}}$ і коефіцієнт варіації $\text{var}(\lg \sigma_{mp})$ за формулою

$$\text{var}(\lg \sigma_{mp}) = \frac{D_{\lg \sigma_{mp}}}{\lg \sigma_{mp i}^{розр}} .$$

1.4.2. Задача 2. Побудова моделі «криві тривалої міцності»

Використовуючи отриману аналітичну модель Ларсона–Міллера (1.8), побудувати графік моделі «криві тривалої міцності» (1.1) у логарифмічних координатах для заданих викладачем трьох значень температури: T_1 , T_2 , T_3 . З них два значення T_1 і T_2 мають відповідати експериментальним даним, а одне – T_3 – довільне у діапазоні між T_1 і T_2 .

Обчислення рекомендується виконувати за табл. 1.2. Рядки 1 – 3 цієї таблиці слід повторити для кожної із заданих температур.

Таблица 1.2

Розрахунок параметрів моделі «криві тривалої міцності»

Порядок розрахунків	t_p , год	10	10^2	10^3	10^4
	$\lg t_p$				
1	T_1				
2	$P_{л-м}$				
3	$\lg \sigma_{mp i}^{розр}$				
⋮	⋮				

Згідно з отриманою моделлю «криві тривалої міцності», визначити параметри $m(T)$ і $\lg A(T)$ моделі (1.2) за формулами (1.3) і (1.4) для заданих температур T_1 , T_2 , T_3 у діапазоні часу до руйнування t_p від 10 до 10^4 годин. Хід розрахунків і їхні кінцеві результати відобразити у стовпцях 7 – 10 табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Розрахунок коефіцієнтів моделі тривалої міцності

№ заданої температури	T_i, K	$\lg t_1$	$\lg \sigma_1$	$\lg t_2$	$\lg \sigma_2$	$\lg t_2 - \lg t_1$	$\lg \sigma_1 - \lg \sigma_2$	$m(T)$	$\lg A(T)$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1		1		4					
2		1		4					
3		1		4					

1.4.3. Задача 3. Визначення коефіцієнтів запасу тривалої міцності й довговічності

На графіку «криві тривалої міцності», отриманому при виконанні задачі 2, зобразити положення розрахункової точки деталі з параметрами σ , T_3 і тривалістю навантаження t (σ , t узгоджуються з викладачем).

Визначити графічно і з використанням отриманої моделі Ларсона–Міллера (1.8):

- 1) величини запасів тривалої міцності $K_\sigma(T_3)$ і довговічності $K_t(T_3)$;
- 2) відношення зазначених запасів за даними попереднього пункту і, відповідно до залежності (1.5), з використанням отриманого при виконанні задачі 2 значення $m(T_3)$;
- 3) зробити висновок про точність і можливість практичного використання залежності (1.5).

1.4.4. Звіт з роботи

Скласти індивідуальні для кожного студента звіти щодо виконання всіх завдань роботи з обов'язковим поданням:

- 1) вихідних експериментальних даних для вибраного матеріалу (стовпці 2 - 4 табл. 1.1);
- 2) отриманих аналогів рис. 1.1 – 1.3;
- 3) отриманої аналітичної моделі Ларсона–Міллера (1.8) і значення її коефіцієнта варіації $\text{var}(\lg \sigma_{\text{дл}})$;
- 4) розрахункових табл. 1.1 – 1.3;
- 5) висновків щодо вирішення завдань 1 – 3;

Форма звіту – рукописна. У ньому можливі посилання на окремо роздруковані й вкладені рисунки і таблиці.

1.5. Запитання для самоконтролю

1. Що таке тривала міцність?
2. У чому відмінність між границею тимчасової і тривалої міцності?
3. Назвіть відомі моделі тривалої міцності та їхні параметри.
4. Як побудувати ці моделі за експериментальними даними?
5. У чому полягає перевага моделі Ларсона–Міллера над моделлю «криві тривалої міцності»?
6. Як впливає температура на залежність границі тривалої міцності від часу роботи?
7. Як визначити час роботи деталі до руйнування, якщо відомі температура і напруження?
8. Як визначити запас міцності при тривалому статичному навантаженні?
9. Як визначити запас довговічності при тривалому статичному навантаженні?
10. Як пов'язані запаси міцності й довговічності при тривалому статичному навантаженні?

Лабораторна робота № 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗУМОВЛЕНОЇ ПОВЗУЧІСТЮ РЕЛАКСАЦІЇ НАПРУЖЕНЬ У ЛОКАЛЬНІЙ ОБЛАСТІ ДЕТАЛІ З ЖОРСТКИМИ ДЕФОРМАЦІЙНИМИ ОБМЕЖЕННЯМИ

Мета роботи:

- 1) набуття навичок реалізації і використання найбільш поширених моделей повзучості й тривалої міцності;
- 2) кількісні дослідження релаксації напружень, зумовлених повзучістю у критичній точці соплової лопатки турбіни в умовах жорстких деформаційних обмежень.

2.1. Основні положення

2.1.1. Явище повзучості та його моделі

Деталі багатьох машин, особливо парових і газових турбін, дизелів, реакторів та ін., тривалий час працюють під навантаженням при підвищених температурах. Цим умовам властиві деякі особливості пластичного деформування і руйнування деталей. Внаслідок повзучості деформації з плином часу можуть досягати граничних величин, при яких порушується робота машини. У результаті релаксації можливе поступове ослаблення пружного натягу в з'єднаннях деталей; за рахунок зменшення граничних напружень з часом можливе руйнування деталей після певного терміну експлуатації.

Повзучістю називають повільне накопичення залишкових (пластичних) деформацій $\varepsilon_c(t)$ за поточний час t під дією постійного напруження σ при підвищених температурах T .

Таким чином, процес повзучості описується набором з чотирьох параметрів: $\varepsilon_c(t)$, σ , T і t .

На рис. 2.1 показано типову залежність деформації повзучості матеріалу від часу при дії постійних напружень і температури. Процес повзучості умовно поділяють на три стадії (рис. 2.1, а):

1) першу стадію (ділянка ОА) прийнято називати **несталою повзучістю**, так як для неї характерна спадна швидкість накопичення деформації повзучості;

2) друга стадія (ділянка АВ) характеризується постійною швидкістю і називається **сталою повзучістю**:

3) третя стадія (ділянка ВС) починається із збільшенням швидкості деформації і закінчується руйнуванням зразка; ця стадія називається **прискореною повзучістю**.

В умовах високих температур і навантажень стадія сталої повзучості може бути відсутня (рис. 2.1, б, крива 1), а при невеликих навантаженнях і

помірних температурах може спостерігатися руйнування зразків без помітного збільшення швидкості повзучості (рис. 2.1, б, крива 3).

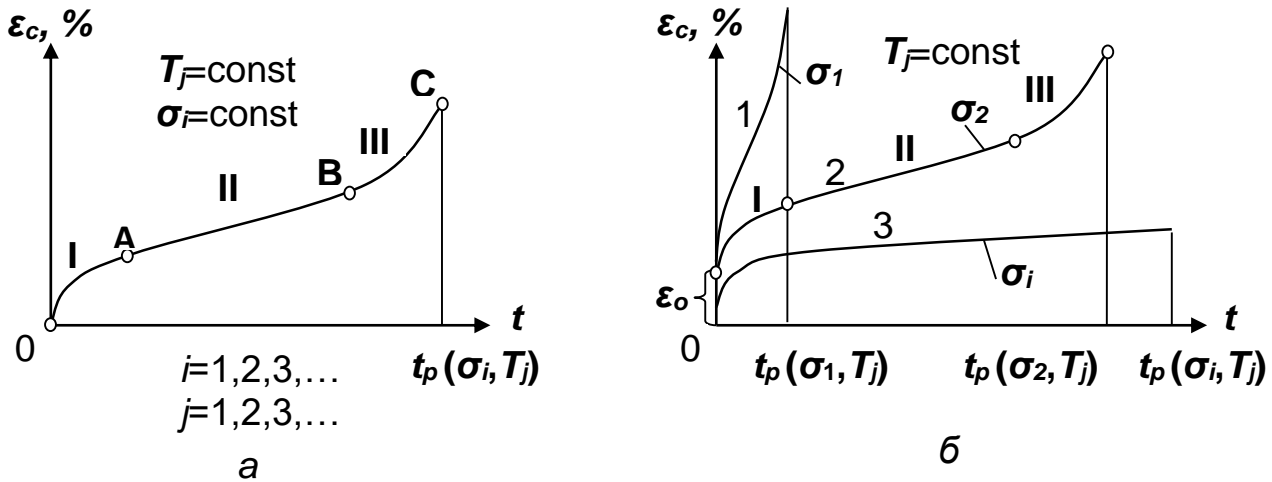


Рис. 2.1. Криві повзучості

Набір наведених на рис. 2.1 кривих, побудованих для різних температур T_j ($j = 1, 2, 3, 4, \dots$) і напружень σ_i ($i = 1, 2, 3, 4, \dots$), відповідає базовій моделі цього явища і називається **кривими повзучості**. Їх визначають шляхом проведення досить складних і об'ємних експериментів – до 10 зразків на кожну комбінацію T_j і σ_i .

Зменшити обсяг експериментів дозволяє застосування так званої **узагальненої кривої повзучості**, що являє собою залежність $\epsilon_c(\bar{t})$ від відносного часу

$$\bar{t} = \frac{t}{t_p(\sigma, T)}, \quad (2.1)$$

де $t_p(\sigma, T)$ – час до руйнування зразка, яке визначається з відомих моделей ТМ – кривих тривалої міцності або моделі Ларсона–Міллера.

На рис. 2.2, як приклад, наведено узагальнену криву повзучості для лопатевого сплаву ЖС6-У.

Час до руйнування $t_p(\sigma, T)$, зазвичай, обчислюють для заданих значень σ і T з моделі ТМ Ларсона–Міллера, яка має вигляд

$$\lg \sigma = a_0 + a_1 P_{\text{л-м}} + a_2 P_{\text{л-м}}^2 + a_3 P_{\text{л-м}}^3 + \dots, \quad (2.2)$$

параметр Ларсона–Міллера $P_{\text{л-м}}$ визначають за формулою

$$P_{\text{л-м}} = P_{\text{л-м}}(T, t_p) = T(\lg t_p + C). \quad (2.3)$$

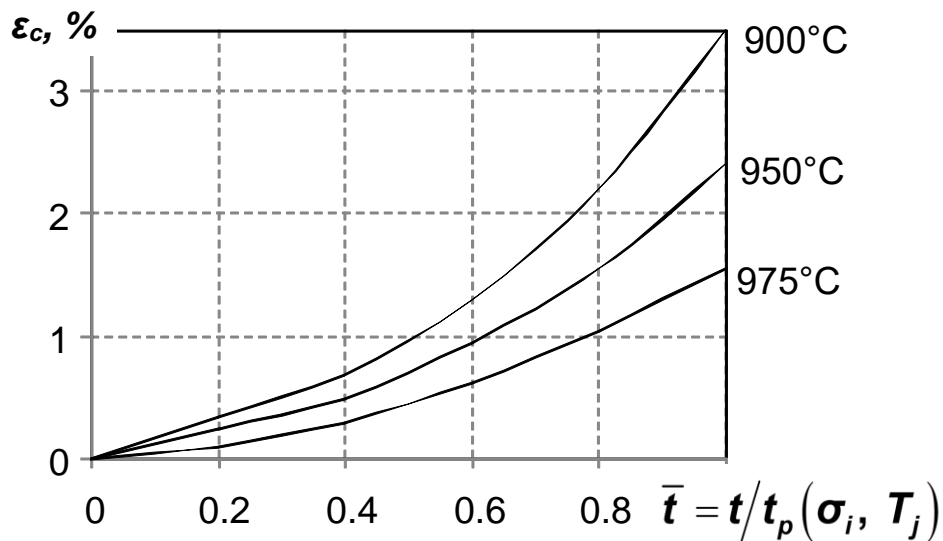


Рис. 2.2. Узагальнені криві повзучості сплаву ЖС6-У

2.1.2. Модель Нортон для сталої повзучості

До теперішнього часу не створено моделі повзучості, універсальної для всіх її стадій в широкому діапазоні параметрів σ_i і T_j .

Полегшуючою обставиною при вирішенні практичних завдань є встановлений факт, що основний період розвитку повзучості (до $\bar{t}=0.8$) припадає на сталу стадію з приблизно постійною швидкістю повзучості

$$V_c = \frac{d}{dt} \varepsilon_c(t) = \text{const}. \quad (2.4)$$

За експериментальними даними, її наближено подають у вигляді ступеневого рівняння, параметри $B(T)$ і $n(T)$ якого залежать від температури:

$$V_c = B(T) \sigma^{n(T)}. \quad (2.5)$$

Цю залежність називають **законом Нортон**.

Прийнято вважати, що цей закон справедливий в інтервалі $10^{-5} < V_c < 10^{-3}$ [%/год]. При менших швидкостях розбіжності між експериментальними даними і кривою, що описується рівнянням (2.5), збільшуються, що йде у запас міцності. При цьому реальні напруження в деталі релаксують, тобто зменшуються.

2.1.3. Релаксація напружень, зумовлена повзучістю

Якщо елемент, у якому може відбуватись повзучість, поєднаний з пружними елементами, які обмежують його можливі деформації, то

відбувається перерозподіл напружень між елементами системи. **Релаксація напружень** – це процес зменшення у часі напруження в елементі конструкції (у локальному об'ємі або критичній точці), розміри якого підтримуються постійними.

Якщо зафіксувати загальну деформацію навантаженого зразка, то напруження, які на початку мають високі значення, почнуть зменшуватися в міру того, як відбувається розвиток пластичної деформації.

Прикладами конструкцій, в яких може відбуватися релаксація напружень, є:

1) прихована температурна деформація (концентрація напружень) у локальних зонах диска або лопатки турбіни авіаційного ГТД під час переходу з одного робочого режиму на інший;

2) стрижень, зажатий між двома жорсткими плитами;

3) попередньо затягнутий болт, що з'єднує дві жорсткі пластини.

Для усталеної стадії повзучості, застосовуючи закон Нортон, можна отримати формулу, яка описує релаксацію (зменшення) напруження від початкового значення σ_0 (яке відповідає $t = 0$):

$$\sigma(t) = \frac{\sigma_0}{\sqrt[n-1]{1 + \alpha_0 \cdot t}}, \quad (2.6)$$

де $\alpha_0 = (n - 1) \cdot B \cdot E \cdot \sigma_0^{n-1}$;

E – модуль пружності матеріалу.

Можна також знайти час t релаксації (зменшення) напруження від величини σ_0 до деякої заздалегідь заданої величини σ_{\min} (наприклад, до величини, що відповідає мінімально припустимому зусиллю затягнення, при якому можливе розкриття стику у фланцевому з'єднанні):

$$t = \frac{1}{\alpha_0} \left[\left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{\min}} \right)^{n-1} - 1 \right]. \quad (2.7)$$

У формулах (2.6) і (2.7) усі величини необхідно вибирати для робочої температури T .

2.1.4. Визначення параметрів моделі Нортон

Параметри $B(T)$ і $n(T)$ моделі Нортон можуть бути наближено визначені за наявністю експериментальної інформації – узагальненої кривої повзучості $\varepsilon_c(\bar{t})$ (див. рис. 2.2). В основі запропонованого підходу лежить припущення про те, що в діапазоні малих відхилень напружень σ параметри

моделі Нортон залежать тільки від температури матеріалу T і у разі її сталості також залишаються незмінними. Тоді у рівнянні (2.5) швидкість повзучості буде залежати тільки від величини напружень σ .

Область адекватності моделі Нортон відповідає ділянці сталої повзучості; отже, при визначенні параметрів $B(T)$ і $n(T)$ слід обмежитися областю на узагальнених кривих повзучості (див. рис. 2.2), в якій відносний час лежить у діапазоні $0,2 < \bar{t} < (0,7 \dots 0,8)$.

Починати обчислення швидкості повзучості слід з того, що до заданих (номінальних) значень напружень σ необхідно додати деякий невеликий приріст $\Delta\sigma$, який дорівнює 5 – 10%. Далі для напружень σ і $\sigma^* = \sigma + \Delta\sigma$ при однаковій заданій температурі T обчислити величини часу до руйнування $t_p(\sigma, T)$ і $t_p^*(\sigma^*, T)$, використовуючи модель Ларсона–Міллера (2.2), (2.3). Після цього з узагальненої кривої повзучості (див. рис. 2.2) на основі формули (2.1) побудувати дві криві повзучості у координатах (t_p, ϵ_c) і отримати два відрізки: $\epsilon_c(t)$ і $\epsilon_c^*(t)$, як показано на рис. 2.3.

