

УДК 629.735.018.4-03.03(045)

ВПЛИВ АСИМЕТРІЇ ЦИКЛУ ТЕРМОМЕХАНІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ ЖАРОМІЦНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ТЕРМОЦИКЛІЧНИХ ВИПРОБУВАННЯХ

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

Національний авіаційний університет
м. Кривий Ріг

kucher@nau.edu.ua

Розглянуто питання ресурсних можливостей жароміцних матеріалів газотурбінних двигунів в еквівалентних та прискорених термоциклічних випробуваннях. Наведено результати дослідження впливу асиметрії циклу з визначенням оптимального термомеханічного навантаження, за якого термоциклічна довговічність буде близькою до максимально можливої.

Resource abilities of heatproof materials of gas-turbine engines in the equivalent and speed-up thermocyclic tests are considered in the article. The research on cycle skewness with determination of optimal thermomechanical loading at which thermocyclic durability of material will be close to maximal possible are presented.

Постанова проблеми

Створення потужних двигунів та забезпечення при цьому високої їх надійності та безпеки польоту ґрунтується на розрахунках за методами, в основу яких покладено експериментальні характеристики термоциклічної довговічності жароміцних матеріалів деталей «гарячої частини», що лімітують ресурс ГТД. Для визначення домінуючих факторів та зменшення їх впливу на вичерпання довговічності деталей ГТД необхідно проведення комплексних досліджень теплового, напруженого та деформованого стану матеріалів і деталей, виявлення механізму пошкоджуваності матеріалу та деталі в різних умовах термоциклічного навантаження, тобто виявлення оптимальних рівнів термомеханічного навантаження з погляду найбільшої довговічності матеріалів.

Аналіз досліджень і публікацій.

Аналіз досліджень довговічності та пошкоджуваності матеріалу елементів конструкцій в умовах, максимально наближених до експлуатаційних, знайшов відображення в працях С. В. Серенсена, Г. С. Писаренка, Л. П. Лозицького, Б. О. Грязнова, Г. М. Третьяченка, В. Т. Троценка. В Інституті проблем міцності та Інституті механіки НАН України створено експериментальну базу й розроблено методи моделювання еквівалентних станів матеріалу натурних елементів конструкцій. Нагромаджено значний обсяг інформації про закономірності виникнення й поширення тріщин термічної втоми за різних програм термічного навантаження. Звернемо увагу на праці присвячені експериментальним і розрахунковим методам оцінки, що ґрунтуються на наближених методах урахування напруженого стану елемента конструкції шляхом включення ряду чинників, властивих визначеному виду навантаження та фізико-механічним властивостям матеріалу. Різні аспекти та багатофакторність підходів знайшли відображення в працях Ю. Ф. Баландина [1], С. В. Серенсена [2], Л. Б. Гецова [3], Б. Г. Грязно-

ва [4], Г. Н. Третьяченка [5; 6; 7], Д. С. Еленевського [8], Л. Ф. Кофіна [9], С. С. Менсона [10], D. R. Miller [11], В. Н. Киселевського [12], Р. А. Дульнева, М. Г. Кабелевського, А. В. Прокопенка, В. Т. Троценка, А. О. Чернявського, К. Kōkini, Н. Y. Lee, R. M. Pedrazzoli, M. O. Speidel, D. A. Wagner та ін.

Але питанням оцінки термоциклічної довговічності в умовах асиметричного термомеханічного навантаження приділено ще недостатньо уваги, хоча такий вид навантаження в ряді випадків є визначальним. З появою нових матеріалів свого подальшого дослідження потребують розрахунково-теоретичні залежності для визначення довговічності матеріалів і деталей у певних умовах навантаження та ще несповна відпрацьованими є єдині (стандартні) методи випробувань матеріалів, способи та пристрої для навантаження, а також методи обробки й подання результатів експериментальних досліджень.

Постановка завдання

Завдання дослідження поведінки матеріалів у локальних зонах, відповідальних за довговічність матеріалу деталей у термоциклічних умовах навантаження з наперед заданою асиметрією циклу, є актуальним. Таким чином, основним завданням дослідження можна вважати виявлення ролі знакозмінних деформацій матеріалів у нагромадженні деформацій одного знаку (тобто ролі асиметрії циклу навантаження) та у вичерпанні ресурсних можливостей матеріалів при термоциклічних випробуваннях.

Мета дослідження

Метою — дослідження впливу асиметрії циклу термомеханічного навантаження на степінь пошкоджуваності матеріалів, тобто на нагромадженні однонакових пластичних деформацій.

