

УДК 629.735.0154.0171/018.4-03:620.178.38:513.6

ЛОКАЛІЗАЦІЯ КРИТИЧНИХ ЗОН ПОШКОДЖЕННЯ ЖАРОМІЦНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА РОТОРНИХ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

Кулик М. С., Кучер О. Г., Ковешніков М. О., Дубровський С. С., Петрук Я. А.

Національний авіаційний університет

kucher@nau.edu.ua

У статті розглянуто концепцію локалізації пошкоджуваності зразків жароміцних матеріалів та роторних деталей авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) та енергетичних газотурбінних установок (ГТУ) в умовах термоциклічної роботи. При цьому припускається, що зразки матеріалів працюють на режимах максимально наближених до умов роботи деталей у критичних точках, що лімітують термін служби і ресурс ГТД та ГТУ.

The conception about localization of damaging samples of high-temperature materials rotor details made of them in conditions of thermocyclic work of aviation gas turbine engine (GTE) and power gas turbine plant (GTP) is examined in the article. At the same time it is possible that samples of materials work in conditions which are extremely close to critical parts of details that are being damaged and reduce the service life and re-source of GTE and GTP.

Вступ

Для того щоб виявити й локалізувати зони пошкодження матеріалу, тобто точніше виявити зони накопичення значних (найбільших) деформацій та місце зародження тріщин утоми в роторних деталях ГТД, необхідні знання їх теплового, напруженого та деформованого стану і бажано в режимі безперервного моніторингу.

Аналіз багатьох публікацій на цю тему [1] показує, що досить часто проводяться окремі дослідження теплового або напруженого і деформованого станів зразків матеріалів чи деталей «гарячої частини» ГТД чи вирішуються окремі розрахункові завдання для раннього виявлення та попередження відмов пов'язаних з термоциклічною міцністю і довговічністю деталей. Але в подібних дослідженнях відсутній системний підхід до комплексного вирішення теоретичних, а також важливих практичних завдань за оцінкою ресурсних можливостей деталей гарячої частини ГТД.

Постановка завдання

Основною метою даної роботи є системний підхід, який базується на комплексній оцінці впливу на пошкоджуваний стан зразків матеріалів та деталей, їх теплового, напруженого та деформованого станів матеріалів, які, зрештою, суттєво впливають на стан пошкоджуваності деталей. Кількісне визначення останніх потребує складних та ретельних спеціальних досліджень у режимі моніторингу. Розглянемо їх на прикладі.

Тепловий стан зразків матеріалів. На пошкоджуваність зразків матеріалів та деталей у першу чергу впливає їх тепловий стан. Звісно, що розподіл температури зразків та деталей прямо впливає на теплофізичний стан матеріалу, пов'язаний зі зміною модуля пружності, модуля пропорційності та на його міцність і несучу здат-

розрахунково-експериментальних методів оцінки довговічності матеріалів і роторних деталей ГТД.

Прикладом такого дослідження може бути робота [1]. В цій роботі пропонується метод розрахунку циклічного розподілу температур у зраз-

ках матеріалів на основі розв'язку задачі нестационарної теплопровідності для стержня з внутрішнім джерелом тепла, несиметричними граничними умовами другого роду та неоднорідними початковими умовами. Початковими умовами процесу нагрівання та охолодження є розподіл температури $T(x, 0)$ за довжиною зразка, тобто по осі $x(t = 0)$, який заданий по половині зразка від $-h$ до $+h$, що в відносних координатах від -1 до $+1$. З достатньою мірою точності вони можуть бути описані поліномами другого порядку:

$$\left. \begin{array}{l} \text{для нагрівання: } T_{\text{н}}(x, 0) = b_1^{\text{н}} x^2 + b_2^{\text{н}} x + b_3^{\text{н}}; \\ \text{для охолодження: } T_{\text{ох}}(x, 0) = b_1^{\text{ох}} x^2 + b_2^{\text{ох}} x + b_3^{\text{ох}} \end{array} \right\} (1)$$

де $b_1^{\text{н}}, b_2^{\text{н}}, b_3^{\text{н}}, b_1^{\text{ох}}, b_2^{\text{ох}}, b_3^{\text{ох}}$ — константи, визначені шляхом обробки відповідних експериментальних кривих, наприклад методом найменших квадратів.