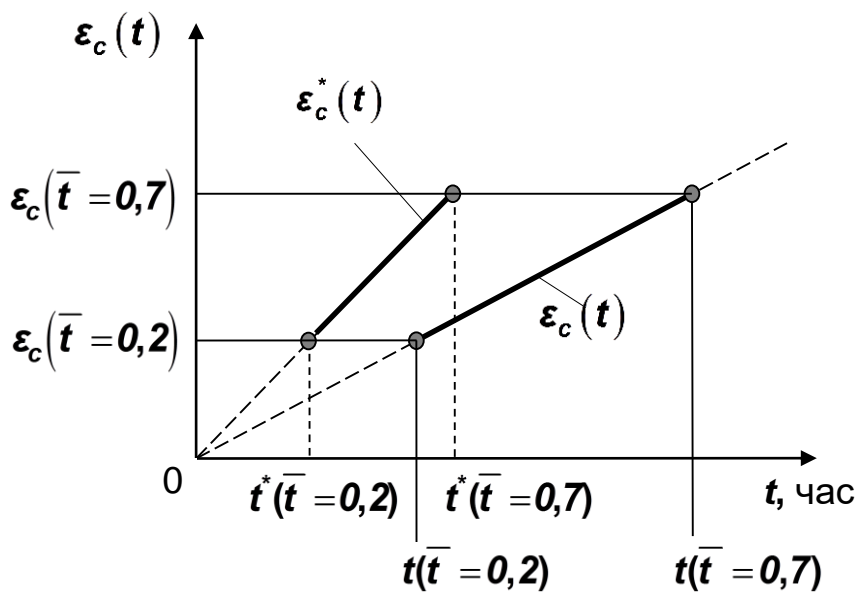


Рис. 2.3. До визначення швидкості повзучості

На основі рівняння (2.4) можна обчислити значення швидкості повзучості при напруженнях σ і σ^* :

$$V_c = \frac{\epsilon_c(\bar{t} = 0,7) - \epsilon_c(\bar{t} = 0,2)}{t(\bar{t} = 0,7) - t(\bar{t} = 0,2)}; \quad (2.8)$$

$$V_c^* = \frac{\epsilon_c(\bar{t} = 0,7) - \epsilon_c(\bar{t} = 0,2)}{t^*(\bar{t} = 0,7) - t^*(\bar{t} = 0,2)},$$

де $t(\bar{t} = 0,7)$, $t^*(\bar{t} = 0,7)$ і $t(\bar{t} = 0,7)$, $t^*(\bar{t} = 0,7)$ – моменти часу t і t^* , які відповідають значенням узагальненого часу $\bar{t} = 0,7$ і $\bar{t} = 0,2$. Вони визначаються за формулою (2.1):

$$\begin{aligned} t(\bar{t} = 0,7) &= t_p(\sigma, T) \cdot 0,7; & t^*(\bar{t} = 0,7) &= t_p^*(\sigma^*, T) \cdot 0,7; \\ t(\bar{t} = 0,2) &= t_p(\sigma, T) \cdot 0,2; & t^*(\bar{t} = 0,2) &= t_p^*(\sigma^*, T) \cdot 0,2. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Використовуючи формулу (2.5), складемо систему з двох нелінійних рівнянь:

$$\begin{cases} V_c = B \cdot \sigma^n; \\ V_c^* = B \cdot \sigma^{*n}. \end{cases} \quad (2.10)$$

Прологарифмуємо обидві частини цих рівнянь – отримаємо:

$$\begin{cases} \ln V_c = \ln B + n \cdot \ln \sigma; \\ \ln V_c^* = \ln B + n \cdot \ln \sigma^*, \end{cases} \quad (2.11)$$

звідки

$$\ln \frac{V_c}{V_c^*} = n \cdot \ln \frac{\sigma}{\sigma^*}, \quad (2.12)$$

або

$$n(T) = \ln \frac{V_c}{V_c^*} / \ln \frac{\sigma}{\sigma^*}, \quad (2.13)$$

$$B(T) = V_c / \sigma^{n(T)}. \quad (2.14)$$

2.2. Задачі до лабораторної роботи

До виконання пропонуються такі задачі:

1. Побудова кривих повзучості матеріалу деталі (див. рис. 2.1) на підставі узагальненої кривої повзучості (див. рис. 2.2) за заданими значеннями σ_0 і T у критичній точці деталі.

2. Розрахункове визначення параметрів $B(T)$ і $n(T)$ моделі сталої повзучості Нортон.

3. Побудова кривої зміни (релаксації) за часом напруження σ від його початкового значення σ_0 .

2.3. Вихідні дані для роботи

2.3.1. Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є соплова лопатка турбіни авіаційного ГТД із конвективно-загороджувальним типом охолодження. Критична точка розташована у районі кореневого перерізу на кромці перфораційного отвору, який є концентратором напружень. Ефективний коефіцієнт концентрації $K_\sigma = 2,5$.

Матеріал лопатки – сплав **ЖС-6У**.

Варіанти значення температур T_i і напружень σ_i у критичній точці перерізу лопатки наведені в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Варианти початкових даних

Варіант Дані	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$T_i, ^\circ\text{C}$	900	900	900	950	950	950	975	975	975
$\sigma_i, \text{МПа}$	240	260	280	220	240	260	220	240	260

2.3.2. Властивості матеріалу лопатки

1. Узагальнені криві повзучості сплаву ЖС-6У для температур $T=950^\circ\text{C}$ і $T=975^\circ\text{C}$ описуються чисельними значеннями $\varepsilon_c(\bar{t})$, наведеними в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Значення параметрів повзучості сплаву ЖС-6У

$T, ^\circ\text{C}$	\bar{t}	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
900	$\varepsilon_c, \%$	0,0	0,236	0,358	0,511	0,731	0,980	1,271	1,634	2,150
950	$\varepsilon_c, \%$	0,0	0,200	0,314	0,429	0,614	0,786	0,986	1,243	1,523
975	$\varepsilon_c, \%$	0,0	0,157	0,257	0,372	0,529	0,672	0,843	1,022	1,286

2. Тривала міцність сплаву ЖС-6У описується моделлю Ларсона–Міллера (див. п. 2.1.1 цієї роботи):

$$\lg \sigma = -1,1041 \cdot 10^{-12} \cdot (P_{л-м})^3 + 7,5013 \cdot 10^{-8} \cdot (P_{л-м})^2 - 1,7859 \cdot 10^{-3} \cdot (P_{л-м}) + 17,573.$$

3. Значення модулю пружності матеріалу для вказаних температур наведені у додатку 4.

2.4. Порядок виконання роботи

Студент після вивчення методичних вказівок і допуску до проведення роботи отримує від викладача свій варіант, в якому наведено приклад навантаження лопатки (див. табл. 2.1).

Лабораторна робота полягає у послідовному виконанні трьох описаних вище завдань і складанні індивідуального звіту кожним студентом.

2.4.1. Задача 1. Побудова кривих повзучості $\varepsilon_c(t)$ і $\varepsilon_c^*(t)$ для заданих значень T_j і σ_i

1. Побудувати графік узагальненої кривої повзучості $\varepsilon_c(\bar{t})$ для заданої температури T і відобразити його на рисунку, аналогічному рис. 2.2, при цьому проценти деформацій слід перевести у долі. Для заданих величин T_j , σ_i і T_j , σ^* , скориставшись моделлю Ларсона–Міллера (2.3), визначити відповідний час до руйнування та $t_p(\sigma_i, T_j)$ і $t_p^*(\sigma^*, T_j)$.

2. Використовуючи формулу (2.1) і значення часів до руйнування $t_p(\sigma_i, T_j)$ і $t_p^*(\sigma^*, T_j)$, перетворити узагальнену криву повзучості $\varepsilon_c(\bar{t})$ у дві криві повзучості – $\varepsilon_c(t)$ і $\varepsilon_c^*(t)$. Їх координати t і t^* занести у строки 3, 4 табл. 2.3 й відобразити на рисунку, аналогічному рис. 2.3.

Кожну з отриманих кривих повзучості $\varepsilon_c(t)$ і $\varepsilon_c^*(t)$ привести до лінійного вигляду, тобто апроксимувати рівнянням прямої лінії в діапазоні значень відносного часу від $\bar{t} = 0,2$ до $\bar{t} = 0,7$.

Оцінити справедливність припущення про лінійну швидкість росту деформації повзучості на зазначеній ділянці.

2.4.2. Задача 2. Визначення параметрів моделі Нортон

Параметри $B(T)$ і $n(T)$ моделі Нортон для заданих значень T і σ визначаються за методикою, викладеною у розд. 2.1.4 цієї роботи, з використанням даних про криві повзучості $\varepsilon_c(t)$ і $\varepsilon_c^*(t)$ (рис. 2.2 і табл. 2.2), наведених у табл. 2.3.

Таблиця 2.3.

Дані про криві повзучості

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	$\bar{t} = t/t_p$	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
2	$\varepsilon_c(\bar{t})$		перенести дані з табл. 2.2 для заданої T							
3	$t = \bar{t} \cdot t_p(T, \sigma)$									
4	$t^* = \bar{t} \cdot t_p^*(T, \sigma^*)$									
5	$\sigma(t)$									

Для цього необхідно:

1. Визначити швидкість усталеної повзучості для цих кривих V_c і V_c^* на ділянках часу, що відповідають значенням узагальненого часу від $\bar{t} = 0,2$ до $\bar{t} = 0,7$, за формулою (2.8).

2. За формулами (2.13) і (2.14) для знайдених значень V_c і V_c^* , а також відомих величин σ_i і σ^* , визначити параметри $B(T)$ і $n(T)$ моделі Нортон.

2.4.3. Задача 3. Обчислення кривої релаксації напружень

За формулою (2.6) визначити дані щодо зміни (релаксації) початкових заданих напружень σ_0 за часом.

Результати розрахунків занести у рядок 5 табл. 2.3 до моменту часу $\bar{t} = 0,7$ і зобразити у графічній формі.

Виконати аналіз отриманих результатів і подати його у формі висновку.

2.4.4. Звіт з роботи

Звіт повинен містити:

1) назву роботи із зазначенням заданого варіанту стану лопатки;

2) послідовні звіти про виконання всіх етапів із зазначенням їх найменування, з наявністю всіх робочих формул і детальних чисельних результатів розрахунків;

3) зокрема, до звіту слід включити рисунки, аналогічні рис. 2.2 і 2.3, а також табл. 2.3.

Форма звіту – рукописна. У ньому можливі посилання на окремо роздруковані й вкладені рисунки і таблиці.

2.5. Запитання для самоконтролю

1. Що називають повзучістю?
2. Назвіть основні стадії повзучості та дайте їм характеристику.
3. Що зображують на узагальненій кривій повзучості?
4. Яку стадію повзучості описує модель Нортонна?
5. Між якими параметрами, що характеризують процес повзучості, встановлює зв'язок модель Нортонна?
6. Яке припущення лежить в основі визначення параметрів моделі Нортонна?
7. У чому полягає релаксація напружень?
8. Наведіть приклади конструкцій, в яких можлива релаксація напружень.

Лабораторна робота № 3

АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ДИСКА ТУРБІНИ В ОБЛАСТІ ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ

Мета роботи: ознайомлення з найбільш поширеними методами розрахунку напружено-деформованого стану (НДС) диска турбіни в областях пружно-пластичних деформацій.

3.1. Основні положення

При конструюванні таких відповідальних і напружених елементів ГТД, як диски компресорів і турбін, робочі лопатки турбін, високотемпературні фрагменти валів та ін., прагнуть забезпечити роботу матеріалу в області пружних деформацій. Однак, у локальних зонах цих елементів через істотні механічні навантаження і температурні градієнти, а також внаслідок дії концентраторів напружень та інших факторів виникають пластичні (залишкові) деформації. Це явище суттєво зменшує міцнісну надійність деталей, особливо через прояви малоциклової втоми матеріалу.

Лабораторна робота присвячена вивченню двох найбільш поширених методів розрахунку пружно-пластичного НДС деталей: методу січних модулів і методу Нейбера. Деталлю, на прикладі якої розглядаються ці методи, є диск турбіни.

3.1.1. Особливості розрахунку НДС деталей в області пружних деформацій

Як пружні, так і пластичні властивості матеріалу, кількісно виражаються *діаграмою деформування σ - ε* (рис. 3.1) або залежністю відносного подовження $\varepsilon = \Delta l / l_0$ від умовного напруження $\sigma = P / F_0$, де F_0 – площа поперечного перерізу зразка до деформації. Для побудови такої діаграми проводять найбільш прості й поширені випробування матеріалу на розтяг. Щоб результати випробувань були порівнянні, застосовують геометрично подібні зразки, зазвичай круглого перерізу. Зразок розтягують на розривній машині з постійною швидкістю руху захватів і визначають залежність подовження розрахункової частини зразка Δl від навантаження P аж до руйнування.

На початку навантаження між напруженням і деформацією існує лінійна залежність. Напруження, при якому відхилення від лінійної залежності між напруженням і деформаціями вперше досягає деякої заданої величини, називають *границею пропорційності $\sigma_{пц}$* (точка 1 на рис. 3.1). Напруження, при якому залишкові деформації вперше досягають деякої заданої величини (зазвичай приблизно 0,002%...0,005%), називають *границею пружності σ_n* (точка 2). Часто вважають, що границя пружності

збігається з границею пропорційності.

При навантаженні за границею пружності залишкові деформації помітно збільшуються. Більшість конструкційних матеріалів, що застосовуються для виготовлення деталей ГТД, не мають ділянки текучості, при якій деформація збільшується без наростання напружень. Для таких матеріалів визначають умовну границю текучості $\sigma_{0,2}$ (точка 3) – напруження, при якому залишкові деформації досягають певної заданої величини (зазвичай 0,2%).

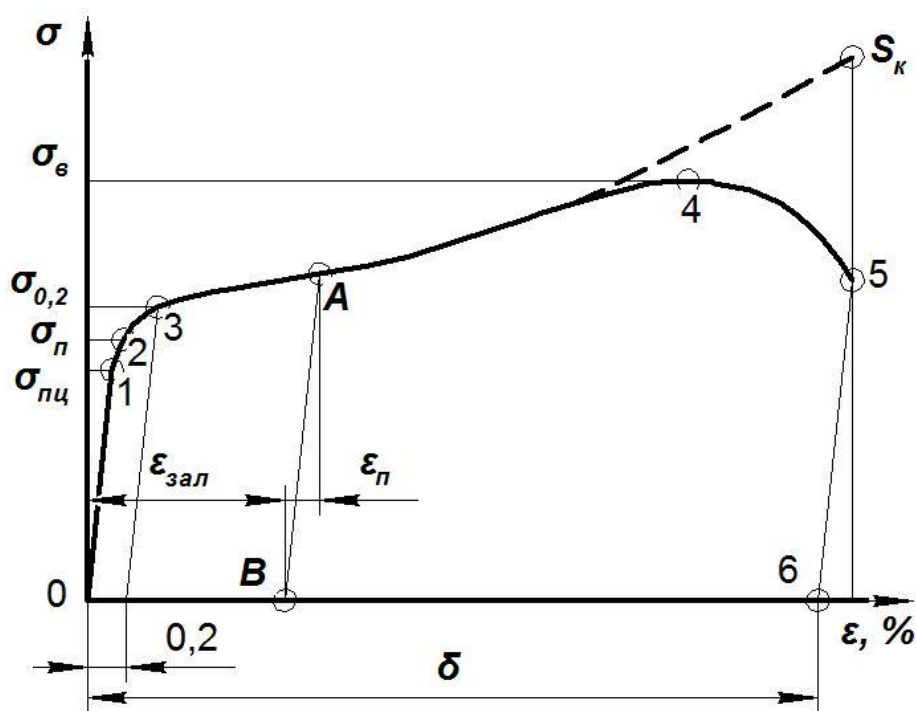


Рис. 3.1. Діаграма деформування

Якщо у будь-який момент (точка А) почати розвантажувати зразок, то залежність між напруженням і деформацією при розвантаженні відіб'ється прямою лінією АВ, практично паралельною лінії навантаження 01. Деформація в точці А складається з пружної частини ϵ_p , яка усувається після зняття навантаження, і залишкової (пластичної) $\epsilon_{зал}$, яка залишається після зняття навантаження.

Максимальне умовне напруження, яке витримує зразок, називають *тимчасовим опором*, або границею міцності σ_v (точка 4). Істинне напруження в момент остаточного руйнування зразка називають справжньою границею міцності – S_k .

При випробуванні на розтяг визначають також характеристики пластичності матеріалу: відносне подовження і відносне звуження (зменшення площі поперечного перерізу) при розриві.

Відносне подовження, що чисельно дорівнює відрізку 0-6, визначають за формулою

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} 100\%, \quad (3.1)$$

де l_k – сумарна довжина ділянок розрахункової частини зразка, що розірвалися;

l_0 – довжина розрахункової частини зразка до деформації.

Відносне звуження поперечного перерізу

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} 100\%, \quad (3.2)$$

де F_0 – площа перерізу розрахункової частини зразка до деформації;

F_k – кінцева площа перерізу по шийці зразка після руйнування.

На рис. 3.1 пунктиром показано змінення істинних напружень після утворення шийки. Істинну границю міцності знаходять з виразу

$$S_k = \sigma_e \frac{F_0}{F_k} = \frac{\sigma_e}{1 - \psi}. \quad (3.3)$$

Якщо замість експериментального зразка матеріалу розглядається конкретна двовимірна (пласка) або тривимірна (об'ємна) деталь, то її НДС у кожній точці з координатами (x, y, z) зображується векторами напружень $\vec{\sigma}(x, y, z)$ і деформацій $\vec{\varepsilon}(x, y, z)$, а температурний стан – температурою $T=T(x, y, z)$. До їхнього складу входять компоненти векторів напружень і деформацій:

$$\vec{\sigma} = \vec{\sigma}(x, y, z) = \left| \sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz} \right|^T,$$

$$\vec{\varepsilon} = \vec{\varepsilon}(x, y, z) = \left| \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz} \right|^T.$$

Методи вирішення задач пружності й термопружності для ізотропного тіла при постійних значеннях модуля пружності E і коефіцієнта Пуассона μ детально розроблені й викладені у підручниках. Закон Гука встановлює лінійну залежність між деформацією ε і напруженнями σ :

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (3.4)$$

і не вимагає проведення складних обчислювальних операцій.

У теорії термопластичності, завданням якої є визначення напружень і

деформацій у нерівномірно нагрітому тілі за наявності у ньому пластичних деформацій, розглядаються більш складні й різноманітні явища, ніж у теорії термопружності. Охопити всі термопластичні властивості конструкційних матеріалів, що виявляються в різних умовах роботи, в рамках єдиної теорії – завдання поки що нездійсненне.

У цьому випадку на допомогу можуть прийти наближені чисельні методи розрахунку, наприклад метод скінченних елементів. Однак використання таких методів при врахуванні фізичної нелінійності задачі, що розглядається, супроводжується істотним збільшенням часу обчислювальних процесів.

Альтернативним є підхід, при якому здійснюється перехід від умовного НДС деталі до реальної кривої деформування. В цьому випадку умовний НДС визначають для абсолютно пружного матеріалу з використанням лінійного закону Гука (3.4), а перехід до кривої σ - ϵ виконують згідно з деякими окремими варіантами теорії термопластичності, що дозволяє вирішити задачу найбільш простими способами і, в той же час, досить повно і правильно описати найважливіші сторони досліджуваного явища. Окремими теоріями термопластичності є:

- деформаційна теорія пластичності;
- теорія пластичної течії або деформаційна теорія в збільшеннях;
- теорія пластичної течії при анізотропному зміцненні;
- теорія циклічного термопластичного деформування.