Методи комплексного дослідження жароміцних матеріалів

Зважаючи на концепцію комплексного дослідження теплового, напруженого та деформова-

ного станів зразків матеріалів, яка запропонована у попередній статті [1], у цьому дослідженні також приділено достатню увагу розробці методів для якісної і кількісної оцінки цих станів та розробці відповідних висновків і практичних рекомендацій.

Для дослідження обрані як традиційні (ЖС6К, ЖС6У, ЕІ437Б, ЕП99вд, Х18Н10Т), так і нові жароміцні матеріали (ВЖЛ12-Е, ЖС26-ВІ, ЖС32ВІ та ЧС104) характеристики довговічності

яких в умовах комплексного термомеханічного навантаження майже відсутні.

Режими випробувань та кількість зразків згаданих матеріалів на термоциклічну довговічність наведено в табл. 1.

На кожному з наведених у таблиці режимах було випробувано не менше 15 зразків на 4—5 рівнях напружень. Варіація рівнів напруження (позначена в таблиці символом var), величини яких і вибиралися за умови проведення випробувань на основі $N = 10^4$ циклів.

Таблиця 1

Режими випробувань зразків матеріалів на термоциклічну довговічність

Матеріал	$T_{\min} \leftrightarrow T_{\max}$	Кількість зразків	$\sigma_{ст}$, МПа	$\Delta\sigma_{Т}$	σ_m
ЖС6К	150 ↔ 800 °С	21	var	0	$\sigma_{ст}$
		36	0	$\Delta\sigma_{Т}$	0
		15	250	var	var
		17	370	var	var
		17	470	var	var
	250 ↔ 900 °С	62	var	0	$\sigma_{ст}$
		58	0	$\Delta\sigma_{Т}$	0
		15	50	var	var
		17	100	var	var
	350 ↔ 1000 °С	43	var	0	$\sigma_{ст}$
		58	0	$\Delta\sigma_{Т}$	0
		15	50	var	var
		15	100	var	var
		17	230	var	var
		15	-130	var	var
ЖС6У	350 ↔ 1000 °С	28	var	0	$\sigma_{ст}$
		17	0	$\Delta\sigma_{Т}$	0
		17	100	var	var
ЭИ437Б	250 ↔ 900 °С	28	var	0	$\sigma_{ст}$
		18	0	$\Delta\sigma_{Т}$	0
		16	100	var	var
ЭП99вд	250 ↔ 900 °С	24	var	0	$\sigma_{ст}$
		15	0	$\Delta\sigma_{Т}$	0
		17	100	var	var
Х18Н10Т	100 ↔ 750 °С	27	var	0	$\sigma_{ст}$
		21	0	$\Delta\sigma_{Т}$	0
		15	50	var	var
ЖС26-ВІ	350 ↔ 1000 °С	5-7	var	0	$\sigma_{ст}$
		6	0	$\Delta\sigma_{Т}$	0
		5	50	var	var
		7	100	var	var
ЖС32-ВІ	350 ↔ 1000 °С	5	var	0	$\sigma_{ст}$
		7	0	$\Delta\sigma_{Т}$	0
		6	50	var	var
		5	100	var	var
ВЖЛ12-Е	350 ↔ 1000 °С	5	var	0	$\sigma_{ст}$
		5	0	$\Delta\sigma_{Т}$	0
		5	100	var	var
ЧС-104	105 ↔ 800 °С	5	var	0	$\sigma_{ст}$

Максимальні рівні температур T_{\max} термоциклу вибрано відповідно до верхніх меж діапазонів робочих температур жароміцних матеріалів. Мінімальні рівні температур T_{\min} взяті за умови забезпечення під час випробувань сталості максимального перепаду (розмаху) температур $\Delta T = 650$ °С, який виникає в основних найвідповідальніших конструктивних елементах «гарячої частини» ГТД (див. підкреслено в табл. 2 для лопаток соплових апаратів (л.с.а) і робочих лопаток (р.л) I і II ступенів турбін).

Швидкості нагрівання θ_n і охолодження θ_{ox} зразків матеріалів взяті згідно з методичними рекомендаціями ВІАМ і ЦІАМ для подібних випробувань — 50 °С за секунду.

Обрані для випробувань параметри термоциклу досить добре узгоджуються з реальними значеннями, що мають місце в конструктивних елементах «гарячої частини» різних ГТД, що підкреслено та видно з табл. 2, складеною за даними праць [14—22].