Задача нестационарної теплопровідності вирішується для стержня довжиною $2h$, що в відносних координатах ξ від -1 до $+1$, тобто $2h = 2\xi = 2$ (рис. 1), в середині якого діють рівномірно розподілені позитивні джерела тепла (згідно з

законом Джоуля—Ленца $q_0 = \rho \left(\frac{I}{F} \right)^2$, де I — сила

струму в ланцюгу нагріву зразка; F — площа його перерізу; ρ — питомий електроопір матеріалу (що є від'ємним під час охолодження), а з зовнішніх поверхонь відбувається відвід тепла (q_1 і q_2) за експоненціальними функціями часу такого вигляду:

при нагріванні:

$$\left\{ \begin{array}{l} q_1^{\text{н}} = q_{01}^{\text{н}} \left[1 - \exp(-m_1^{\text{н}} \cdot t) \right] 2h; \\ q_2^{\text{н}} = q_{02}^{\text{н}} \left[1 - \exp(-m_2^{\text{н}} \cdot t) \right] 2h; \end{array} \right.$$

© М.С. Кулик, О.Г. Кучер, М.О. Ковешніков, С.С. Дубровський, Я.А. Петрук, 2009

ність, особливо в умовах термоциклічних випробувань. Кількісні дослідження при цьому можуть слугувати доброю основою для

при охолодженні:

$$\begin{cases} q_1^{ox} = q_{01}^{ox} [1 - \exp(-m_1^{ox} \cdot t)] 2h; \\ q_2^{ox} = q_{02}^{ox} [1 - \exp(-m_2^{ox} \cdot t)] 2h, \end{cases} \quad (3)$$

(2) де $2h = 2\xi = 2$; t — час (сек.);
 $m_1^{ox}, m_2^{ox}, m_1^h, m_2^h$ — параметри експоненти, що характеризують інтенсивність відведення тепла,

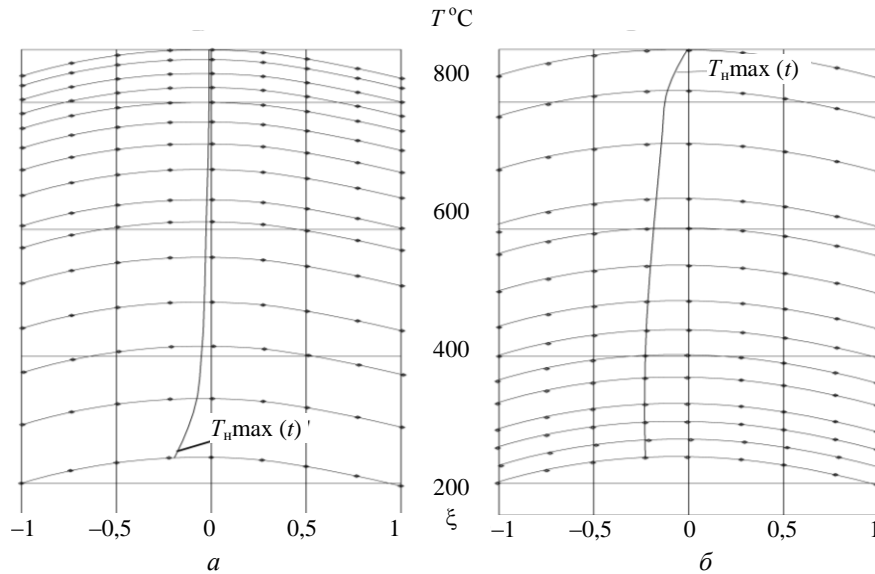


Рис. 1. Експериментальні (точки) та розрахункові (лінії) посекундного розподілу температури за довжиною зразків із сплаву ЕП99ВД при нагріванні (а) та охолодженні (б)

а $q_{01}^h, q_{01}^{ox}, q_{02}^h, q_{02}^{ox}$ — щільності теплових потоків, що відводяться з торців зразка в стані рівномірного теплового режиму (тобто при $t \rightarrow \infty$). При цьому вхідні співвідношення (2) величини q_{01}^h, q_{02}^h повинні задовольняти рівність

$$q_{01}^h + q_{02}^h = q_0 = \rho \left(\frac{I}{F} \right)^2, \quad (4)$$

що відображає баланс тепла в даній системі при нагріванні. Співвідношення (2) і (3) визначають нестационарні несиметричні граничні умови 2-го порядку, а неоднорідні початкові умови задані функціями (1). У математичній постановці крайова задача теплопровідності для нагрівання зразка в безрозмірній формі має наступний вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \theta_n}{\partial \xi^2} + 1 &= \frac{\partial \theta_n}{\partial F_0}, \quad -1 < \xi < 1, F_0 > 0; \\ \theta_n(1, 0) &= \beta_1^h \xi^2 + \beta_2^h \xi + \beta_3^h; \\ -\frac{\partial \theta_n}{\partial \xi}(1, F_0) &= q_1^h [1 - \exp(-Pd_1^h \cdot F_0)], \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