3.1.2. Розрахунок НДС деталей в області пружно-пластичних деформацій методом змінних параметрів пружності (січних модулів)

Найбільш простою і зручною для програмної реалізації є **деформаційна теорія пластичності**. Ця теорія базується на ряді припущень, отриманих при аналізі експериментальних даних. Вона зводиться до введення так званого змінного параметра пружності або січного модуля E_c . Для його визначення необхідно використовувати вихідну криву деформування матеріалу σ - ϵ , отриману при ізотермічному розтязі (рис. 3.2), а також значення інтенсивності напружень σ_i . Величина σ_i у точці (x, y, z) може бути визначена за вектором напружень $\bar{\sigma}(x, y, z)$ у цій точці таким способом:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}. \quad (3.5)$$

Однак виникає інша проблема, яка перешкоджає отриманню рішення в пружно-пластичній області: необхідно знати величину січного модуля $E_c(x, y, z)$, а для цього – величину $\sigma_i(x, y, z)$, яка, відповідно до формули (3.5), залежить від шуканого вектора $\bar{\sigma}(x, y, z)$. Таким чином, виходить

замкнуте нерозв'язне коло.

Для вирішення цієї проблеми застосовується метод послідовних наближень, алгоритм якого полягає у виконанні таких обчислень (рис. 3.3):

1. Для заданої температури T у вибраній точці деталі побудувати відповідну криву деформування σ - ϵ .

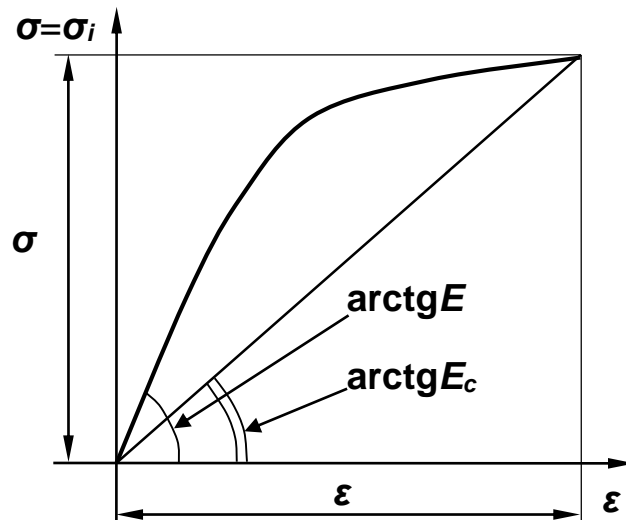


Рис. 3.2. Вихідна крива деформування σ - ϵ

2. Задати як перше наближення значення січних модулів $E_c^{(1)} = E$ і $\mu^* = \mu$, які відповідають пружному деформуванню (зазвичай, для конструкційних матеріалів $\mu = 0,3$).

2.1. Будь-яким із доступних методів (скінченних різниць або скінченних елементів) для досліджуваної деталі отримати пружне рішення у вигляді

$$\bar{\sigma}^{(1)}(x, y, z) = \left| \sigma_x^{(1)}, \sigma_y^{(1)}, \sigma_z^{(1)}, \tau_{xy}^{(1)}, \tau_{yz}^{(1)}, \tau_{zx}^{(1)} \right|^T.$$

2.2. Визначити за формулою (3.5) перше наближення інтенсивності напружень $\sigma_i^{(1)}$.

2.3. Із трикутника $OA_1\epsilon^{(1)}$ знайти величину деформації $\epsilon^{(1)}$ за формулою

$$\epsilon^{(1)} = \frac{\sigma_i^{(1)}}{E_c^{(1)}}. \quad (3.6)$$

2.4. Визначити $\sigma_i^{*(1)}$ на кривій деформування (точка B_1), підставивши $\epsilon^{(1)}$ у математичну модель кривої деформування (результат її апроксимації). Графічно це відповідає точці B_1 перетину вертикального відрізка, опущеного з точки A_1 на вісь ϵ , із кривою деформування σ - ϵ .

2.5. Знайти друге наближення $E_c^{(2)}$ січного модуля з трикутника $OB_1\epsilon^{(1)}$ за формулою

$$E_c^{(2)} = \frac{\sigma_i^{*(1)}}{\varepsilon^{(1)}}. \quad (3.7)$$

3. У другому наближенні задатися знайденим значенням $E_c^{(2)}$ і коефіцієнтом Пуассона $\mu^*=0,5$, який відповідає пружно-пластичному деформуванню нестисливого матеріалу.

3.1. Як і у п. 2.1, отримати друге пружне рішення:

$$\bar{\sigma}^{(2)}(x, y, z) = \left| \sigma_x^{(2)}, \sigma_y^{(2)}, \sigma_z^{(2)}, \tau_{xy}^{(2)}, \tau_{yz}^{(2)}, \tau_{zx}^{(2)} \right|^T.$$

Далі розрахувати $E_c^{(3)}$ аналогічно п.п. 2.2. – 2.5.

4. У третьому наближенні задатися значеннями $E_c^{(3)}$ і $\mu^*=0,5$, отримати величини $E_c^{(4)}$ і так далі до визначення точки $A_n \approx B_n$ із координатами $\sigma_i^{*(n)}$, $\varepsilon^{(n)}$ на кривій деформування.

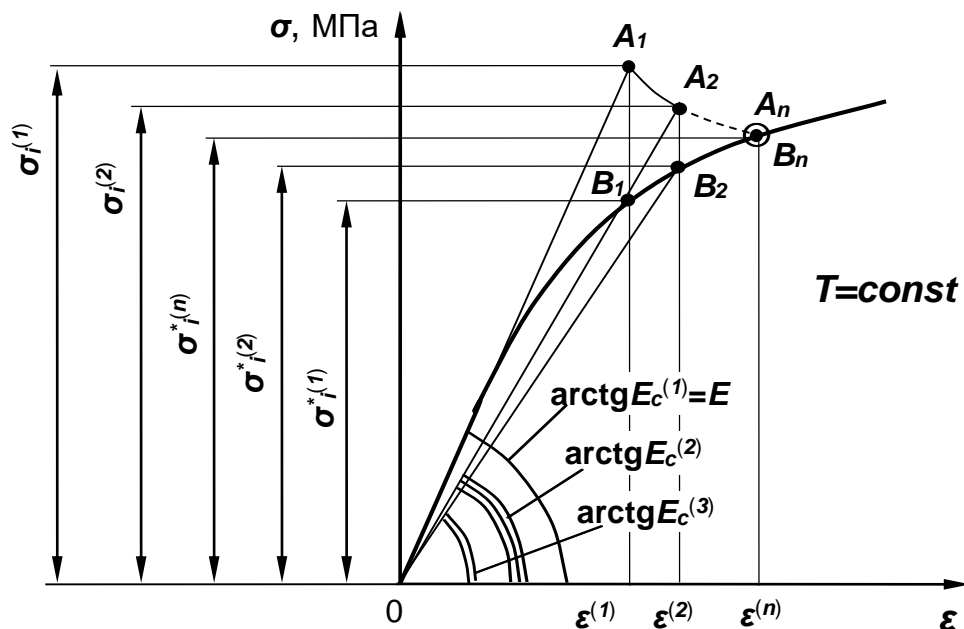


Рис. 3.3. Графічне зображення методу січних модулів:
точка A_n (або B_n) – рішення для пружно-пластичного НДС ($\sigma_i^{(n)}$, $\varepsilon^{(n)}$)

При заданих навантаженнях і температурах обчислення слід продовжувати до тих пір, поки в усіх розрахункових точках різниця між напруженнями $\sigma_i^{*(n)}$ і $\sigma_i^{(n)}$ не стане менше заданої величини.

3.1.3. Наближений розрахунок пружно-пластичного НДС деталей методом Нейбера

Для визначення пружно-пластичних деформацій, що виникають в окремих локальних областях деталі, широко застосовується принцип Нейбера, який був сформульований таким чином: «Середнє геометричне з

коефіцієнта концентрації напружень і коефіцієнта концентрації деформацій (для будь-якого закону напруження-деформація) дорівнює коефіцієнту концентрації, що відповідає закону Гука».

Цей принцип зручно виразити співвідношенням

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_{\text{лін}}}{E} = \sqrt{\varepsilon_p \varepsilon}, \quad (3.8)$$

де $\sigma_{\text{лін}}$ – умовні пружні напруження;

ε_y , ε_p , ε – умовна, пружна і сумарна деформації відповідно.

Графічну інтерпретацію принципу Нейбера подано на рис. 3.4. Принцип Нейбера дозволяє із задовільною точністю визначити на основі лінійного розрахунку сумарну і пружну деформації в надрізі або в області іншого концентратора напружень, і на основі цього – пластичну деформацію.

Принцип Нейбера був узагальнений для інших випадків неоднорідного напруженого стану. Узагальнений принцип Нейбера можна записати у вигляді

$$\frac{\sigma_{\text{лін}}}{E} = \varepsilon_p^m \varepsilon^{1-m}, \quad (3.9)$$

де m – показник, який приймає значення від 0 до 1 при різних способах навантаження. Значення показника m можна одержати методом математичного моделювання у пружно-пластичній постановці з подальшим порівнянням з результатами лінійного розрахунку. Встановлено такі значення цього параметру:

- $m = 1$ для напружень силового походження, рівномірно розподілених у перерізі;
- $m \leq 0,66$ для напружень силового походження, нерівномірно розподілених у перерізі (наприклад, згинальних напружень);
- $m \leq 0,5$ для надрізів, що знаходяться під впливом силового або деформаційного навантаження (первісна формула Нейбера);
- $m \leq 0,1$ для напружень деформаційного походження, в тому числі температурних напружень;
- $m \leq 0$ для напружень деформаційного походження з їх рівномірним розподілом у перерізі.

Для малої пластичної деформації приймаються нижчі значення показника m . Оскільки при малому напруженні пружна деформація наближається до лінійної, похибка розрахунків, зумовлена зменшенням показника m , є несуттєвою.

Принцип Нейбера можна використовувати при вирішенні ряду прикладних задач: статичному навантаженні; циклічному навантаженні;

аналізі пристосовності; розрахунку деформації повзучості. Важливим фактором, який обмежує застосування принципу Нейбера (включаючи і узагальнений), є те, що цей принцип є дійсним лише в місцях локальних екстремумів напружень, наприклад, у вершині надрізів, у найбільш напруженій точці балки, в місці піку температурних напружень.

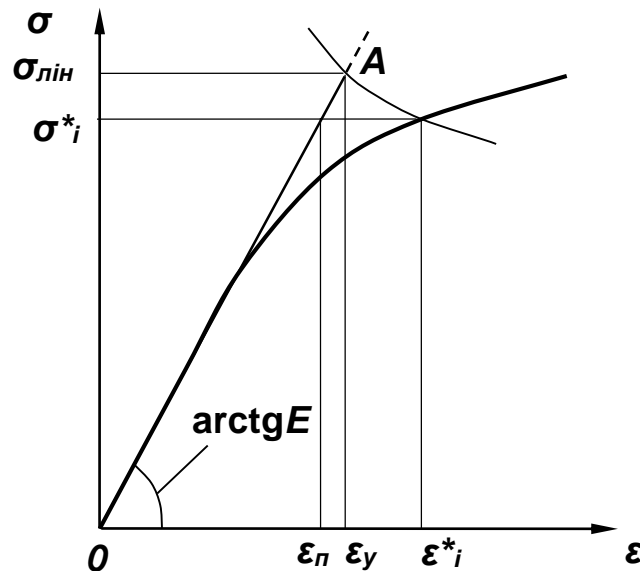


Рис. 3.4. Графічна інтерпретація принципу Нейбера

При практичній реалізації принципу Нейбера використовують вихідну криву деформування σ - ϵ і значення інтенсивності напружень σ_i , розраховане за формулою (3.5), в яку підставляють величини компонент вектора напружень, що обчислюють за умов лінійного деформування. Від умовно пружного стану до реальних пружно-пластичних деформацій і напружень переходять таким чином (рис. 3.4):

1. Виконують пружний розрахунок вектора напружень $\bar{\sigma}(x, y, z)$.
2. Находять значення σ_i за формулою (3.5).
3. Якщо конструкція має концентрацію напружень, що не враховуються розрахунковою моделлю (наприклад, отвори в диску не можуть бути повною мірою враховані при використанні плоскої вісесиметричної розрахункової моделі), то находять значення умовного пружного еквівалентного напруження $\sigma_{лін}$ з урахуванням концентрації напружень:

$$\sigma_{лін} = \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_i, \quad (3.10)$$

де α_{σ} – коефіцієнт концентрації напружень.

4. Обчислюють відповідне $\sigma_{лін}$ значення умовної пружної деформації ϵ_y :

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_{\text{лін}}}{E}. \quad (3.11)$$

5. Через точку $A(\varepsilon_y, \sigma_{\text{лін}})$ проводять гіперболу Нейбера, яка відповідає формулі

$$\sigma = \frac{\sigma_{\text{лін}} \cdot \varepsilon_y}{\varepsilon}, \quad (3.12)$$

де σ і ε – поточні значення точок гіперболи Нейбера.

6. Точка з координатами $(\varepsilon^*, \sigma^*)$, яка відповідає перетину гіперболи Нейбера з кривою деформування σ - ε , є шуканим рішенням $\varepsilon^* = \varepsilon_i^*$ та $\sigma^* = \sigma_i^*$, що визначає НДС деталі в області пружно-пластичних деформацій.

Цей простий метод був запропонований для аналізу НДС локальних областей деталей з концентраторами напружень; проте зараз він широко використовується у випадках, коли область з пружно-пластичними деформаціями виникає природним чином, без участі концентраторів напружень.

3.2. Завдання до лабораторної роботи

Набуття практичних навичок розрахування НДС диска турбіни в областях пружно-пластичних деформацій двома методами:

- 1) методом змінних параметрів пружності (січних модулів);
- 2) наближеним методом, що використовує гіперболу Нейбера.

3.3. Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є диск турбіни високого тиску двоконтурного ТРД з великим ступенем двоконтурності (прототип – двигун Д-36).

Матеріал диска – жароміцний сплав на нікелевій основі.

Частота обертання турбіни високого тиску – $n = 16000$ об/хв.

Внутрішній радіус маточини – $R_o = 0,055$ м.

Зовнішній радіус ободу – $R_k = 0,23$ м.

Температура маточини – $T_o = 600$ °С.

Температура ободу – $T_k = 700$ °С.

Контурне навантаження від лопатевого вінця – $\sigma_{\text{пл}} = 60$ МПа.

Геометрія, а також розподіл фізичних властивостей матеріалу в перерізі диску наведені у файлі вихідних даних **Prop.dat** програми **Calk_pro.exe**.

Пружний розрахунок нормальних напружень σ_r і σ_θ , що виникають у перерізах диску, виконують в пласкій вісесиметричній постановці за

допомогою програми **Disk112.exe** кафедри 203.

Для цього випадку формула (3.5) для обчислення еквівалентних навантажень має вигляд

$$\sigma_e = \sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_r \sigma_\theta} . \quad (3.13)$$

3.4. Порядок виконання роботи

Бригада з двох студентів виконує три основних завдання у зазначеній послідовності.

3.4.1. Задача 1. Розрахунок вихідного умовного пружного НДС диска

Необхідно за допомогою програми **Calk_pro.exe** обчислити основні вихідні дані для пружного розрахунку і занести їх у табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Вихідні дані для розрахунку пружних напружень у диску

Номер перерізу	R , м	b , м	T , °C	E , МПа	$\alpha \cdot 10^{-5}$, °C ⁻¹	σ_{mp} , МПа
	1	2	3	4	5	6
1	0,055	0,090				
2	0,056	0,092				
3	0,063	0,092				
4	0,072	0,091				
5	0,088	0,077				
6	0,100	0,046				
7	0,132	0,034				
8	0,165	0,018				
9	0,199	0,026				
10	0,230	0,026				

Далі за допомогою програми **Disk112.exe** обчислити величини σ_{rn} , $\sigma_{\theta n}$ і σ_{en} . Еквівалентні напруження для всіх розрахункових перерізів занести до рядка 1 табл. 3.2. Рядок 2 цієї таблиці заповнити значеннями границь текучості σ_{Tn} , що відповідають температурі матеріалу в розрахункових перерізах.

Потім слід порівняти отримане значення σ_{en} у кожному розрахунковому перерізі із границею текучості σ_{Tn} при температурах T_n у перерізах ($n=1,2,\dots,10$) і визначити, в яких перерізах мають місце пластичні деформації (тобто $\sigma_{en} > \sigma_{Tn}$).

Розподіл напружень по радіусу диска

Вид розрахунку	Параметр	№ рядка	Номер перерізу									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Пружний розрахунок	σ_{en}	1										
	σ_{Tn}	2										
Остаточні результати за методом січних модулів	$\sigma_e^{(k)}n$	3										
	$\varepsilon_e^{(k)}n$	4										
Результати за методом гіперболи Нейбера	σ_{en}^*	5										
	ε_{en}^*	6										

3.4.2. Задача 2. Розрахунок пружно-пластичного НДС диска методом змінних параметрів пружності

Отримати рішення методом послідовних наближень для всіх перерізів, в яких відбувається пластична деформація ($\sigma_{en} > \sigma_{Tn}$).

Порядок обчислень наведено у розд. 3.1.2 цієї роботи. Наближення для усіх перерізів диска необхідно виконувати синхронізовано (одночасно), тобто при повторюванні лінійного розрахунку (за допомогою програми **Disk112.exe**) слід перевизначити січні модулі E_{cn} і коефіцієнти Пуассона μ^* відразу для усіх перерізів з пластичною деформацією.

Обчислення вести у форматі робочої табл. 3.3, послідовно записуючи до неї одержувані результати.