Таблиця 2

Параметри нестационарних теплових режимів конструктивних елементів «гарячої частини» турбін ГТД [14—22]

ГТД	Деталі	Матеріал	$T_{\min}, ^\circ\text{C} \leftrightarrow T_{\max}, ^\circ\text{C}$	$\Delta\sigma, ^\circ\text{C}$	$\theta_n, ^\circ\text{C}$	$\theta_{ox}, ^\circ\text{C}$
АІ-24	л.с.а I ст.	ЖС6К	50,150 \leftrightarrow 550,640	400, 590	33,3	33,3
	л.с.а II ст.	—	60,140 \leftrightarrow 700,750	<u>640, 690</u>	<u>52,5</u>	<u>56,6</u>
АІ-25Т	л.с.а I ст.	ЖС6К	20,160 \leftrightarrow 900	740, 880	75-42	66-34
	л.с.а II ст.	—	20,170 \leftrightarrow 860	<u>690, 840</u>	90-40	53-30
Д-30К	л.с.а I ст.	ЖС6К	20,350 \leftrightarrow 1024,1040	690, 1020	33,3...25	47
	л.с.а II ст.		20,350 \leftrightarrow 913,1000	<u>650, 98</u>	<u>59,4</u>	<u>66...40</u>
	р.л I ст.		20,200 \leftrightarrow 865	<u>665, 845</u>	20...17	36
	р.л II ст.					
Д-18Т	л.с.а I ст.	ЖС32ВІ	20,450 \leftrightarrow 1100,1040	<u>650, 1020</u>	30,3...25	45
	р.л I ст.	ЖС26ВІ	20,350 \leftrightarrow 913,1000		<u>55</u>	<u>60...40</u>
	л.с.а II ст.		20,200 \leftrightarrow 865		20...17	35
Д-436	л.с.а I ст.	ЖС26ВІ	20,350 \leftrightarrow 1024,1040	<u>650, 980</u>	33...25	45
	л.с.а II ст.		20,350 \leftrightarrow 913,1000		<u>45,4</u>	<u>60...40</u>
	р.л II ст.		20,200 \leftrightarrow 865		20...17	35
АЛ-31Ф	л.с.а I ст.	ЖС32ВІ	20,450 \leftrightarrow 1100,1040	<u>650, 845</u>	26,3...25	40
	р.л I ст.		20,450 \leftrightarrow 913,1000		<u>50,4</u>	<u>50...40</u>
ТВ3-117ВМА-СБМ1	р.л I ст.	ЖС26ВІ	50,150 \leftrightarrow 550,640	400, 590	30	30
	л.с.а I ст.		60,140 \leftrightarrow 700,750	<u>640, 690</u>		<u>55</u>
ГТГ-3М	р.л I ст.	ЧС104	20,150 \leftrightarrow 500,640	480, 490	<u>50</u>	<u>60</u>

Дослідження теплового стану зразків жароміцних матеріалів

Як показали вимірювання температурних полів (е діапазоні від 100 до 1100 °С) за допомогою термопар (контактним способом) і пірометра (безконтактним способом), у напівциклах нагрівання зразка значення температур, отримані обома способами, майже збігаються (відхилення не перевищують ± 5 °С). Проте в напівциклах охолодження зразка показники термопар були отримані заниженими (до 50 °С) порівняно з показниками пірометра. Ця обставина обумовлена здебільшого, що при обдуванні потоком повітря

закріплених на поверхні зразка спаї і дроти термопар охолоджуються більшою мірою, ніж його поверхня.

На підставі вищевикладеного можна зробити висновок про те, що вимірювання температурних полів зразків безконтактним способом забезпечує отримання точніших результатів, володіє високою інформативністю і звільнено від істотних недоліків контактного способу. У зв'язку з цим безконтактний спосіб реєстрації температурних полів обраний у цій роботі як основний.

Безконтактний спосіб реєстрації температурних полів заснований на швидкому (протя-

гом 0,15 с) щосекундному скануванні фоторезистором поверхні зразка вздовж його осі та запису сигналів від фоторезистора на екрані двострумєневого запам'ятовуючого електронного осцилографа. На екрані осцилографа електронний промінь поступово креслить щосекундні розподілення температури вздовж зразка, що запам'ятовуються на екрані протягом напівциклів нагрівання чи охолодження. Суміщені на екрані осцилографа температур за напівцикл нагрівання чи охолодження реєструвалися на плівку за допомогою спеціальної фотонасадки. Фотокартки підлягали розпізнаванню за допомогою спеціальних тарировочних графіків. Вони були отримані в роботі для підконтрольних стаціонарних рівнів температур. Тарувальні залежності відхилення електронного променя L , мм від температури T °С зразків досліджуваних різних сплавів подано на рис. 1.