де $\theta_n = \frac{\lambda T}{q_0 h^2}$ — безрозмірна функція

температури ($\theta_n = \theta_n(\xi, F_0), T = T(x, t)$); $\xi = \frac{x}{h}$ —

безрозмірна координата; $F_0 = \frac{at}{h^2}$ — критерій

Фур'є; $Pd_1^h = \frac{m_1^h h^2}{a}, Pd_2^h = \frac{m_2^h h^2}{a}$ — критерії

Предводителя для відповідних границь стержня; λ — коефіцієнт теплопровідності матеріалу зразка; a — коефіцієнт температуропровідності;

$$\bar{q}_1^h = \frac{2q_{01}^h}{q_0}; \bar{q}_2^h = \frac{2q_{02}^h}{q_0}; \beta_1^h = \frac{\lambda b_1^h}{q_0}; \beta_2^h = \frac{\lambda b_2^h}{q_0 h}; \beta_3^h = \frac{\lambda b_3^h}{q_0 h^2}.$$

Задача (2) розв'язана в цій роботі методом перетворення Лапласа з використанням теореми розкладу Вашенко—Захарченко [2] для переходу від відображення функції температури до оригіналу (5). Отримане розв'язок має вигляд:

$$\begin{aligned} \theta_n(\xi, F_0) &= \frac{1}{6} + \frac{\beta_1^h}{3} + \beta_3^h + \frac{q_1^h}{2Pd_1^h} + \frac{q_2^h}{2Pd_2^h} + (1 - q_1^h)\xi - \\ &- \frac{\xi^2}{2} - \frac{q_1^h \cos[(\xi + 1)\sqrt{Pd_1^h}]}{\sqrt{Pd_1^h} \sin(2\sqrt{Pd_1^h})} \exp(-Pd_1^h F_0) + \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \left[\frac{q_1^h}{Pd_1^h - \mu_n^2} + \frac{q_2^h}{Pd_2^h - \mu_n^2} + \right. \\ &+ \frac{2}{\mu_n^2} (1 + 2\beta_1^h) \cos(\mu_n \xi) \exp(-\mu_n^2 F_0) + \\ &- \left. \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \left[\frac{q_1^h}{Pd_1^h - \nu_n^2} - \frac{q_2^h}{Pd_2^h - \nu_n^2} - \right. \right. \\ &- \left. \left. \frac{4}{\nu_n^2} (1 - q_1^h - \beta_2^h) \sin(\nu_n \xi) \exp(-\nu_n^2 F_0) \right], \end{aligned} \quad (6)$$

де $\mu_n = n\pi$; $\nu_n = (n - 0,5)\pi, n = 1, 2, \dots$

Необхідні для розрахунку за формулою (6) величини відносних теплових течій q_1^H і q_2^H можна знайти за відомою з досліду координатою (ξ_{\max}^H) максимуму температури $T_{\max}(t)$ зразка в кінці нагрівання ($t_H = 13$ с) та ($F_0 = F_{0H}$), яка повинна відповідати умові $\frac{\partial \theta_H}{\partial \xi}(\xi_{\max}^H, F_0) = 0$.

$$\bar{q}_1^H = \frac{1 - \xi_{\max}^H + 2 \frac{\sin[(1 + \xi_{\max}^H)\sqrt{Pd_1^H}]}{\sin(2\sqrt{Pd_1^H})} \exp(-Pd_1^H F_{0H})}{1 + \frac{\sin[(1 + \xi_{\max}^H)\sqrt{Pd_1^H}]}{\sin(2\sqrt{Pd_1^H})} \exp(-Pd_1^H F_{0H}) + \frac{\sin[(1 - \xi_{\max}^H)\sqrt{Pd_2^H}]}{\sin(2\sqrt{Pd_2^H})} * \exp(-Pd_2^H F_{0H})}. \quad (7)$$

Для процесу охолодження зразка якщо взяти, що в ньому діють від'ємні джерела тепла постійної інтенсивності q_0 , а граничні і початкові умови задані функціями (3) і другим виразом (1), то крайова задача теплопровідності буде аналогічна задачі (5). За таких передумов функцію температури зразка можна легко знайти на основі розв'язання (6) та відомої рівності:

$$\theta_{ox}(\xi, F_0) = \theta_H(\xi, F_0) - 2F_0. \quad (8)$$

Розрахунок за формулою (8) можна виконати, використовуючи у співвідношеннях (6) і (7) безрозмірні комплекси, що відповідають процесу охолодження зразка.