Значення $\sigma_e^{(k)}n$ і $\varepsilon_e^{(k)}n$, що належать кривій деформування (σ_e - ε) при $T = T_n$, знаходити за допомогою програми **Sigeps.exe**, задавши значення температури T_n n -го перерізу.

Рішення про припинення ітераційного процесу наближень для n -го перерізу слід прийняти, враховуючи величину $\delta^{(k)}n$:

$$\delta^{(k)}n = \frac{\sigma_e^{(k)}n - \sigma_e^{*(k)}n}{\sigma_e^{*(k)}n} \cdot 100\% \leq 0,5\% . \quad (3.14)$$

Значення еквівалентних напружень і деформацій, отримані для останнього наближення для усіх 10 перерізів, занести у рядки 3 і 4 табл. 3.2. Порівняти їх зі значеннями напружень, що відповідають початковому умовному (пружному) напруженому стану.

Таблиця 3.3

Результати розрахунків методом січних модулів

Номера « <i>n</i> » особливих перерізів	Номер « <i>k</i> » наближень	$E_c^{(k)}$	$\mu^{(k)}$	$\sigma_e^{(k)}$	$\varepsilon_e^{(k)}$	$\sigma_e^{*(k)}$	$\delta = \frac{\sigma_e^{(k)} - \sigma_e^{*(k)}}{\sigma_e^{*(k)}}$
1	2	3	4	5	6	7	8
	<i>k</i> =1		0,3				
	<i>k</i> =2		0,5				
	...						
	<i>k</i> =1		0,3				
	<i>k</i> =2		0,5				
	...						
...	...						

3.4.3. Задача 3. Розрахунок пружно-пластичного НДС диска методом гіперболи Нейбера

Це завдання необхідно виконати для всіх визначених раніше перерізів диска, для яких $\sigma_{en} > \sigma_{мп n}$.

Вихідними даними є результати умовного пружного розрахунку диска $\sigma_e^{(1)}$ і $\varepsilon_e^{(1)}$, які наведені у табл. 3.3 як перше наближення (*k*=1). Тоді гіперболу Нейбера проводять з точки **A** з координатами ($\varepsilon_e^{(k)}$, $\sigma_e^{(k)}$). Для цього слід задатися значеннями деформації в діапазоні від $\varepsilon_e^{(1)}$ до ($\varepsilon_e^{(1)} + \Delta\varepsilon$) і визначити відповідні їм напруження згідно з формулою

$$\sigma = \frac{\sigma_e^{(1)} \cdot \varepsilon_e^{(1)}}{\varepsilon}.$$

Гіперболу слід проводити до перетину її з відповідними кривими деформування σ - ε . Дані для побудови кривих деформування для вибраного матеріалу і відповідних температур необхідно отримати, скориставшись програмою **Sigeps.exe**.

Результати розрахунків координат точок (ε_e^* , σ_e^*) перетину гіперболи з кривою деформування занести в рядки 5 і 6 табл. 3.2.

Визначення точок перетину – рішень пружно-пластичної задачі – має бути подане в графічній формі.

Похибки цього методу визначають порівнянням отриманих значень ε_e^* з результатами $\varepsilon_e^{*(k)}$ розрахунків за більш точним методом змінних параметрів пружності:

$$\delta = \frac{\varepsilon_e^* - \varepsilon_e^{*(k)}}{\varepsilon_e^{*(k)}}. \quad (3.15)$$

3.4.4. Звіт з роботи

У звіті з лабораторної роботи мають бути наведені:

- 1) назва, мета і основні формули роботи;
- 2) вихідні дані щодо диска турбіни, включаючи табл. 3.1;
- 3) результати рішення задачі 1 у формі табл. 3.2 з ідентифікацією особливих перерізів диска;
- 4) результати рішення задачі 2, зокрема:
 - а) табл. 3.3;
 - б) рисунок типу рис. 3.3 для заданих вихідних даних (для одного з особливих перерізів);
 - в) висновок з аналізу вихідних і кінцевих розподілів σ_e по перерізах диска;
- 5) результати рішення задачі 3:
 - а) рисунок типу рис. 3.4 для вихідних даних (для одного з особливих перерізів, бажано, того самого, що у п. 4, б).
 - б) оцінки точності методу гіперболи Нейбера за формулою (3.15).

3.5. Запитання для самоконтролю

1. Що зображено на діаграмі деформування? Як її будують?
2. Що називають границею пружності?
3. Дайте визначення, що таке $\sigma_{0,2}$.
4. Який зв'язок між тимчасовою та істинною границями міцності?
5. У чому полягає складність визначення НДС при пружно-пластичному деформуванні матеріалу?
6. Поясніть алгоритм виконання розрахунку НДС методом змінних параметрів пружності.
7. У чому полягає принцип Нейбера?
8. Для яких випадків можна застосувати принцип Нейбера?
9. Назвіть діапазон зміни показника m узагальненої гіперболи Нейбера.

Лабораторна робота № 4 АНАЛІЗ РЕСУРСУ РОБОЧОЇ ЛОПАТКИ ТУРБИНИ

Мета роботи: набуття навичок виконання оцінок пошкоджень P_{TM} і P_{MCB} робочої лопатки турбіни за один узагальнений польотний цикл за критеріями тривалої міцності та малоциклової втоми відповідно, в тому числі із застосуванням кривих безвідмовності.

4.1. Основні теоретичні положення

Більшість деталей машин працює певними циклами (пуск, робочі режими, зупинки), внаслідок чого напружено-деформований стан деталей змінюється циклічно. За час експлуатації загальне число циклів може змінюватися від 10 до 100 для стаціонарних установок, до $10^4 \dots 10^5$ і більше для транспортних машин, вантажопідйомних пристроїв та інших механізмів.

4.1.1. Циклічне деформування

Крива деформування при розтязі-стисненні показана на рис. 4.1. Границя текучості при розтягуванні позначена σ_T^+ , при стисненні σ_T^- . Для більшості конструктивних металевих сплавів (вуглецевих і легированих сталей, титанових і алюмінієвих сплавів та ін.) границі текучості при розтягуванні й стисненні приблизно однакові:

$$\sigma_T^+ \approx \sigma_T^- . \quad (4.1)$$

Процес деформування «розтягу – стиснення» при циклічній зміні зовнішніх напружень від σ до $-\sigma$, за умови, що $\sigma > \sigma_T$, зображений на рис. 4.1, а. При першому навантаженні точка, яка зображує стан матеріалу в площині (σ, ϵ) , рухається вздовж кривої **OAB**. Далі напруження зменшуються, і точка продовжує рух по ділянці **BB₁A₁**. Після досягнення мінімальних напружень у точці A₁ навантаження повторюється. На рис. 4.1, б показаний цикл деформацій, що супроводжує цикл зміни зовнішнього навантаження.

Розмах пружно-пластичних деформацій

$$\Delta \epsilon = \epsilon_{\max} - \epsilon_{\min} , \quad (4.2)$$

де ϵ_{\max} , ϵ_{\min} – найбільша і найменша пластичні деформації в процесі циклічного навантаження елемента конструкції.

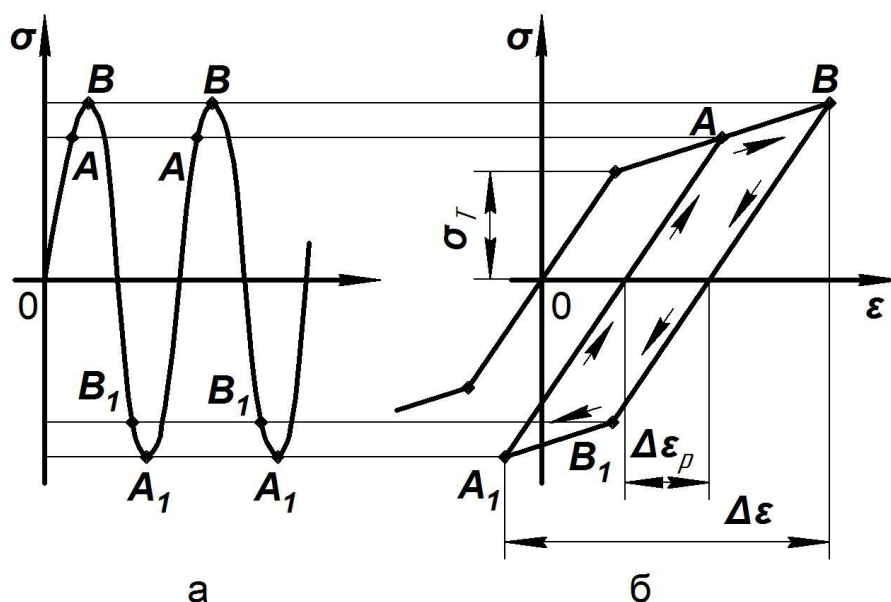


Рис. 4.1. Циклічне деформування:
а – зміна діючих напружень за часом; б – цикл деформацій

4.1.2. Ізотропне і анізотропне зміцнення при пластичних деформаціях

Пластична деформація призводить до підвищення «миттєвої» границі текучості. Якщо в точці **B** (рис. 4.2) знизити навантаження до нуля, а потім знову виконати навантаження, то перехід до пластичної деформації почнеться при $\sigma \geq \sigma(\epsilon_p)$, і процес навантаження пройде вздовж початкової кривої деформування.

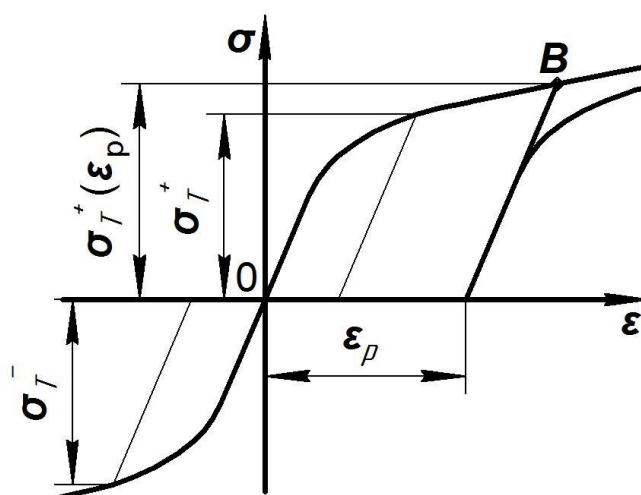


Рис. 4.2. Крива деформування при розтягуванні й стисненні:
 σ_T^+ – границя текучості при розтягуванні;
 σ_T^- – границя текучості при стисненні

Границя текучості при повторному навантаженні називається **миттєвою границею текучості**. У першому наближенні можна вважати, що

значення миттєвої границі текучості залежить від значення пластичної деформації у даний момент навантаження.

У найбільш простій моделі поведінки матеріалу (у моделі *ізотропного зміцнення*) передбачається, що криві деформування при повторному навантаженні (криві O_1BC і $O_1B_1A_1$ на рис. 4.3) залежать тільки від величини досягнутої пластичної деформації і не залежать від її знака.

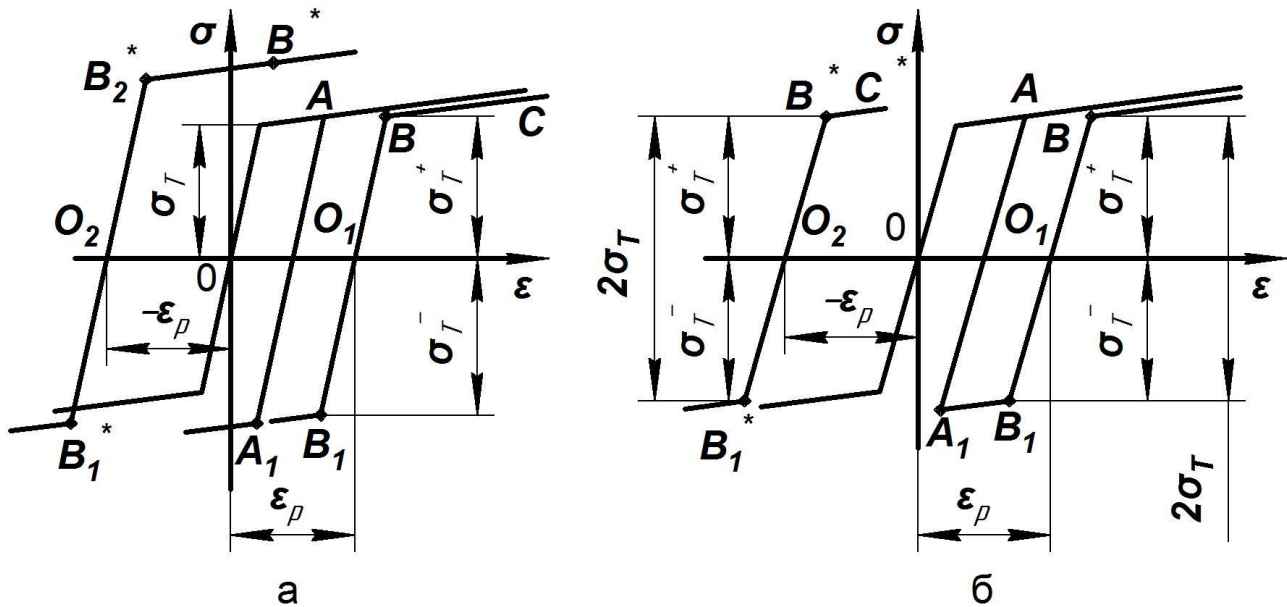


Рис. 4.3. Ізотропне (а) і анізотропне (б) зміцнення при пластичних деформаціях

Криві деформування після попередньої пластичної деформації ϵ_p (крива $A_1B_1O_1C$) або після $-\epsilon_p$ являють собою однакові криві, але «зсунуті» вздовж осі абсцис.

У моделі ізотропного зміцнення миттєві границі текучості при розтягненні й стисненні однакові не тільки при початковому, але і при повторних деформуваннях (рис. 4.3, а). Експериментально встановлено, що у багатьох конструкційних матеріалів спостерігається зниження миттєвої границі текучості при зміні знака деформування. Такий ефект, що називається **ефектом Баушингера**, пов'язаний з анізотропним зміцненням матеріалу (тобто зміцненням, що залежить від напрямку навантаження).

Після розвантаження в точці B миттєва границя текучості знижується:

$$\sigma_T^- < \sigma_T^+.$$

При зміні знака пластичної деформації миттєва границя текучості при стисненні буде менше, ніж при розтягуванні.

Проста модель анізотропного зміцнення показана на рис. 4.3, б. Передбачається, що у будь-який момент навантаження виконується умова

$$\sigma_T^+ + \sigma_T^- = 2\sigma_T, \quad (4.3)$$

яка носить назву **принцип Мазінга**.

Криві деформування у різні моменти деформування мають ділянки зміцнення, що лежать на лініях зміцнення при первісній деформації.

4.1.3. Явище малоциклової втоми

Малоцикловою втомою називається руйнування при повторних пружно-пластичних деформаціях. Зазвичай, руйнування малоцикловою втомою відбуваються при числі циклів повторення навантаження $N < 10^5$.

Малоциклова втома має багато спільного зі звичайною втомою, але відрізняється від неї наявністю макропластичних деформацій у зоні зламу. Як і при звичайній (багатоциклової) втомі, руйнування починається в місцях концентрації напружень внаслідок розвитку тріщини. Однак, механізм малоциклового руйнування значно відрізняється від механізму втомного руйнування, тому що пластичні деформації виникають у значно більших об'ємах матеріалу.

Зокрема, відмінність полягає у тому, що опір матеріалів малоциклової втоми істотно залежить від їхньої пластичності, тоді як подібна залежність для звичайної (багатоциклової) втоми проявляється слабо.

У зв'язку з повторенням циклів «запуск – робота – зупинення» при експлуатації виробів машинобудування, малоциклова втома часто і визначає їхній ресурс (довговічність). Характерний приклад – диски авіаційних двигунів, що мають $(5 \dots 10) \cdot 10^3$ виходів на максимальні частоти обертання, при яких напруження наближаються до границі текучості матеріалу.

4.1.4. Характеристики навантаженості при малоциклової втомі

Під час аналізу звичайної втоми головною характеристикою навантаженості є змінні напруження циклу (амплітуда змінного напруження σ_a). Змінні деформації, що виникають під час дії змінних напружень, у разі пружного деформування однозначно визначаються співвідношенням

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_a}{E}, \quad (4.4)$$

де E – модуль пружності, ε_a – амплітуда змінних деформацій.

При малоциклової втомі, що протікає у пружно-пластичній області при процесах навантаження і розвантаження, залежність

$$\varepsilon_a = f(\sigma_a) \quad (4.5)$$

має значно складніший характер, а для матеріалів з відсутнім або дуже малим зміцненням практично не є однозначною. На рис. 4.4 показано два цикли деформацій зі змінним напруженням

$$\sigma_{a1} = \sigma_{a2} = \sigma_T ,$$

де σ_T – границя текучості матеріалу.

При відсутності зміцнення, що властиво маловуглецевим сталям при $\varepsilon_p < 2\%$, цикл змінних напружень не визначає реальних умов деформування. Умові (4.5) може відповідати цикл **ABB₁A₁** або **ACC₁A₁**, залежно від деформацій на границях пружно-пластичної області.

Для матеріалу з пластичним зміцненням (див. рис. 4.3, а) невеликі зміни амплітуди напруження (від σ_{a1} до σ_{a2}) призводять до значних змін амплітуди деформацій. Зазначені співвідношення обґрунтовують доцільність використання при аналізі малоциклової втоми змінних деформацій як характеристик навантаженості. Для матеріалів, що пластично зміцнюються, можливий опис малоциклової втоми за допомогою змінних напружень.