У згаданому дослідженні (рис. 1) наведені експериментальні точки та розрахункові лінії двох експериментів посекундних розподілів температури за довжиною зразків матеріалів (які можуть дати максимальну похибку всього до 6 %, для всіх зразків матеріалів та режимів випробування). Таким чином розрахунковий метод [1] може бути рекомендований у практиці досліджень термомеханічної втомленості

Звідси після диференціювання функції (6) з використанням рівності

$$\bar{q}_1^H + \bar{q}_2^H = 2$$

еквівалентного рівнянню (4) маємо:

жароміцних матеріалів та деталей ГТД. Ці розрахунково-експериментальні методи можуть бути корисні також для аналізу кінетики деформованого стану зразків при їх дослідженнях. Крім того, з рис. 1 видно, що $T_{\max}(t_H)$ та $T_{\max}(t_{ox})$ при термоциклічному випробуванні міститься в зоні координат ξ зразків від 0 до -0,25. При цьому напружений стан матеріалів і деталей ГТД відіграє не менш важливу роль.

Напружений стан зразків матеріалів. Поздовжній осьовий напружений стан у праці [3] реєструвався за допомогою тензорезисторів динамометричної тяги та шлейфового осцилографа. Така реєстрація термомеханічних напружень $\sigma_{TM}(t)$ виконувалася на експериментальній установці [4], що забезпечувала стабільність параметрів циклу термомеханічних напружень.

Усього було випробувано 5 типів матеріалів деталей на найбільших режимах їхньої роботи (табл. 1).

Таблиця 1

Програма та режими випробувань зразків на термоциклічну довговічність

Матеріал	$T_{\min} \leftrightarrow T_{\max}$	№ режиму	Кількість зразків	σ_{CT} , МПа	$\Delta\sigma_{TM}$	σ_m
ЖС6К	150↔800 °С	1	21	var	0	σ_{CT}
		2	36	0	$\Delta\sigma_T$	0
		3	15	250	var	var
		4	17	370	var	var
		5	17	470	var	var
	250↔900 °С	6	62	var	0	σ_{CT}
		7	58	0	$\Delta\sigma_T$	0
		8	15	50	var	var
		9	17	100	var	var
	350↔1000 °С	10	43	var	0	σ_{CT}
		11	58	0	$\Delta\sigma_T$	0
		12	15	50	var	var
		13	15	100	var	var
		14	17	230	var	var
		15	15	-130	var	var
ЖС6У	350↔1000 °С	16	28	var	0	σ_{CT}
		17	17	0	$\Delta\sigma_T$	0
		18	17	100	var	var

Закінчення табл. 1

Матеріал	$T_{\min} \leftrightarrow T_{\max}$	№ режиму	Кількість зразків	σ_{CT} , МПа	$\Delta\sigma_{TM}$	σ_m
E1437Б	250↔900 °С	19	28	var	0	σ_{CT}
		20	18	0	$\Delta\sigma_T$	0
		21	16	100	var	var
EP99ВД	250↔900 °С	22	24	var	0	σ_{CT}
		23	15	0	$\Delta\sigma_T$	0
		24	17	100	var	var
X18H10T	100↔750 °С	25	27	var	0	σ_{CT}
		26	21	0	$\Delta\sigma_T$	0
		27	15	50	var	var

Реєстрація виконувалася для всіх зразків матеріалів та режимів згідно прийнятої програми дослідження, що були вибрані згідно рекомендацій ВІАМ, ЦІАМ та добре співвідносяться з режимами роботи конструктивних елементів «гарячої частини» авіаційних ГТД. Для аналізу напруженого стану достатньо розглянути зміну напружень у межах одного циклу навантаження (рис. 2, а).

На рис. 2, а, як приклад, показана зміна термомеханічних напружень при асиметричному

$\sigma_{1TM}(t)$ та симетричному $\sigma_{2TM}(t)$ циклах для режиму термоцикування $T(t)$ зразка сплаву ЖС6К. $T_{\min} \leftrightarrow T_{\max} = 350 \leftrightarrow 1000$ °С.

За допомогою таких циклограм для кожного режиму випробувань були визначені розмахи термомеханічних напружень $\Delta\sigma_{TM}$ та середні напруження циклу σ_m , значення яких були прийняті у вигляді параметрів для характеристик довговічності сплавів, що випробовувалися на зазначеній установці [3].

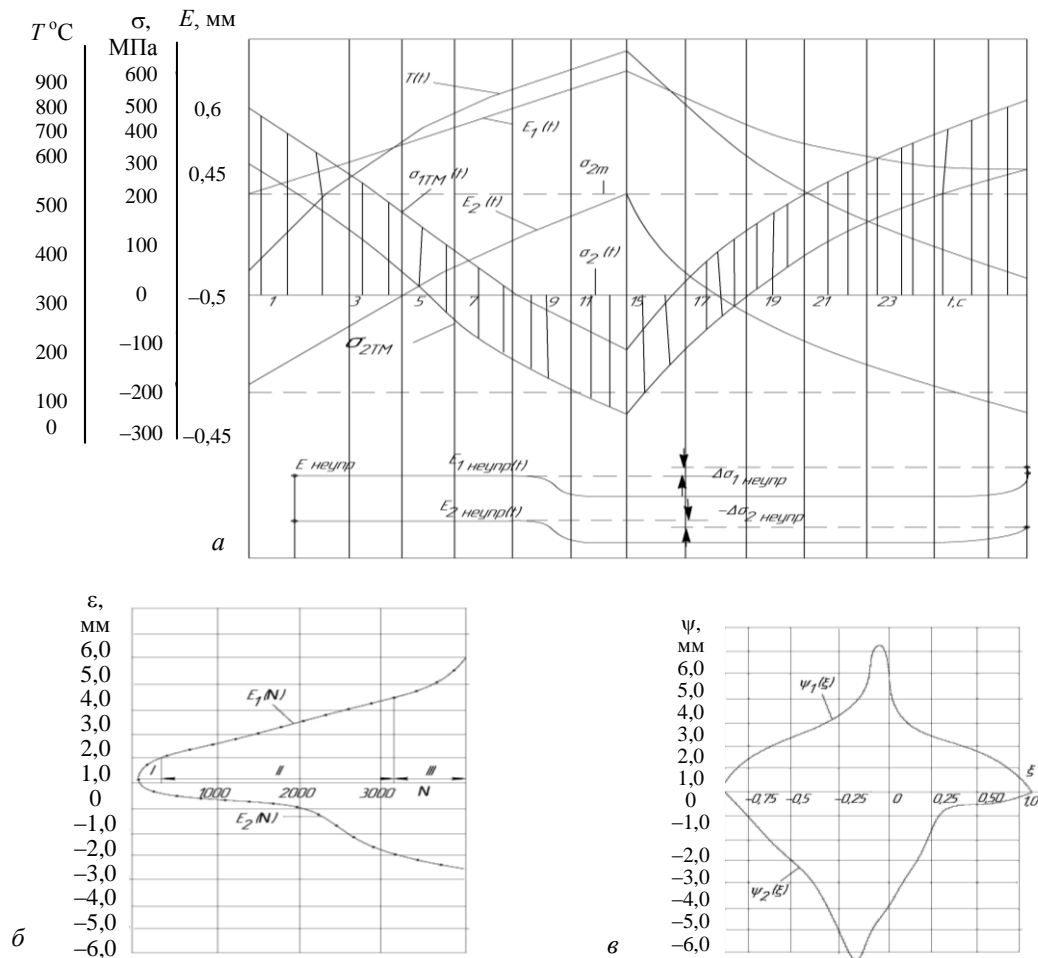


Рис. 2. Зміна характеристик теплового, пружного та деформованого станів у процесі термоциклічних випробувань:

- а — зміна температури, напружень та деформацій у процесі циклу випробувань;
- б — зміна поздовжніх (ϵ , мм) деформацій зразка залежності від числа циклів N ;
- в — зміна поперечних (ψ , %) деформацій за довжиною зразка

З рис. 2, *a* видно, що графіки залежності термомеханічних напружень за часом $\sigma_{1TM}(t)$ та $\sigma_{2TM}(t)$ мають монотонний характер та близькі до експоненціальних, що оправдовує їх вибір для апроксимації [3]. Крім того, згідно зі згаданої програми (табл. 1 [3]), сплав ЖС6К був випробуваний на кількох температурних режимах, причому на кожному з рівнів термомеханічних напружень випробуванням піддавались більш ніж 10—15 зразків.