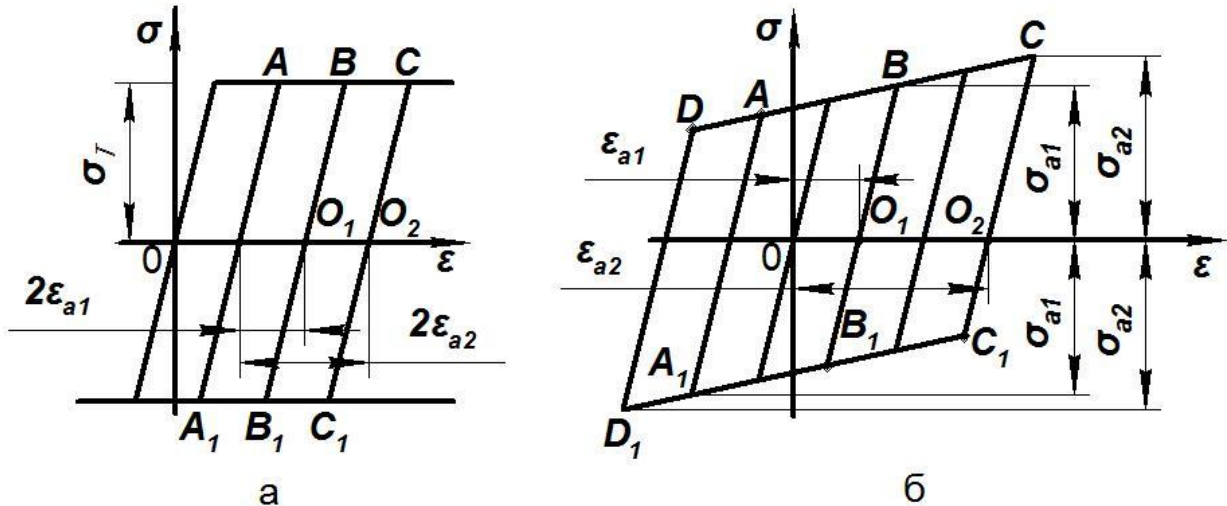


Рис. 4.4. Цикли напружень і деформацій на діаграмах деформування:
а – матеріал, що не зміцнюється; б – матеріал із незначним зміцненням

При експериментальному визначенні малоциклової міцності використовуються режими «жорсткого» і «м'якого» навантаження. При жорсткому навантаженні задається амплітуда змінних деформацій ε_a або розмах деформацій:

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min} = 2\varepsilon_a . \quad (4.6)$$

Жорстке навантаження зустрічається в елементах конструкцій при «примусовій» деформації (наприклад, циклічний нагрів стрижня при жорсткому закладенні його кінців). Жорстке навантаження характерне для роботи матеріалу в зонах концентрації напружень, де приблизно можливо вважати, що деформація задається зміщенням меж пружної області.

При випробуваннях в умовах жорсткого навантаження вимірюється деформація зразка. При м'якому навантаженні відбувається циклічна зміна зовнішнього зусилля, що діє на зразок.

4.1.5. Умови навантаження при малоцикловій втомі

При випробуваннях з постійною амплітудою змінних деформацій (жорстке навантаження) встановлена така залежність:

$$\varepsilon_{ap}^{m_2} N_p = C_2, \quad (4.7)$$

де ε_{ap} – амплітуда пластичних деформацій;

N_p – середнє число циклів до малоциклового руйнування;

C_2, m_2 — параметри матеріалу.

Умова (4.7) є моделлю малоциклового руйнування, що запропонував Коффін. Він визначив величину C , використавши рівняння (4.7) для випадку одноразового (статичного) руйнування, приймаючи умовно $N = 1/4$ (у першій чверті циклу відбувається навантаження до максимального значення) і вважаючи $m_2 = 2$, $\varepsilon_{ap} = \varepsilon_k/2$. Тоді

$$C = \frac{1}{16} \varepsilon_k^2, \quad (4.8)$$

де $\varepsilon_k = \ln \frac{1}{1-\psi}$ – істинна деформація в момент руйнування;

ψ – коефіцієнт відносного поперечного звуження матеріалу.

У цьому випадку умова малоциклового руйнування має вигляд

$$\varepsilon_{ap}^2 N_p = \frac{1}{16} \left(\ln \frac{1}{1-\psi} \right)^2. \quad (4.9)$$

З останнього співвідношення випливає, що малоциклова міцність залежить від пластичності матеріалу. Чим більше відносне звуження у шийці при розриві зразка, тим вище міцність при повторних пластичних деформаціях.

Співвідношення (4.9) не включає пружну деформацію циклу і додатне

для випадків, коли пластична частина змінної деформації істотно перевищує пружну. За таких умов число циклів N_p до руйнування зазвичай менше 10^3 . У загальному випадку умова малоциклової міцності має враховувати і звичайну втому в області великих змінних напружень.

У практичних розрахунках часто використовується експериментально встановлена формула Менсона, що зв'язує амплітуду повних деформацій циклу (пластичних і пружних) з числом циклів до руйнування N_p :

$$\varepsilon_a = \frac{1}{2} \left(\ln \frac{1}{1-\psi} \right)^{0.6} N_p^{-0.6} + \frac{1.75 \sigma_e}{E} N_p^{-0.12}, \quad (4.10)$$

де σ_e , E – границя тимчасової міцності й модуль пружності матеріалу відповідно.

Перший доданок у правій частині рівняння (4.10) виражає опір матеріалу повторним пластичним деформаціям, другий – змінним пружним деформаціям. При малому числі циклів до руйнування основне значення має перший доданок, при $N_p > 10^3$ – другий.

Недоліком формули Менсона, що набула поширення, є наближений облік опору повторним пружним деформаціям.

Використовуючи закономірності втоми при високих пружних напруженнях, можемо записати:

$$\sigma_a^{m_2} N = \sigma_{-1}^{m_2} N_0, \quad (4.11)$$

де σ_{-1} – границя витривалості для базового числа циклів N_0 (точки перелому);

m_2 – показник кривої втоми ($m_2 = 6 \dots 20$).

Тоді можна знайти амплітуду змінних пружних деформацій:

$$\varepsilon_{a \text{ п}} = \frac{\sigma_a}{E} = \frac{\sigma_{-1}}{E} \left(\frac{N_0}{N_p} \right)^{1/m_2}. \quad (4.12)$$

Підстановка цього виразу для амплітуди пружної деформації замість другого доданку у (4.10) дає можливість записати умову руйнування при малоциклової втоми у вигляді модифікованого рівняння Менсона:

$$\varepsilon_a = \frac{1}{2} \left(\ln \frac{1}{1-\psi} \right)^{0.6} N_p^{-0.6} + \frac{\sigma_{-1}}{E} \left(\frac{N_0}{N_p} \right)^{1/m_2}. \quad (4.13)$$

4.1.6. Вплив постійного напруження циклу

Постійне напруження впливає на малоциклову втому, причому головним чином на опір повторним пружним деформаціям. Ураховуючи, що значення границі витривалості при несиметричному циклі зміни напружень із середнім значенням σ_m пов'язано з границею витривалості при симетричному циклі навантаження σ_{-1} формулою

$$(\sigma_{-1})_m = \sigma_{-1} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_s} \right), \quad (4.14)$$

отримаємо з рівняння (4.13) таку умову руйнування при наявності постійних напружень:

$$\varepsilon_a = \frac{1}{2} \left(\ln \frac{1}{1-\psi} \right)^{0.6} N_p^{-0.6} + \frac{\sigma_{-1}(1 - \sigma_m/\sigma_s)}{E} \left(\frac{N_0}{N_p} \right)^{1/m_2}. \quad (4.15)$$

Для формули Менсона (4.10) урахування співвідношення (4.14) приводить до рівності

$$\varepsilon_a = \frac{1}{2} \left(\ln \frac{1}{1-\psi} \right)^{0.6} N_p^{-0.6} + 1.75 \frac{\sigma_s - \sigma_m}{E} N_p^{-0.12}. \quad (4.16)$$

Середні напруження розтягу знижують міцність при малоцикловому навантаженні, середні напруження стиснення – підвищують. Часто в практичних розрахунках це підвищення при визначенні запасу міцності не враховується.

4.1.7. Моделі руйнування за критерієм довговічності

Визначальними факторами, які призводять до вироблення ресурсу деталями авіаційних ГТД, є:

- тривалі статичні навантаження при підвищених температурах;
- повторно-статичні або циклічні навантаження з пружно-пластичними деформаціями.

Кількісні характеристики навантаження деталей зазначеними факторами впливають з узагальненого польотного циклу (УПЦ), який задається для кожного конкретного ГТД, що встановлюється на конкретному літальному апараті.

Процес вироблення ресурсів деталей прийнято називати їх пошкоджуваністю, а заходи вироблення ресурсу на окремих ділянках УПЦ і

за один УПЦ в цілому – ушкодженнями деталі Π_{TM} і Π_{MCB} за критеріями тривалої міцності (ТМ) і малоциклової втоми (МЦВ) відповідно.

Нині, як правило, прогнозування витрати ресурсу деталей виконують окремо за критеріями ТМ і МЦВ. Результати подають у формі поточних пошкоджень $\Pi_{TM}(N)$ і $\Pi_{MCB}(N)$ в залежності від напрацювання в циклах навантаження N . Поточні пошкодження змінюються в межах від 0 (при $N = 0$) до 1 (при $N = N_p$), де N_p – руйнівна кількість УПЦ або довговічність деталі за ТМ або МЦВ.

Виходячи з принципу лінійного підсумовування пошкоджень, при послідовній $N = 0, 1, 2, 3, \dots$ реалізації УПЦ двигуна, значення поточних пошкоджень деталей визначають так:

$$\Pi_{TM}(N) = N \cdot \Pi_{TM \text{ УПЦ}}; \Pi_{MCB}(N) = N \cdot \Pi_{MCB \text{ УПЦ}}. \quad (4.17)$$

Пошкодження деталі за критерієм тривалої міцності за один УПЦ

Для розрахунку виробітку ресурсу деталі за ТМ за один УПЦ, в якому є $i = 1, 2, \dots, k$ різних сталих режимів, здійснюється шляхом лінійного підсумовування пошкоджень на кожному i -му режимі УПЦ:

$$\Pi_{TM \text{ УПЦ}} = \frac{t_1}{t_{p1}} + \frac{t_2}{t_{p2}} + \dots = \sum_{i=1}^k \frac{t_i}{t_{pi}}, \quad (4.18)$$

де t_i – час роботи на i -му режимі;

t_{pi} – час до руйнування, відповідний параметрам σ_i і T_i – напруженню і температурі в критичній точці деталі на i -му режимі.

Величину t_{pi} визначають за моделями, які описують тривалу міцність матеріалів, наприклад за моделлю Ларсона–Міллера:

$$\lg \sigma_{dl i} = a_0 + a_1 (P_{л-м})_i + a_2 (P_{л-м})_i^2 + a_3 (P_{л-м})_i^3,$$

де $(P_{л-м})_i = T_i (\lg t_{pi} + C)$, а коефіцієнти a_0, a_1, a_2, a_3 експериментально визначені для матеріалу деталі.

Пошкодження деталі за критерієм малоциклової втоми за один УПЦ

Для розрахунку вироблення ресурсу деталі за МЦВ впродовж одного УПЦ, в якому є різні цикли навантаження, зазвичай використовують формулу

$$P_{\text{мцв упц}} = \frac{N_1}{N_{p1}} + \frac{N_2}{N_{p2}} + \dots = \sum_{j=1}^I \frac{N_j}{N_{pj}}, \quad (4.19)$$

де $P_{\text{мцв упц}}$ – пошкодження деталі за МЦВ впродовж одного УПЦ;

N_j – кількість циклів одного j -го вигляду з параметрами навантаження $\Delta \varepsilon_j$, T_j та ін., що виникають протягом одного УПЦ;

N_{pj} – кількість основних циклів j -го вигляду до руйнування з параметрами навантаження $\Delta \varepsilon_j$, T_j та ін.

Кількість N_{pj} циклів j -го вигляду до руйнування можна визначити наближено як рішення універсального рівняння Менсона

$$\Delta \varepsilon_j = \left(\ln \frac{1}{1 - \psi_j} \right)^{0.6} (N_{pj})^{-0.6} + 3.5 \frac{\sigma_{ej} - \sigma_{mj}}{E_j} (N_{pj})^{-0.12}, \quad (4.20)$$

де $\Delta \varepsilon_j$ – розмах деформацій j -го циклу навантаження деталі.

Задаючи значення $\Delta \varepsilon_j$ і σ_{mj} , а також значення параметрів ψ_j , σ_{ej} , E_j , відповідних температур T_j у критичній точці, можна визначити кількість N_{pj} циклів до руйнування.

Величину розмаху деформацій $\Delta \varepsilon_j$ у критичній точці деталі для j -го циклу навантаження зазвичай визначають за формулою

$$\Delta \varepsilon_j = \frac{\sigma_{\max j}}{E(T(\sigma_{\max j}))} - \frac{\sigma_{\min j}}{E(T(\sigma_{\min j}))}, \quad (4.21)$$

де $\sigma_{\max j}$ і $\sigma_{\min j}$ – максимальне і мінімальне напруження в j -му циклі навантаження, а $E(T(\sigma_{\max j}))$ і $E(T(\sigma_{\min j}))$ – відповідні їм значення модуля пружності матеріалу.

Зазвичай рівняння Менсона (4.20) вирішується щодо N_{pj} методом послідовних наближень.

4.1.8. Запаси довговічності та міцності деталі

Згідно з (4.17), моделі руйнування лопатки мають вигляд:

– за критерієм ТМ:

$$P_{\text{ТМ } \Sigma} = N_p \cdot P_{\text{ТМ упц}} = 1; \quad (4.22)$$

– за критерієм МЦВ:

$$\Pi_{\text{МЦВ } \Sigma} = N_p \cdot \Pi_{\text{МЦВ УПЦ}} = 1, \quad (4.23)$$

де $\Pi_{\text{ТМ } \Sigma}$ і $\Pi_{\text{МЦВ } \Sigma}$ – накопичені пошкодження;

N_p – кількість реалізованих УПЦ на момент руйнування.

Величини $\Pi_{\text{ТМ } \Sigma}$ відносять до деякого еквівалентного сталого режиму, на якому час роботи дорівнює t_e , а час до руйнування – $t_{p \text{ е}}$. Зазвичай, за такий режим вибирають максимальний режим роботи двигуна.

Тоді

$$\Pi_{\text{ТМ } \Sigma} = \frac{t_e}{t_{p \text{ е}}} = \frac{1}{t_{p \text{ е}}/t_e} = \frac{1}{K_t}, \quad (4.24)$$

де $K_t = \frac{t_{p \text{ е}}}{t_e}$ – запас довговічності деталі за критерієм ТМ.

Із формул (4.22) і (4.24) можна встановити зв'язок між поточним запасом довговічності $K_t(N)$ і кількістю УПЦ:

$$K_t(N) = \frac{1}{N \cdot \Pi_{\text{ТМ УПЦ}}}. \quad (4.25)$$

Відомо також, що, користуючись моделлю «криві тривалої міцності», можна встановити зв'язок між запасом довговічності K_t і міцності $K_\sigma = \frac{\sigma_{mp}}{\sigma_e}$:

$$K_\sigma = \sqrt[m]{K_t}, \quad (4.26)$$

де m – показник ступеня в моделі ТМ матеріалу деталі.

Тоді з (4.25) випливає, що

$$K_\sigma(N) = \sqrt[m]{\frac{1}{N \cdot \Pi_{\text{ТМ УПЦ}}}}. \quad (4.27)$$

Величину $\Pi_{\text{МЦВ } \Sigma}$ також відносять до деякої кількості еквівалентних циклів N_e , число яких до руйнування за критерієм МЦВ дорівнює $N_{p \text{ е}}$.

Виконавши перетворення, аналогічні вищенаведеним, можна

отримати залежності для визначення запасів довговічності K_N й міцності $K_{\Delta\varepsilon}$ за критерієм МЦВ:

$$K_N(N) = \frac{1}{N \cdot P_{\text{МЦВ упц}}}; \quad (4.28)$$

$$K_{\Delta\varepsilon}(N) = m_2 \sqrt[m_2]{\frac{1}{N \cdot P_{\text{МЦВ упц}}}}, \quad (4.29)$$

де m_2 – показник ступеня в моделі МЦВ матеріалу деталі $(\Delta\varepsilon)^{m_2} \cdot N = C_2$.

4.1.9. Показники безвідмовності роботи і ресурсу лопатки

Наведені вище залежності запасів міцності $K_\sigma(N)$, $K_{\Delta\varepsilon}$ і довговічності $K_t(N)$, K_N за критеріями ТМ і МЦВ визначаються формулами (4.27), (4.29) і (4.25), (4.28) відповідно, є детермінованими показниками безвідмовності деталі за напрацюванням.

Напрацювання за малоцикловою втомою визначається поточним числом N УПЦ, а за тривалою міцністю – в годинах УПЦ $t_\varepsilon = N \cdot t_{\text{упц}}$, де $t_{\text{упц}}$ – тривалість УПЦ. Тобто, і для тривалої міцності напрацювання може виражатися числом УПЦ N (при відомому $t_{\text{упц}}$).

Для оцінок ресурсів деталі за критеріями ТМ і МЦВ при різних запасах міцності й довговічності необхідно на графіки кривих безвідмовності роботи певної деталі нанести рівні нормованих значень цих запасів, як показано на рис. 4.5. Точки перетину зазначених рівнів з кривими безвідмовності відповідають величинам відповідних ресурсів $R_{\text{ТМ } \sigma}$, $R_{\text{ТМ } t}$, $R_{\text{МЦВ } \Delta\varepsilon}$ та $R_{\text{МЦВ } N}$.