Випробування більш пластичних конструкційних матеріалів (ЖС6У, ЕП99ВД, ЕІ437Б та 1Х18Н9Т) були проведені за схемою термомеханічного навантаження в позитивній ділянці дії напружень, причому на кожному рівні випробувано не менше 5 зразків. Усього за наведеною програмою було випробувано (до руйнування) 659 зразків матеріалів. Однак прийнятий в установці [4] спосіб термоциклічного навантаження зразків матеріалів характерний значною зміною теплових деформацій зразків матеріалів, а також деформацій під дією термоциклічних напружень, як упродовж одного циклу випробувань, так і всього часу випробувань до руйнування зразків матеріалів.

Крім того, із-за нерівномірності розподілу температури вздовж зразків матеріалів має місце нерівномірність розподілу накопичених пластичних деформацій, як вздовж зразків, так і в поперечному вимірі. Тому відмічені обставини в цій роботі привели до необхідності більш детального дослідження деформованого стану зразків матеріалів в процесі випробувань.

Деформований стан зразків матеріалів, наведений на рис. 2, *a* характеризується зміною по довжині зразків матеріалів деформаціями розтягування $\varepsilon_1(t)$ та стиску $\varepsilon_2(t)$ упродовж одного циклу випробувань для двох відмічених режимів термомеханічного навантаження змінними напруженнями $\sigma_{1TM}(t)$ та $\sigma_{2TM}(t)$. У нижній частині рис. 2, *a* показані схеми накопичення непружних деформацій у циклі (+ $\Delta\varepsilon_1$ непр. та - $\Delta\varepsilon_2$ непр.), з котрих слідує, що для циклу термомеханічних напружень $\sigma_{1TM}(t)$ з позитивним середнім напруженням (+ σ_m) та з коефіцієнтом асиметрії $r = -0,217$ характерне накопичення непружних деформацій розтягування зразка (+ $\Delta\varepsilon_1$ непр.), а з симетричним циклом навантаження $\sigma_{2TM}(t)$ (тобто $\sigma_m = 0$ та $r = -1$) — має місце накопичення деформацій стиснення (- $\Delta\varepsilon_2$ непр.). З цього випливає висновок, що в діапазоні коефіцієнтів асиметрії циклу навантаження від -0,25 до -1 (-0,25 > r > -1) повинен існувати режим напруження, за якого не накопичуються чи майже не накопичуються, знакозмінні залишкові деформації, що є дуже важливим з точки зору довговічності матеріалів. Механізм накопичення деформацій розтягування та стиснення до руйнування зразків малопластичних матеріалів (ЖС6К) показаний на рис. 2, *b*.

З нього видно, що характер змін поздовжніх деформацій $\varepsilon_1(N)$ та $\varepsilon_2(N)$ залежно від числа циклів N має подібний до кривих повзучості матеріалів три характерні ділянки: початковий несталий період I («пристосування» чи «приробітку»); періоди накопичення деформації з постійними швидкостями II («роботи матеріалів») та період інтенсивного росту деформацій перед руйнуванням III. Подібний характер, можливо мають, матеріали роторних деталей «гарячої частини» ГТД, що працюють у подібних режимах термомеханічного навантаження. Якби була можливість для цих деталей в умовах хоча б дослідної експлуатації виконувати подібний моніторинг накопичення непружних деформацій, то за їх різким зростанням на початку III періоду можна було робити висновки про настання часу руйнування деталей, тобто проводити більш достовірну оцінку технічного стану роторної деталі за даним деформаційним критерієм. Цей аналіз у наш час можна проводити різними методами, наприклад, акустичної емісії.

Дослідження розподілів поперечних остаточних деформацій (ψ , %) за довжиною зразка (рис. 2, *b*) після їх руйнування (в кінці III періоду) показали, що максимальні деформації накопичуються в середній частині зразків матеріалів, де переважно діють максимальні температури та циклічні термомеханічні напруження, що вони значною мірою локалізуються в тій самій зоні, в тій самій раніше згаданій чверті від середини зразка (-0,25...0). Детальніші та чисельніші дослідження були проведені в цій роботі за всіма матеріалами, як менш пластичних (ЖС6К, ЖС6У), так і більш пластичних (ЕІ437Б, ЕП99ВД, 1Х18Н9Т) на вищезгаданих режимах.