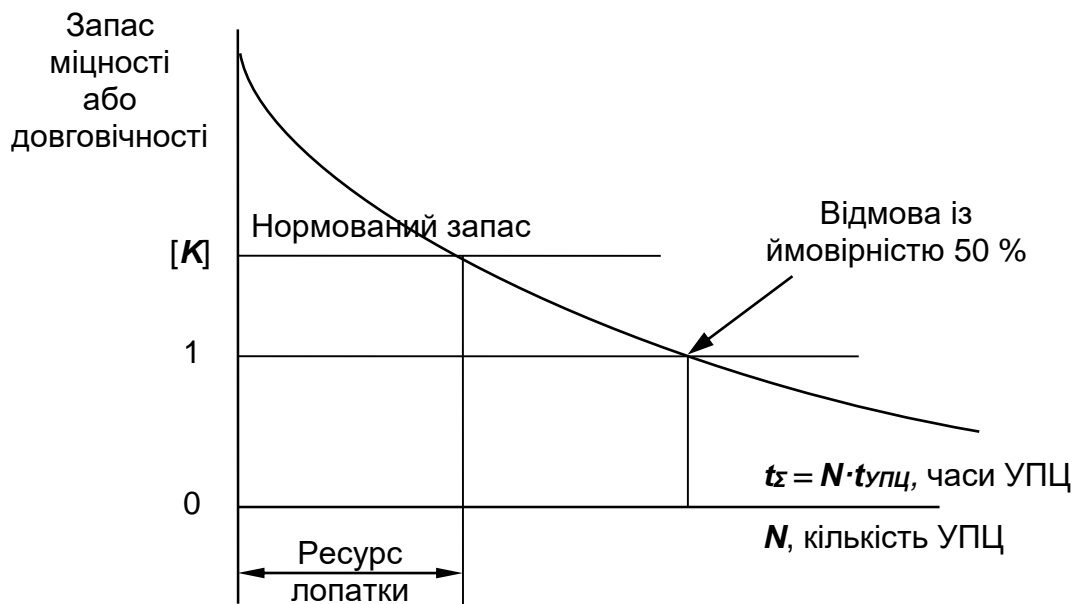


Рис. 4.5. Визначення ресурсу лопатки за кривими її безвідмовної роботи

4.2. Задачі до лабораторної роботи

До виконання пропонуються такі завдання:

1. Розрахунок пошкодження лопатки турбіни Π_{TM} за критерієм тривалої міцності за один узагальнений польотний цикл.
2. Розрахунок пошкодження лопатки $\Pi_{МЦВ}$ за критерієм малоциклової втоми за один узагальнений польотний цикл.
3. Побудова детермінованих кривих безвідмовності лопатки – залежностей зміни запасів її міцності й довговічності від напрацювання.
4. Аналіз взаємозв'язку ресурсів лопатки за критеріями тривалої міцності та малоциклової втоми.

4.3. Вихідні дані до роботи

Об'єктом досліджень є робоча лопатка першого ступеня турбіни авіаційного ГТД, термонапружений стан якої раніше визначено студентами при виконанні домашніх завдань або курсових проектів.

Про неї необхідно мати таку інформацію:

- назва і призначення авіаційного ГТД (двигуна-прототипу);
- матеріал лопатки і його основні властивості;
- частота обертання ротору турбіни $n_{зл}$ на злітному (максимальному) режимі;
- напруження $\sigma_{зл}$ і відповідна йому температура $T(\sigma_{зл})$ у критичній точці лопатки на злітному режимі роботи двигуна.

Спрощений УПЦ двигуна має вигляд, показаний на рис. 4.6.

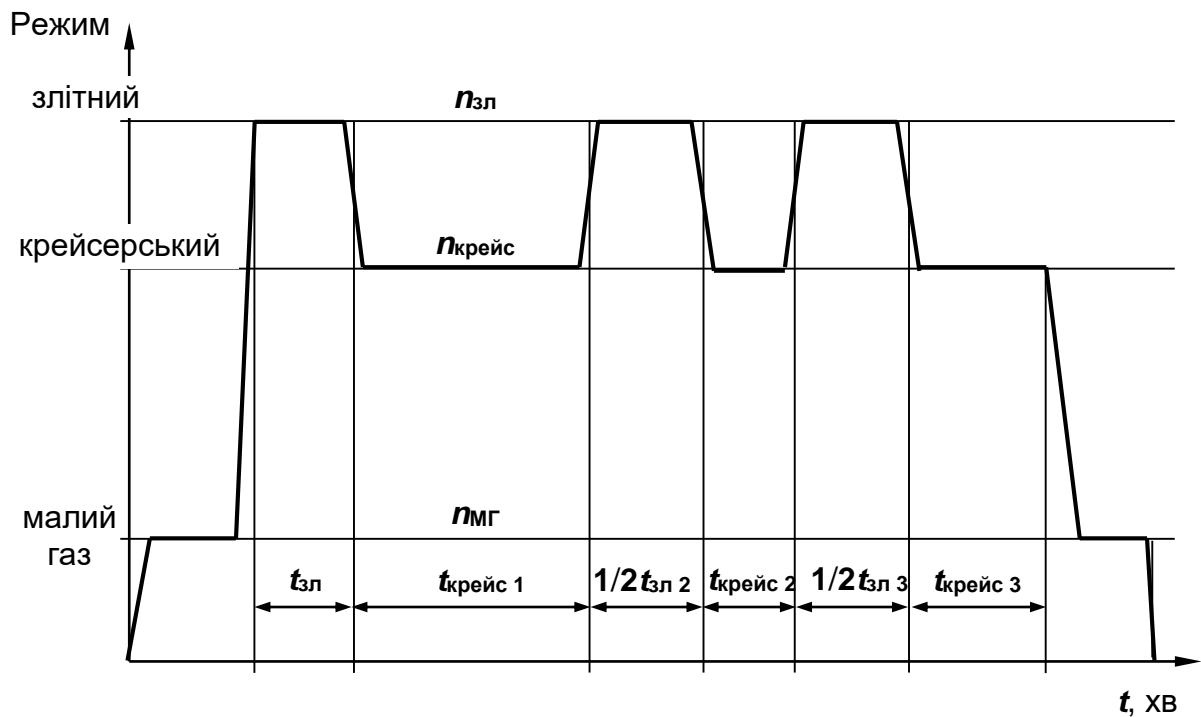


Рис. 4.6. Узагальнений польотний цикл двигуна

Тривалість режимів УПЦ:

$t_{зл} = 4$ хв, $t_{крейс 1} = 60$ хв, $t_{крейс 2} = t_{крейс 3} = 26$ хв.

Відносна частота обертання ротора турбіни на крейсерському режимі роботи двигуна:

$$\bar{n}_{крейс} = \frac{n_{крейс}}{n_{зл}} = 0,9.$$

Набір необхідних даних про характеристики міцності матеріалу робочої лопатки турбіни вибрати з додатку 4.

Показник ступеня в моделі МЦВ рекомендується прийняти – $m_2 = 20$.

Нормовані припустимі запаси для робочих лопаток турбіни слід прийняти такими:

- за міцністю: $[K_{\sigma}] = [K_{\Delta \epsilon}] = 1,3$;
- за довговічністю: $[K_M] = 10,0$.

4.4. Порядок виконання роботи

Кожен студент погоджує з викладачем дані про термонапружений стан робочої лопатки і параметри УПЦ.

Рішення задач роботи слід проводити в такій послідовності.

4.4.1. Задача 1. Розрахунок пошкодження лопатки Π_{TM} за тривалою міцністю за один УПЦ

1. Припускаючи рівність температур $T_{зл} \approx T_{крейс}$ на злітному і крейсерському режимах, розрахувати напруження на крейсерському режимі за формулою

$$\sigma_{крейс} = \sigma_{зл} \left(\frac{n_{крейс}}{n_{зл}} \right)^2. \quad (4.30)$$

Як показує практика, пошкодження на режимах малого газу дуже малі порівняно з ушкодженнями на режимах роботи двигуна, близьких до максимальних. Відмінності у значеннях $\Pi_{TM\text{ мг}}$ і $\Pi_{TM\text{ зл}}$ досягають декількох порядків. Це дає підставу виключити з подальших розрахунків низькі режими роботи двигуна.

2. За моделлю Ларсона–Міллера (див. додаток 4) розрахувати значення часу до руйнування $t_{р\text{ зл}}$ і $t_{р\text{ крейс}}$ на злітному і крейсерському режимах, використовуючи формулу (1.7).

3. Визначити пошкодження лопатки $\Pi_{TM\text{ упц}}$ за критерієм тривалої міцності за один УПЦ згідно з формулою

$$\Pi_{TM\text{ упц}} = \frac{\sum t_{зл}}{t_{р\text{ зл}}} + \frac{\sum t_{крейс}}{t_{р\text{ крейс}}}, \quad (4.31)$$

де $\sum t_{зл}$ і $\sum t_{крейс}$ – сумарний термін роботи двигуна за один УПЦ на злітному і крейсерському режимах відповідно.

4.4.2. Задача 2. Розрахунок пошкодження лопатки $\Pi_{мцв\text{ упц}}$ за малоцикловою втомою за один УПЦ

Із аналізу УПЦ випливає, що у ньому виділяються один основний цикл (режим 0 – режим зльоту – режим 0) і два підцикли (режим крейсерський – режим зльоту – режим крейсерський).

Для виконання поставленої задачі необхідно:

1. Розрахувати розмахи деформацій $\Delta \epsilon_1$ і $\Delta \epsilon_2$ для основного циклу і підциклів навантаження відповідно, використовуючи формулу (4.21):

$$\Delta \epsilon_1 = \frac{\sigma_{зл}}{E(T(\sigma_{зл}))} - 0; \quad (4.32)$$

$$\Delta \varepsilon_2 = \frac{\sigma_{3л}}{E(T(\sigma_{3л}))} - \frac{\sigma_{крейс}}{E(T(\sigma_{3л}))}. \quad (4.33)$$

2. Визначити середні напруження σ_{m1} і σ_{m2} , відповідні основному циклу і підциклу навантаження робочої лопатки турбіни, згідно з формулою

$$\sigma_{mj} = \frac{\sigma_{\max j} + \sigma_{\min j}}{2}, \quad (4.34)$$

де $\sigma_{\max j}$ і $\sigma_{\min j}$ – максимальне і мінімальне напруження у критичній точці розглянутої деталі у відповідному циклі її навантаження.

3. Визначити кількість основних циклів до руйнування $N_{p3л}$ і $N_{pкрейс}$ із рівняння Менсона (4.20), підставивши у нього значення $\Delta \varepsilon_1$, σ_{m1} і $\Delta \varepsilon_2$, σ_{m2} відповідно.

Рівняння (4.20) необхідно розв'язати двічі – для основного циклу ($j = 1$) і підциклу ($j = 2$) навантаження лопатки. Для цього слід обчислити значення коефіцієнтів A_j і B_j рівняння, що залишаються постійними для заданого циклу навантаження:

$$A_j = \left[\ln \frac{1}{1 - \psi(T_j)} \right]^{0,6}; \quad B_j = 3,5 \frac{\sigma_e(T_j) - \sigma_{mj}}{E(T_j)}. \quad (4.35)$$

Тоді права частина рівняння (4.20) приймає вигляд

$$\Delta \varepsilon_j^* = A_j \cdot (N_{pj})^{-0,6} + B_j \cdot (N_{pj})^{-0,12}. \quad (4.36)$$

Задаючи різні зростаючі значення $N_{pj} = 10, 30, 10^2, 3 \cdot 10^2, 10^3, 3 \cdot 10^3, 10^4, 10^5, 10^6$ і т.д., розраховувати значення $\Delta \varepsilon_j^*$ і величину δ_j їхньої невідповідності значенням, що знайдені за формулою (4.32):

$$\delta_j = \Delta \varepsilon_j - \Delta \varepsilon_j^*. \quad (4.37)$$

до досягнення зміни знак δ_j .

Для $j = 1, 2$ знайти шукані рішення N_{pj} як координати точок, в яких $\delta_j = 0$, тобто рівняння (4.20) перетворюється у тотожність. Для цього можна використовувати лінійну інтерполяцію залежності $\delta_j(N_{pj})$ між двома

останніми значеннями (рис. 4.7).

Результати розв'язання рівняння Менсона для основного циклу і підциклів навантаження занести у табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Результати розв'язання рівняння Менсона

Цикл навантаження	$\Delta \varepsilon_j$	N_{pj}	$(N_{pj})^{-0,6}$	$(N_{pj})^{-0,12}$	$A_j (N_{pj})^{-0,6}$	$B_j (N_{pj})^{-0,12}$	$\Delta \varepsilon_j^*$	δ_j
1	2	3	4	5	6	7	8	9

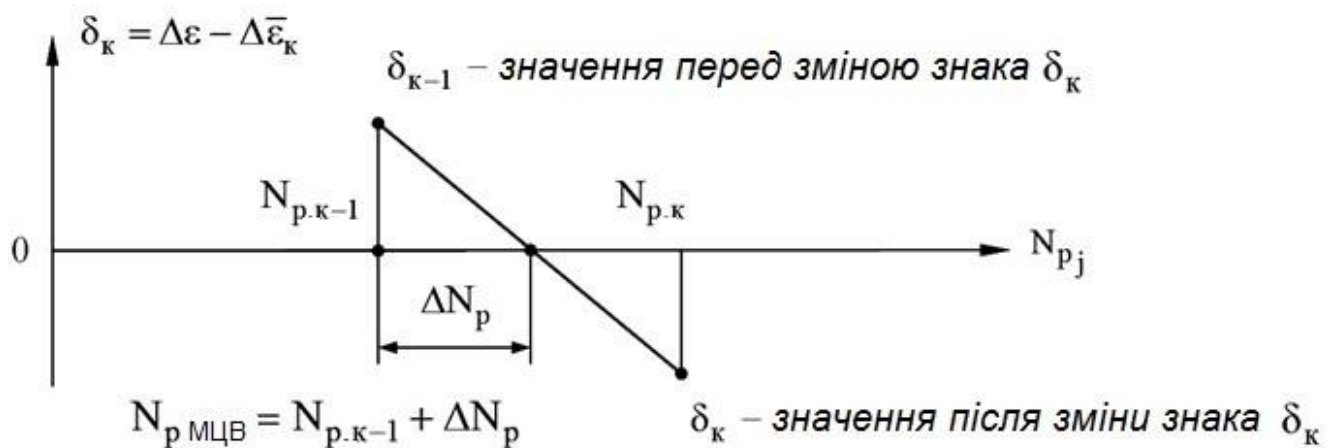


Рис. 4.7. Графічне розв'язання рівняння Менсона

Розрахувати пошкодження $\Pi_{мцв упц}$ за МЦВ для одного УПЦ за формулою, яка випливає з формули (4.19):

$$\Pi_{мцв упц} = \frac{1}{N_{p зл}} + \frac{2}{N_{p крейс}}. \quad (4.38)$$

4.4.3. Задача 3. Побудова детермінованих кривих безвідмовності лопатки турбіни

1. Обчислити показник ступеня m моделі «криві тривалої міцності», що відповідає умовам навантаження лопатки турбіни на злітному режимі роботи двигуна за формулою

$$m = \frac{\lg t_{p \text{ крейс}} - \lg t_{p \text{ зл}}}{\lg \sigma_{\text{зл}} - \lg \sigma_{\text{крейс}}} \quad (4.39)$$

2. Використовуючи знайдений показник ступеня m і величину нормованого запасу міцності $[K_\sigma]$, визначити нормований запас довговічності $[K_t]$ за критерієм ТМ, згідно з формулою (4.26).

3. Для різних значень напруцювання $N_{упц}$ у кількості УПЦ розрахувати коефіцієнти запасів довговічності й міцності за критеріями ТМ і МЦВ $K_t(N)$, $K_\sigma(N)$, $K_N(N)$, $K_{\Delta\varepsilon}(N)$ за формулами (4.25), (4.27), (4.28) і (4.29) відповідно.

Результати обчислень занести у табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Результати розрахунків запасів міцності й довговічності

Найменування коефіцієнтів запасів	Розрахунок за формулою	N				
		1	10	10^2	10^3
$K_t(N)$	(4.25)					
$K_\sigma(N)$	(4.27)					
$K_N(N)$	(4.28)					
$K_{\Delta\varepsilon}(N)$	(4.29)					

4. Відповідно до рис. 4.5, побудувати розраховані залежності коефіцієнтів запасів довговічності й міцності лопатки від кількості УПЦ – детерміновані показники безвідмовності лопатки за напруцюванням. Кожен з показників зобразити на окремому графіку.

5. Використовуючи нормовані припустимі значення коефіцієнтів запасів і графіки показників безвідмовності лопатки, побудовані на попередньому етапі, знайти значення ресурсів R . Для цього на графіках

поточних запасів довговічності $K_{TM}^t(N)$ і $K_{MЦВ}^N(N)$ нанести горизонтальну лінію $[K_{TM}^t]$ або $[K_{MЦВ}^N]$ відповідно. Точки перетину $K_{TM}^t(N)$ з $[K_{TM}^t]$, $K_{MЦВ}^N(N)$ з $[K_{MЦВ}^N]$ і дадуть значення довговічності за критеріями ТМ і МЦВ відповідно (див. рис. 4.5).

Отримані значення ресурсів занести до табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Результати визначення ресурсів

Нормовані запаси	Види ресурсів	Величини ресурсів	
		у кількості УПЦ	у годинах УПЦ
$[K_t] = \dots$	$R_{TM\ t}$		
$[K_N] = 10,0$	$R_{MЦВ\ N}$		—
$[K_\sigma] = 1,3$	$R_{TM\ \sigma}$		
$[K_{\Delta\varepsilon}] = 1,3$	$R_{MЦВ\ \Delta\varepsilon}$		—

6. Проаналізувати отримані оцінки ресурсів лопатки турбіни і сформулювати відповідні висновки.

4.4.4. Звіт з роботи

Звіт повинен містити:

- 1) інформацію про досліджувану робочу лопатку турбіни;
- 2) вигляд спрощеного УПЦ;
- 3) основні розрахункові формули;
- 4) розрахунки пошкоджень $\Pi_{TM\ упц}$ і $\Pi_{MЦВ\ упц}$ за критеріями ТМ і МЦВ за один УПЦ;
- 5) табл. 4.1 результатів розв'язання рівняння Менсона;
- 6) рис. 4.7 для кожного ($j = 1$ та $j = 2$) із циклів навантаження лопатки;
- 7) табл. 4.2 результатів розрахунків показників безвідмовності лопатки;
- 8) графіки типу рис. 4.5 для залежностей показників безвідмовності лопатки з напрацювання $N_{упц}$ (всього 4 рисунки);
- 9) табл. 4.3 результатів розрахунку ресурсів;
- 10) основні висновки за результатами визначення ресурсів лопатки.

4.5. Запитання для самоконтролю

1. Що називають миттєвою границею текучості?
2. Яке припущення лежить в основі ізотропної моделі зміцнення

матеріалу?

3. Що таке ефект Баушингера?

4. У чому полягає принцип Мазінга?

5. Що називають низьким показником малоциклової втоми?

Наведіть приклад деталей ГТД, у яких це явище може виявлятися.

6. Які параметри, що характеризують циклічне навантаження, описують різні моделі втоми?

7. Як впливає асиметрія циклу навантаження на опір повторним деформаціям?

8. Дайте визначення пошкодження деталі за критеріями ТМ і МЦВ.

9. У чому полягає принцип лінійного підсумовування пошкоджень?

10. Який зв'язок між запасами міцності, довговічності та пошкодженнями?

Лабораторна робота № 5

РОЗРАХУНКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ РОБОЧОЇ ЛОПАТКИ ТУРБІНИ АВІАЦІЙНОГО ГТД

Мета роботи: дослідження залежності циклічної тріщиностійкості лопатки від параметрів циклічних навантажень і значень початкового розміру тріщини a_0 .

5.1. Основні положення

До недавнього часу довговічність деталей авіаційних ГТД визначалася часом або кількістю циклів навантаження до появи мікротріщини довжиною понад 0,8...1 мм. Однак, наявність тріщини в деталі далеко не завжди означає втрату її працездатності. Для багатьох деталей час роботи за наявності тріщини, який характеризує так звану живучість, може становити до 30...40% їхнього ресурсу.

У зв'язку з цим класичні методи розрахунку деталей на міцність доповнюють методами механіки руйнування, які дають можливість визначити закони розвитку тріщин в умовах дії тривалих статичних і циклічних навантажень.

Практика показує, що основний вплив на зростання тріщин має циклічне навантаження. Тому в цій роботі вивчаються основні закономірності росту тріщини в робочій лопатці турбіни під впливом циклічного навантаження. Стосовно показників навантаження лопатки розглядається розвиток макротріщин, що виникли як у процесі експлуатації у вигляді мікротріщин, так і від початкових технологічних дефектів при циклічних навантаженнях різної природи.

5.1.1. Критичний розмір тріщини

Опір матеріалу розвитку тріщин у механіці руйнування характеризується значенням коефіцієнта інтенсивності напружень K , яке є функцією півдовжини тріщини a , форми тріщини, розташування її на деталі і прикладеного номінального напруження σ .

У загальному випадку K визначають як

$$K = \sigma \sqrt{a \cdot M}, \quad (5.1)$$

де M – функція, що залежить від форми тріщини і розташування її відносно напрямку діючих зусиль (реалізується умова розтягування, зрушення або зрізу).

Для умов циклічного навантаження з постійним розмахом номінальних

напружень $\Delta\sigma$ формула (5.1) приймає вигляд

$$\Delta K = \Delta\sigma \sqrt{a \cdot M}. \quad (5.2)$$

У цьому випадку у міру збільшення числа циклів розмах коефіцієнта інтенсивності напружень зростає за рахунок збільшення довжини тріщини.

Припустимо, що в області кореневого перерізу лопатки виникає або початково існує поверхнева напівкругла тріщина, для якої

$$M = \frac{4}{\pi} \left[1 + 0,2 \left(\frac{2\theta}{\pi} \right)^2 \right]^2, \quad (5.3)$$

де θ – кутова координата точок меж тріщини.

Для точки на поверхні $\theta=\pi$. Тому, відповідно до (5.3), для подальших розрахунків приймаємо $M=4,13$.

Якщо відомі значення M і розмахи номінальних напружень $\Delta\sigma$ у деталі при циклічному навантаженні, можна знайти критичний розмір тріщини – напівдовжину $a_{кр}$, при якому починається її лавинний зріст, тобто руйнування деталі (лопатки). Стан руйнування відповідає умові

$$\Delta K_1 = K_{1кр}^T, \quad (5.4)$$

де $K_{1кр}^T$ – в'язкість руйнування при температурі T або граничне значення коефіцієнта інтенсивності напружень K_1 , відповідні такому поєднанню $\Delta\sigma$ і a , за яким починається лавинний зріст тріщини.

В'язкість руйнування $K_{1кр}^{20}$ визначають при температурі 20°C на стандартних зразках, що мають таке співвідношення розмірів (ширини і товщини), при якому реалізується плоский деформований стан у зоні поширення тріщини.

Величина $K_{1кр}^T$ при підвищених температурах, зазвичай, визначається за формулою

$$K_{1кр}^T = K_{1кр}^{20} \left(\frac{\sigma_{0,2}^T}{\sigma_{0,2}^{20}} \right), \quad (5.5)$$

де $\sigma_{0,2}^T$ і $\sigma_{0,2}^{20}$ – границі текучості матеріалу при температурах T і 20°C відповідно.

Таким чином, виходячи з (5.2), за умови (5.4) величину критичної півдовжини тріщини знаходять за формулою

$$a_{кр} = \left(\frac{K_{1кр}^T}{\Delta\sigma} \right)^2 \cdot \frac{1}{M}. \quad (5.6)$$

5.1.2. Поширення тріщини при циклічному навантаженні

Як модель зростання тріщини при циклічному навантаженні приймається залежність швидкості росту тріщини da/dN від розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK . Ця залежність задовільно описується ступеневим рівнянням Періса:

$$\frac{da}{dN} = C_0 (\Delta K_1)^n, \quad (5.7)$$

де N – кількість циклів навантаження.

Коефіцієнти C_0 і n попередньо визначаються за результатами спеціальних досліджень на плоских зразках матеріалу лопатки. При розв'язанні рівняння (5.7) використовуються такі розмірності: ΔK_1 – [кгс/мм^{3/2}] і da/dN – [мм/цикл].

Для кожного матеріалу є порогові значення: мінімальне ΔK_{min} , при якому тріщина не росте, і критичне $\Delta K_{max} = \Delta K_{1кр}$, при якому тріщина лавиноподібно подовжується.

Для визначення числа циклів, протягом яких тріщина розвивається від розміру $a = a_0$ до критичного $a_{кр}$, у рівняння (5.7) необхідно підставити значення ΔK з рівняння (5.2). Тоді отримаємо рівняння Періса у вигляді

$$\frac{da}{dN} = C_0 (\Delta\sigma)^n (a \cdot M)^{\frac{n}{2}}. \quad (5.8)$$

Його розв'язок щодо N має вигляд

$$N = \frac{2}{(n-2)C_0(\Delta\sigma)^n M^{\frac{n}{2}}} \left(\frac{1}{(a_0)^{\frac{n-2}{2}}} - \frac{1}{(a_{кр})^{\frac{n-2}{2}}} \right). \quad (5.9)$$

Формулу (5.9) покладемо в основу досліджень тріщиностійкості

лопатки, що розглядається в цій лабораторній роботі.

5.2. Задачі до лабораторної роботи

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Визначити в'язкість руйнування матеріалу $K_{1\text{кр}}^T$ і критичні розміри тріщини $a_{\text{кр}}$ при навантаженні, відповідному максимальному (злітному) режиму роботи двигуна. Розміри початкових дефектів a_0 і a_1 вказані у рядках 1 і 2 табл. 5.4.
2. Обчислити тріщиностійкість лопатки на першому етапі розвитку тріщини від вихідного технологічного дефекту a_0 до величини мікротріщини a_1 (визначити кількість УПЦ $N_{\text{кр} 1}$).
3. Визначити тривалість етапу живучості $N_{\text{кр} 2}$ розвитку тріщини від мікротріщини з напівдовжиною a_1 до макротріщини критичних розмірів $a_{\text{кр}}$. Результати обчислень занести у рядки 1 і 2 табл. 5.4.
4. Знайти для основного циклу навантаження максимальний розмір початкової тріщини a_0 , який припускає виконання 10^2 , 10^3 , 10^4 польотних циклів. Заповнити рядки 3, 4, 5 табл. 5.4.
5. Розрахувати тріщиностійкість лопатки $N_{\text{кр} \text{вібр}}$ щодо підвищених вібрацій на злітному режимі для двох значень початкових дефектів. Виходячи із заданої тривалості $t_{\text{зл}}$ роботи двигуна на злітному режимі, визначити кількість польотних циклів $N_{\text{упц}}$, що відповідають $N_{\text{кр} \text{вібр}}$. Результати занести у рядки 6 і 7 табл. 5.4.

5.3. Вихідні дані до роботи

5.3.1. Властивості матеріалу лопатки

Матеріал лопатки – сплав ЖС-6КП.

Таблиця 5.1

Параметри рівняння Періса і величина $K_{1\text{кр}}^{20}$ для сплаву ЖС-6КП

$T, ^\circ\text{C}$	r	n	C_0	$K_{1\text{кр}}^{20}, \text{МПа/мм}^{1/2}$
20	0	3,49	$1,04 \cdot 10^{-9}$	25
800	0	3,32	$5,56 \cdot 10^{-9}$	—
1000	0	4,22	$2,8 \cdot 10^{-8}$	—

Таблиця 5.2

Залежність границі текучості $\sigma_{0.2}^T$ сплаву ЖС-6КП
від температур

$T, ^\circ\text{C}$	20	800	900	1000
$\sigma_{0.2}^T, \text{МПа}$	850	830	520	320

5.3.2. Параметри навантаження лопатки

У цій роботі об'єктом досліджень є лопатка з варіантами параметрів навантаження, наведеними у табл. 5.3.

Таблиця 5.3

Параметри навантаження лопатки у місці розташування тріщини
на злітному режимі

Варіанти	1	2	3	4	5	6	7	8
$T, ^\circ\text{C}$	800					1000		
$\sigma_{зл}, \text{МПа}$	160	170	180	190	200	80	90	100

Припустимо, що на лопатку діють такі циклічні навантаження:

1. Основний віднульовий ($r = 0$) польотний цикл (ПЦ), який з метою спрощення розрахунків приймемо у вигляді «0 – злітний режим – 0».

2. На максимальному режимі виникають підвищені вібрації з частотою першої форми власних згинальних коливань із амплітудою 10 МПа в області критичної точки, тобто з розмахом напружень $\Delta\sigma_2 = 20 \text{ МПа}$.

Власна частота коливань $f = 3,9 \cdot 10^3 \text{ Гц}$.

При цьому час роботи на злітному режимі за польотний цикл становить $t_{зл} = 4,5 \text{ хв}$.

5.3.3. Початковий розмір тріщини

Передбачається розглянути кілька значень вихідного розміру напівдовжини тріщини:

- 1) тріщина, що виникла у процесі експлуатації – $a_1 = 0,5 \text{ мм}$;
- 2) початковий технологічний дефект з умовним значенням $a_1 = 0,5 \cdot 10^2 \text{ мм}$.

5.4. Порядок виконання роботи

Лабораторна робота виконується студентом для одного з варіантів параметрів навантаження лопатки, заданого викладачем.

Порядок обчислень визначається за табл. 5.4.

Таблиця 5.4
Результати розрахунків тріщиностійкості лопатки

№ рядка	$T, ^\circ\text{C}$	$K_{1кр}(T)$	$\Delta\sigma, \text{МПа}$	$a_{кр}$	$N_{кр i}$	$a_0, \text{мм}$
1	2	3	4	5	6	7
1						$0,5 \cdot 10^{-1}$
2						$0,5 \cdot 10^{-2}$
3					10^2	
4					10^3	
5					10^4	
6			10			$0,5 \cdot 10^{-1}$
7			10			$0,5 \cdot 10^{-2}$

При визначенні залежності в'язкості руйнування $K_{1кр}^T$ від температури необхідно скористатися формулою (5.5) і даними табл. 5.2.

При визначенні критичних розмірів тріщини $a_{кр}$ для різних величин a_0 значення параметра M у формулі (5.6) прийняти таким, що дорівнює $M = 4,13$.

Кількість циклів до руйнування визначають за формулою (5.9) з параметрами n і C_0 , які вибирають з табл. 5.1, відповідно до заданого варіанта навантаження лопатки.

Критичне число циклів навантаження лопатки вібронапруженнями необхідно оцінювати з урахуванням заданої тривалості максимального режиму роботи двигуна за один УПЦ t_{\max} . Кількість $N_{упц}$, за які напівдовжина a тріщини від вібронапружень не перевищує $a_{кр}$, визначається за формулою

$$N_{упц} = \frac{N_{кр \text{ вібр}}}{60 \cdot f \cdot t_{\max}}, \quad (5.10)$$

де $N_{упц}$ і $N_{кр \text{ вібр}}$ – кількість польотних циклів і віброциклів відповідно до появи тріщин критичного розміру $a_{кр}$, отриманого при рішенні задачі 1 (рядки 1 і 2 табл. 5.4).

Зробити загальні висновки за підсумками дослідження.

5.4.1. Звіт з роботи

У звіті мають бути наведені:

- 1) основні розрахункові формули;
- 2) занесені у табл. 5.4 значення параметрів навантаження лопатки;
- 3) усі прийняті для розрахунків значення параметрів, що характеризують досліджуване явище;
- 4) результати розрахунків до усіх завдань, а також підсумкова табл. 5.4.

5.5. Запитання для самоконтролю

1. Що називають коефіцієнтом інтенсивності напружень?
2. Що є критичним розміром тріщини?
3. Від яких параметрів матеріалу залежить критичний розмір тріщини?
4. Від яких параметрів навантаження залежить критичний розмір тріщини?
5. Від яких геометричних параметрів залежить критичний розмір тріщини?
6. Що таке в'язкість руйнування?
7. Як визначити в'язкість руйнування для різних температур?
8. Зв'язок між якими параметрами встановлюється рівнянням Періса?
9. Як визначити ресурс деталі з тріщиною?


**Експериментальні дані щодо тривалої міцності
високотемпературних матеріалів**

№ вар.	Матеріал	Температура, °C	σ_{100}	σ_{500}	σ_{1000}
			МПа		
1	ХН77ТЮР (ЭИ-437Б)	600	680	—	560
		650	600	—	470
		700	410	—	300
		750	300	—	200
		800	200	—	100
2	1Х12Н2ВМФ (ЭИ961)	400	800	780	765
		450	730	—	—
		500	495	445	435
		550	440	—	—
3	ЭИ-415	450	520	—	500
		500	490	—	420
		550	350	—	320
4	ЭИ-698	550	—	890	790
		650	—	600	500
		700	—	440	400
		750	—	370	230
5	Waspaloy	650	770	—	600
		730	500	—	370
		815	280	—	170
		870	160	—	120
6	Udimet 700	650	—	—	703
		815	410	—	300
		870	290	—	196
		982	117	—	55
7	MAR-M246	760	700	—	620
		815	560	—	460
		871	430	—	300
		982	190	—	130
		1038	134	—	—

Закінчення дод. 1

№ вар.	Матеріал	Температура, °C	σ_{100}	σ_{500}	σ_{1000}
			МПа		
8	ЖС6-К	700	780	—	—
		750	650	—	560
		800	520	—	410
		900	320	—	175
		950	210	—	130
		1000	155	—	78
9	ЖС6У-РК	900	350	—	250,0
		1000	170	—	100
		1100	—	—	—
10	ЖС26-ВНК	900	400	305	280
		1000	200	140	120
		1100	90	45	55
11	ЖС32-ВНК <001>	900	500	373	327
		1000	240	172	150
		1050	175	123	106
		1100	123	88	74
12	ЖС32	900	395	315	280
		1000	210	155	135
		1100	105	75	65
		1150	65	45	35
13	ЖС30 <001>	900	392	309	275
		1000	196	142	123
		1050	128	88	76
		1100	83	54	49
14	ЖС36-ВНК <001>	900	476	383	343
		1000	250	182	123
		1050	186	134	116
		1100	137	98	83
15	ЖС40-НК <001>	900	429	343	314
		1000	235	186	167
		1050	183	137	120
		1100	135	95	79

Побудова діаграми

1. На панелі інструментів *Стандартна* натискають кнопку «Мастер диаграмм» .

2. Тип діаграми: «Точечная».

Вигляд діаграми: крапками (рис. Д.2.1)



Рис. Д.2.1

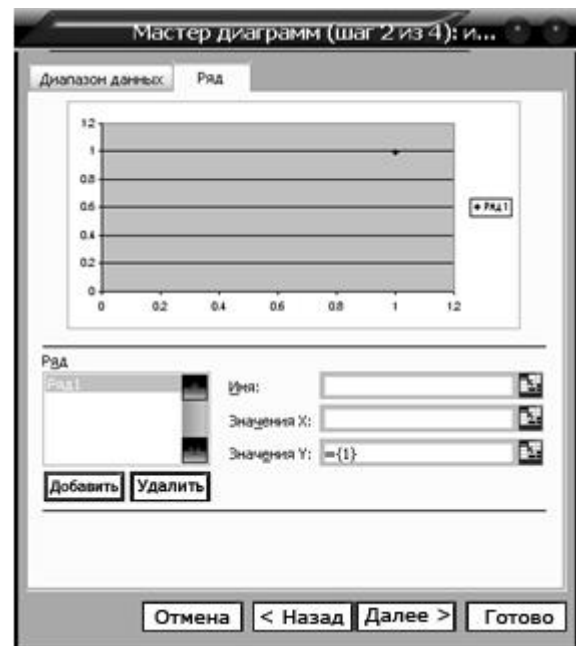


Рис. Д.2.2

Кнопка «Далее».

3. Закладка «Ряд» – натискають кнопку «Добавить» (рис. Д.2.2).

Мишкою виділяють діапазон *значень X* після установлення курсору у відповідне поле, аналогічно заповнюють поле *значень Y* (рис. Д.2.3).

Кнопка «Далее»

4. За бажанням налаштовують зовнішній вигляд діаграми, заповнюючи поля меню «Параметры диаграммы».

Кнопка «Готово».