На рис. 3, для прикладу, показані розподіли відносних поперечних деформацій звуження зразків пластичних матеріалів (ψ , %), накопичених до моменту руйнування залежно від розподілу температури та діючих термомеханічних напружень позитивних рівнів асиметрії. З рис. 3 видно, що найбільші деформації накопичуються в середній частині зразка, а саме в зоні першої чверті (-0,25) від середини (0) осі симетрії зразка, але ближче до верхнього захвату (ВЗ), оскільки охолодження завжди йде від нижнього захвату (НЗ). Локалізація деформацій та пошкоджень матеріалу завжди відмічається в зоні дій максимальних температур і напружень, але розрив зразків припадає на зону дії лише максимальних температур як при їх нагріванні, так і при охолодженні (див. заштриховані зони), але завжди в точках найбільш накопичених до моменту розриву деформацій.

На рис. 4, також для прикладу, наведено розподіл відносних поперечних деформацій звуження (та стовщення) менш пластичних матеріалів ЖС6К та ЖС6У, випробуваних при різних рівнях асиметрії циклу навантажень та

параметрів циклічного термомеханічного навантаження (див. криві 1, 2, 3, 4, 5, 6). На цьому прикладі ми бачимо локалізацію значно менших (на порядок) відносних поперечних деформацій також строго в зоні (від 0 до $-0,25$) циклічної дії максимальних температур циклу ($T_{\max}(t)$) з максимальним пошкодженням та розривом зразків матеріалів точно в зоні дій максимальних температур та максимальних, на той момент, термомеханічних напружень $\sigma_{\max \text{ тм}}(t)$.

Висновки

1. Упровадження методів дослідження теплового, навантаженого та деформованого станів може бути корисним при впровадженні системи моніторингу дослідження станів матеріалів і деталей та визначення їх ресурсних можливостей проектування деталей ГТД прогнозованого строку служби.

2. Розглянута програма досліджень може бути доповнена за рахунок нових жароміцних матеріалів і розширення методів їх випробовування на строк служби в термоциклічних умовах з урахуванням новітніх технологій.

3. Необхідно дослідити вплив асиметрії циклу термомеханічних навантажень матеріалів на довговічність з метою виявлення оптимальних режимів роботи матеріалів і деталей зі значно більшими ресурсами.

4. Виявлена закономірність накопичення деформацій та їх строго локалізація в зоні дії максимальних температур і термомеханічних напружень потребує практичного свого підтвердження (за рахунок моніторингу) в реальних деталях «гарячої частини» ГТД за умови ідентичності параметрів термоциклічного впливу та термомеханічного навантаження.