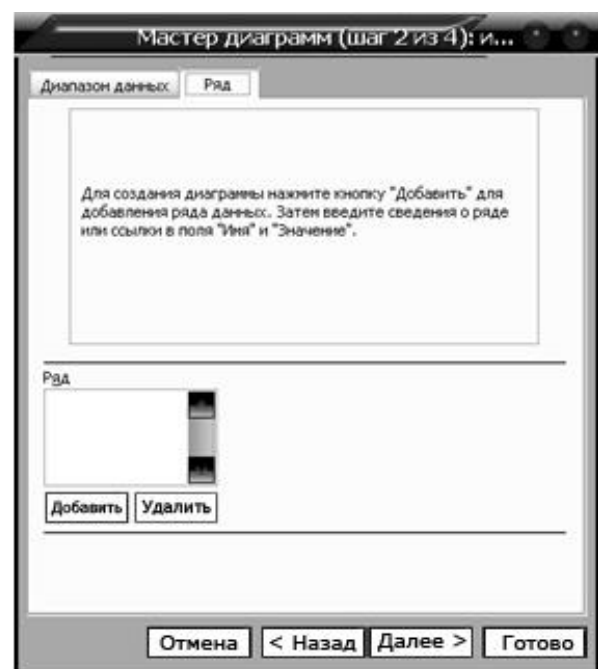


Рис. Д.2.3

Апроксимація даних

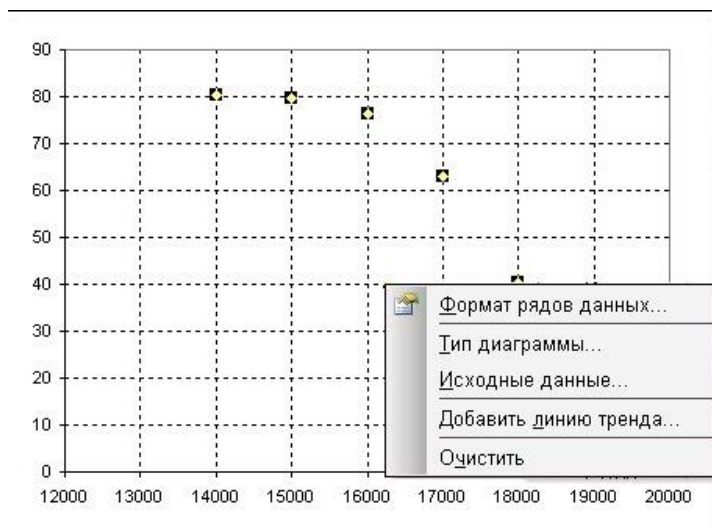


Рис. Д.3.1

1. На діаграмі натисканням лівої кнопки миші виділяють ряд даних, які необхідно апроксимувати.

2. Після натискання правої кнопки миші на виділеному ряді даних з'являються меню, які спливають (рис. Д.3.1). Вибирають команду «Добавить линию тренда».

3. На вкладці «Тип» меню «Линия» тренду вибирають «Полиномиальный»

тип лінії тренду. Ступінь – 3 (рис. Д.3.2).

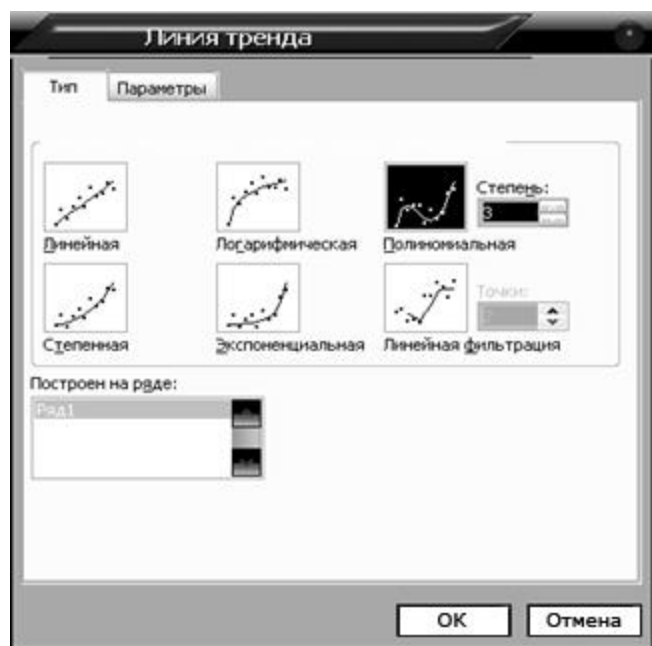


Рис. Д.3.2

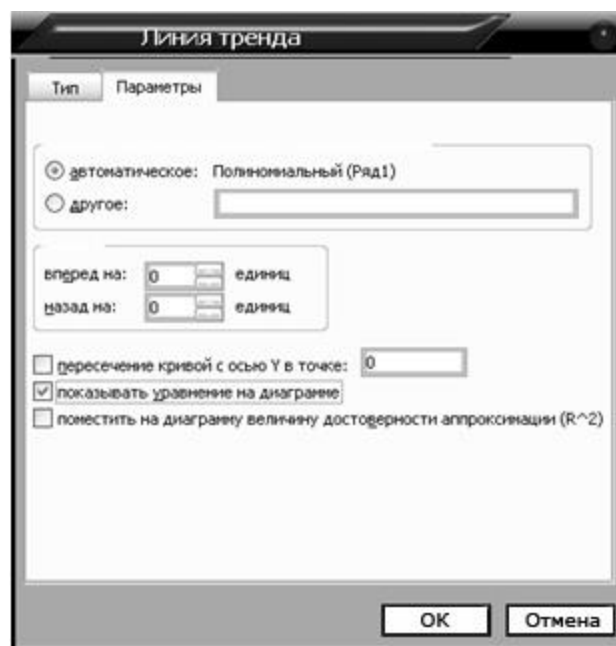


Рис. Д.3.3

4. На вкладці «Параметры» меню «Линия» тренду вибирають пункт «Показывать уравнение диаграммы» (рис. Д.3.3).

Кнопка «ОК».

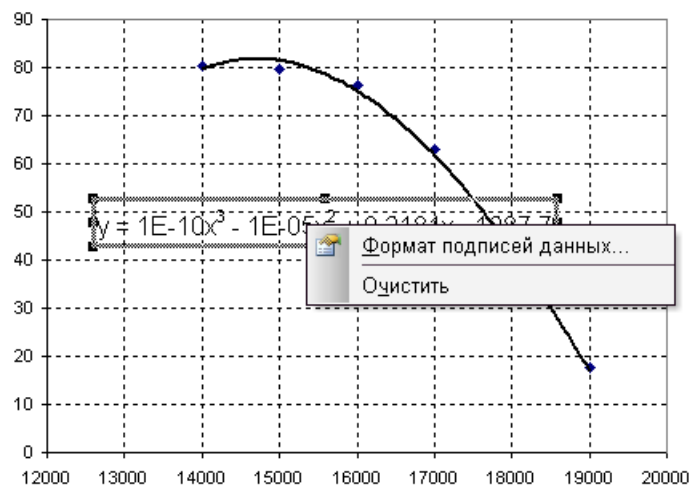


Рис. Д.3.4

5. Натисканням правої кнопки миші у полі рівняння лінії тренду вибрати «*Формат подписей данных*» для змінення формату числа (рис. Д.3.4).

6. Перейти на закладку «Число», у меню «*Формат подписей данных*» вибрати «*Экспоненциальный*», задати число десяткових знаків – 4 (рис. Д.3.5).

Кнопка «OK»

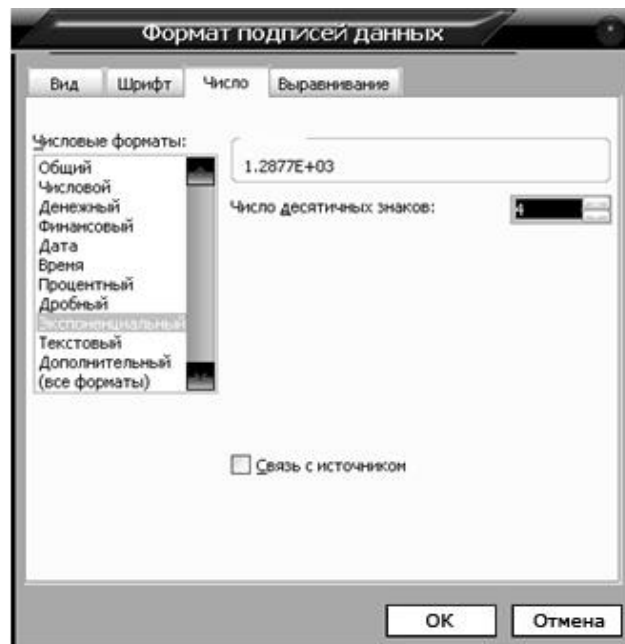


Рис. Д.3.5

ДОДАТОК 4

Експериментальні дані щодо властивостей матеріалу лопатки

Таблиця Д.4.1

Властивості матеріалу ЖС-32

Т, °С	20	600	700	800	900	1000	1050	1100	1150
$\alpha, 10^{-5} 1/^{\circ}\text{C}$	1,24	1,37	1,41	1,45	1,5	1,56	1,61	1,65	1,7
Е, 10^{11} Па	2,06	1,78	1,73	1,67	1,59	1,49	1,41	1,33	1,26
$\sigma_{100^{\circ}}$, МПа	—	—	816	635	395	210	—	105	65
$\psi, \%$	21	11,6	10	8	13	21	23,5	26	26

Модель Ларсона–Міллера для матеріалу ЖС-32:

$$\lg \sigma = 1,4350 \cdot 10^{-13} (P_{\text{л-м}})^3 - 1,8147 \cdot 10^{-8} (P_{\text{л-м}})^2 + 5,4403 \cdot 10^{-4} (P_{\text{л-м}}) - 1,8260$$

Таблиця Д.4.2

Властивості матеріалу ЖС-6

Т, °С	20	500	600	700	800	900	1000	1030	1100
$\alpha, 10^{-5} 1/^{\circ}\text{C}$	1,14	1,25	1,27	1,29	1,32	1,37	1,45	1,54	1,57
Е, 10^{11} Па	2,00	1,73	1,67	1,63	1,51	1,28	1,21	1,14	1,02
$\sigma_{100^{\circ}}$, МПа	—	—	—	780	520	320	155	120	—
$\psi, \%$	6,5	8	7,5	9	5	3	6,5	12	20

Модель Ларсона–Міллера для матеріалу ЖС-6:

$$\lg \sigma = -1,1041 \cdot 10^{-12} (P_{\text{л-м}})^3 + 7,5013 \cdot 10^{-8} (P_{\text{л-м}})^2 - 1,7859 \cdot 10^{-3} (P_{\text{л-м}}) + 17,573$$

Словник термінів

Українська	Російська	English
Безвідмовність	Безотказность	Reliability
Відхилення	Отклонение	Deviation
Втома малоциклова	Усталость малоцикловая	Low cycle fatigue
Границя витривалості	Предел выносливости	Fatigue limit
Границя міцності	Предел прочности	Strength limit
Границя міцності справжня	Предел прочности истинный	True strength limit
Границя пропорційності	Предел пропорциональности	Limit of proportionality
Границя пружності	Предел упругости	Elastic limit
Границя текучості	Предел текучести	Yield stress
Границя текучості умовна	Предел текучести условный	Conventional yield stress
Границя тимчасового опору	Предел временного сопротивления	Ultimate stress
Діаграма деформування	Диаграмма деформирования	Deformation curve
Довговічність	Долговечность	Durability
Живучість	Живучесть (детали)	Survivability
Залишкова деформація	Деформация остаточная	Permanent deformation
Звуження відносно	Сужение относительное	Contraction ratio
Зміцнення анізотропне	Упрочнение анизотропное	Anisotropic hardening
Зміцнення ізотропне	Упрочнение изотропное	Isotropic hardening
Зусилля затягування	Усилие затяжки	Pull-force
Ізотропний матеріал	Изотропный материал	Isotropic material
Інтенсивність напружень	Интенсивность напряжений	Stress intensity
Короткочасні випробування	Испытания кратковременные	Short-term test
Концентратор напружень	Концентратор напряжений	Stress concentrator

Українська	Російська	English
Коефіцієнт інтенсивності напружень	Коэффициент интенсивности напряжений	Stress intensity factor
Крива повзучості узагальнена	Кривая ползучести обобщенная	Generalized creep curve
Критерій	Критерий	Criterion
Міцність	Прочность	Strength
Міцність тимчасова	Прочность временная	Temporal strength
Міцність тривала	Прочность длительная	Long-term strength
Миттєва границя текучості	Предел текучести мгновенный	Current yield stress
Модуль пружності	Модуль упругости	Modulus of elasticity, Young's modulus
Навантаження	Нагружение	Loading
Навантаженість	Нагруженность	Stress loading
Надріз	Надрез	Notch
Напруження	Напряжение	Stress
Напружено-деформований стан	Напряженно-деформированное состояние	Stress-deformed state
Напрацювання	Наработка	Operating time
Натяг	Натяг	Negative allowance
Нестисливий	Несжимаемый	Incompressible
Пластична плинність	Пластическое течение	Plastic yielding
Пластичність	Пластичность	Plasticity
Площадка текучості	Площадка текучести	Elastic range
Пошкодження	Повреждение	Damage
Пошкоджуваність	Повреждаемость	Damaging
Повзучість	Ползучесть	Creep
Подовження	Удлинение	Elongation
Подовження відносно	Удлинение относительное	Specific elongation
Працездатність	Работоспособность (детали)	Operability
Приріст	Приращение	Deviation
Пристосованість	Приспособляемость	Adaptability
Пружність	Упругость	Elasticity

Українська	Російська	English
Розкид	Разброс	Dispersion
Розмах деформацій	Размах деформаций	Amplitude range
Руйнування	Разрушение	Fracture
Релаксація напружень	Релаксация напряжений	Stress relaxation
Ресурс	Ресурс	Lifetime
Січний модуль	Секущий модуль	Secant modulus
Сплав жароміцний	Сплав жаропрочный	Heat resistant alloy
Сталь вуглецева	Сталь углеродистая	Carbon steel
Сталь легована	Сталь легированная	Alloy steel
Сталь маловуглецева	Сталь малоуглеродистая	Mild steel
Статична міцність	Статическая прочность	Static strength
Текучість	Текучесть	Yield
Термопластичність	Термопластичность	Thermoplasticity
Тріщина	Трещина	Crack
Тріщиностійкість	Трещиностойкость	Crack resistance
Узагальнений польотний цикл	Полетный цикл обобщенный	Generalized flight cycle
Час до руйнування	Время до разрушения	Rupture life
Швидкість повзучості	Скорость ползучести	Creep rate
Шийка зразка	Шейка образца	Neck of specimen

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Биргер, И. А. Расчет на прочность деталей машин [Текст] : справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иоселевич. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1993. – 640 с.
2. Гохфельд, Д. А. Механические свойства сталей и сплавов при нестационарном нагружении [Текст] : справочник / Д. А. Гохфельд, Л. Б. Гецов, К. М. Кононов. – Екатеринбург : УрО РАН, 1996. – 408 с.
3. Биргер, И. А. Термопрочность деталей машин [Текст] / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, И. В. Демьянушко. – М. : Машиностроение, 1975. – 455 с.
4. Опір матеріалів [Текст] : підручник / Г. С. Писаренко, О. Л. Квітка, Е. С. Уманський [та ін.]. – 2-ге вид., доп. і переробл. – Київ : Вища шк., 2004. – 655 с.
5. Работнов, Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела [Текст] : учеб. пособие для вузов / Ю. Н. Работнов. – 2-е изд., испр. – М. : Наука, 1988. – 712 с.
6. Коллинз, Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, подтверждение [Текст] / Дж. Коллинз. – М. : Мир, 1984. – 624 с.
7. Серенсен, С. В. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность. Руководство и справочное пособие [Текст] / С. В. Серенсен, В. П. Когаев, Р. М. Шнейдерович. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1975. – 488 с.
8. Колотников, М. Е. Предельные состояния деталей и прогнозирование ресурса газотурбинных двигателей в условиях многокомпонентного нагружения [Текст] / М. Е. Колотников ; под ред. д.т.н., проф. В. М. Чепкина. – Рыбинск : изд-во РГТА, 2003. – 136 с.
9. Броек, Д. Основы механики разрушения [Текст] / Д. Броек. – М. : Высш. шк., 1980. – 368 с.
10. Ресурсное проектирование авиационных ГТД [Текст] / Б. Ф. Балашов, И. А. Биргер, Н. Г. Бычков [и др.] ; под ред. И. А. Биргера. – М. : ЦИАМ, 1990. – 208 с. – (Руководство для конструкторов. – Вып. 1. – Тр. ЦИАМ № 1253).
11. Крикунов, Д. В. Оценка прочностного ресурса деталей ГТД [Текст] : учеб. пособие / Д. В. Крикунов. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т "Харьков. авиац. ин-т", 2005. – 67 с.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ І СКОРОЧЕННЯ	4
Лабораторна робота № 1. ФОРМУВАННЯ МОДЕЛЕЙ ТРИВАЛОЇ МІЦНОСТІ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ ДАНИМИ	7
Лабораторна робота № 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗУМОВЛЕНОЇ ПОВЗУЧІСТЮ РЕЛАКСАЦІЇ НАПРУЖЕНЬ У ЛОКАЛЬНІЙ ОБЛАСТІ ДЕТАЛІ З ЖОРСТКИМИ ДЕФОРМАЦІЙНИМИ ОБМЕЖЕННЯМИ	16
Лабораторна робота № 3. АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ДИСКА ТУРБІНИ В ОБЛАСТІ ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ	26
Лабораторна робота № 4. АНАЛІЗ РЕСУРСУ РОБОЧОЇ ЛОПАТКИ ТУРБІНИ	39
Лабораторна робота № 5. РОЗРАХУНКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ РОБОЧОЇ ЛОПАТКИ ТУРБІНИ АВІАЦІЙНОГО ГТД	59
ДОДАТОК 1	66
ДОДАТОК 2	68
ДОДАТОК 3	69
ДОДАТОК 4	71
ДОДАТОК 5	72
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК	75