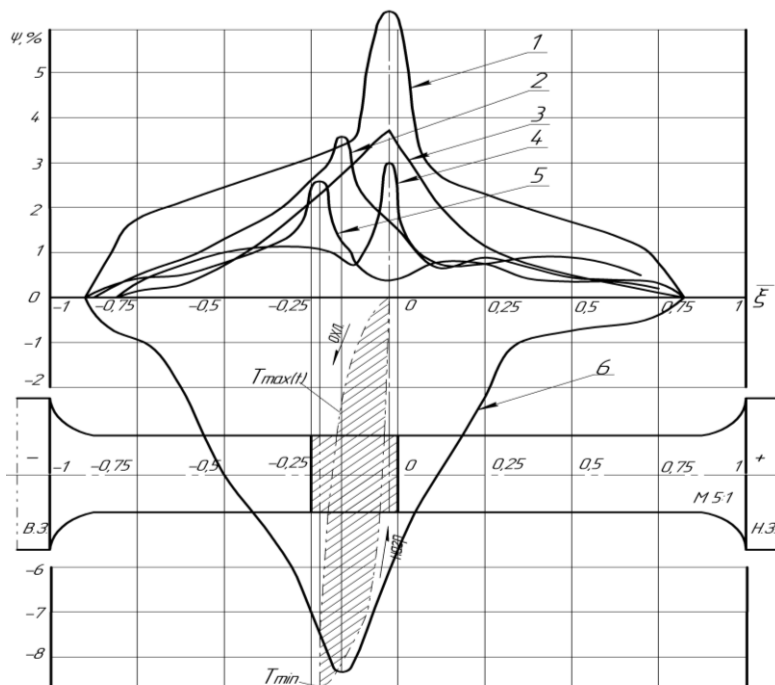


Рис. 3. Розподіл відносних поперечних деформацій звуження вздовж зразків, накопичених до моменту руйнування залежно від посекундного розподілу температури та діючих циклічних термомеханічних напружень позитивних рівнів асиметрії:
 1 — E1437Б, $\sigma_{\text{ст}} = 302$ МПа;
 2 — E1437Б, $\sigma_{\text{ст}} = 177$ МПа;
 3 — E1437Б, $\sigma_{\text{ст}} = 95,6$ МПа;
 4 — E1437Б, $\sigma_{\text{ст}} = 177$ МПа;
 5 — EP99ВД, $\sigma_{\text{ст}} = 103$ МПа,
 $\Delta\sigma_{\text{тм}} = 364$ МПа

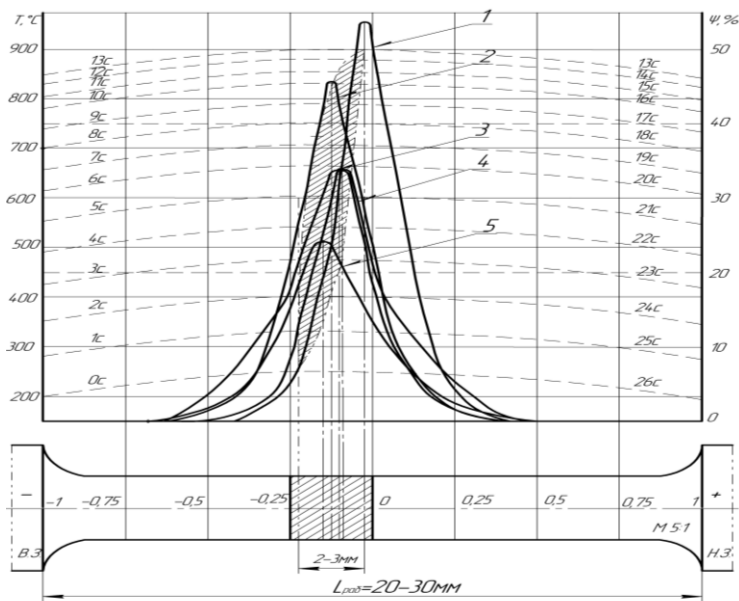


Рис. 4. Розподіл відносних поперечних деформацій вздовж зразків, накопичених до моменту руйнування під дією циклічних температур $T_{\max}(t)$ термомеханічних напружень різних рівнів асиметрії:

- 1 — ЖС6У, $\sigma_{ст} = 150$ МПа, $\Delta\sigma_{ТМ} = 430$ МПа;
- 2 — ЖС6К, $\sigma_{ст} = 418$ МПа, $\Delta\sigma_T = 0$;
- 3 — ЖС6У, $\sigma_{ст} = 418$ МПа, $\Delta\sigma_T = 0$;
- 4 — ЖС6К, $\sigma_{ст} = 150$ МПа, $\Delta\sigma_T = 640$ МПа;
- 5 — ЖС6К, $\sigma_{ст} = -130$ МПа, $\Delta\sigma_T = 605$ МПа;
- 6 — ЖС6К, $\sigma_{ст} = 250$ МПа, $\Delta\sigma_T = 265$ МПа;

ЛІТЕРАТУРА

1. Ветров А.Н. Исследование циклических температурных полей в образцах, испытываемых на термоусталость / А.Н. Ветров, Н.А. Ковешников, А.Г. Кучер. — К.: Проблемы прочности, 1989. — № 9. — С. 36—41.
2. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. — М.: Высш. шк., 1967. — 599 с.
3. Лозицкий Л.П. Результаты исследования тер-

моциклической долговечности жаропрочных материалов при асимметричном термомеханическом нагружении / Л.П. Лозицкий, А.Н. Ветров, Н.А. Ковешников. — К.: Проблемы прочности, 1980. — № 4. — С. 49—53.

4. А.С. 873022 М. кл.³ G01 № 3/60. Установка для испытаний материалов на термомеханическую усталость / Л.П. Лозицкий, А.Н. Ветров, Н.А. Ковешников; опубл. в Б.И., 1981 № 38.

Стаття надійшла до редакції 11.02.09