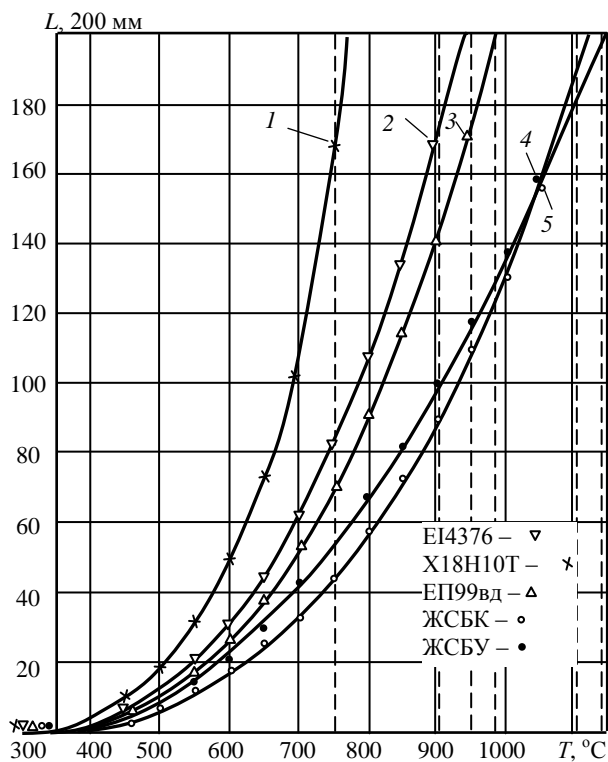


Рис. 1. Тарувальні залежності чутливості L , 200 мм фоторезистора від температури T , °С сплавів X18H10T (1), EI437 (2), EP99Bd (3), ЖС6У (4) та ЖС6К (5)

На цьому рисунку прослідковується цікава, на наш погляд, залежність випромінюючої здатності від жароміцності матеріалів при фіксованих рівнях температури та навпаки, відхилення проміння L на 200 мм показує граничні робочі температури (сплавів) жароміцних матеріалів. Ці тарувальні залежності можуть бути корисними для порівняння жароміцності сплавів та для оцінки їх граничних робочих температур.

Для забезпечення можливості використання ПЕОМ при розшифровуванні знімків температурних полів кожний із графіків (рис. 1) апроксимува-ли за допомогою степенєвої функції вигляду:

$$T = K_1 + K_2 L + K_3 \sqrt{L} + K_4 \sqrt[3]{L}, \quad (1)$$

де коефіцієнти $K_1 - K_4$ визначені методом найменших квадратів та наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Значення коефіцієнтів $K_1 - K_4$ функції (1), що апроксимується

№	Матеріал	K_1	K_2	K_3	K_4
1	X18H10T	350,16	-2,1166	92,248	-79,661
2	EI437B	348,72	-0,83993	63,985	-25,203
3	EP99Bd	347,95	-1,3545	81,981	-45,464
4	ЖС6У	345,57	-0,40319	77,869	-38,089
5	ЖС6К	349,29	-1,5422	96,489	-49,716

Експериментальні точки на температурних полях зразків (точки на кривих розподілу температури) показано на рис. 2). Також на цьому рисунку подано розрахункові криві значення температур, що обчислюються за запропонованими формулами в праці [13].

Як видно з рис. 2, максимальне відхилення розрахункових значень температури від експериментальних не перевищує 6 %. Це свідчить про достатньо високу точність запропонованого методу розрахунку циклічних температурних полів зразків і, отже, про можливість її використання під час практичних розрахунків.

Для компактного подання результатів дослідження температурних полів експериментальні криві розподілу температури по довжині зразків були апроксимовані рівнянням параболи вигляду:

$$T(\zeta) = a_0 + a_1 \cdot \zeta + a_2 \cdot \zeta^2, \quad (2)$$

де $\zeta = \frac{x}{h}$ — відносна лінійна координата, відрахована вздовж осі робочої зони зразка ($-1 \leq \zeta \leq 1$).

Як показали розрахунки, коефіцієнти a_0, a_1, a_2 залежать від часу t процесу зміни температури. Такі залежності можуть бути описані рівнянням (2), але залежно від часу нагрівання t_n та охолодження t_{ox} :

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot t^2; \\ a_1 &= c_0 + c_1 \cdot t + c_2 \cdot t^2; \\ a_2 &= d_0 + d_1 \cdot t + d_2 \cdot t^2. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Коефіцієнти рівнянь (3) $b_0, b_1, b_2, c_0, c_1, c_2, d_0, d_1, d_2$ були розраховані на ПЕОМ методом найменших квадратів. Для їх обчислення використовувалися результати розшифровки графіків температурних полів зразків. Значення коефіцієнтів для всіх досліджених матеріалів і режимів термоциклювання наведено в табл. 4, яка є компакним узагальненням експериментальних досліджень температурних полів.

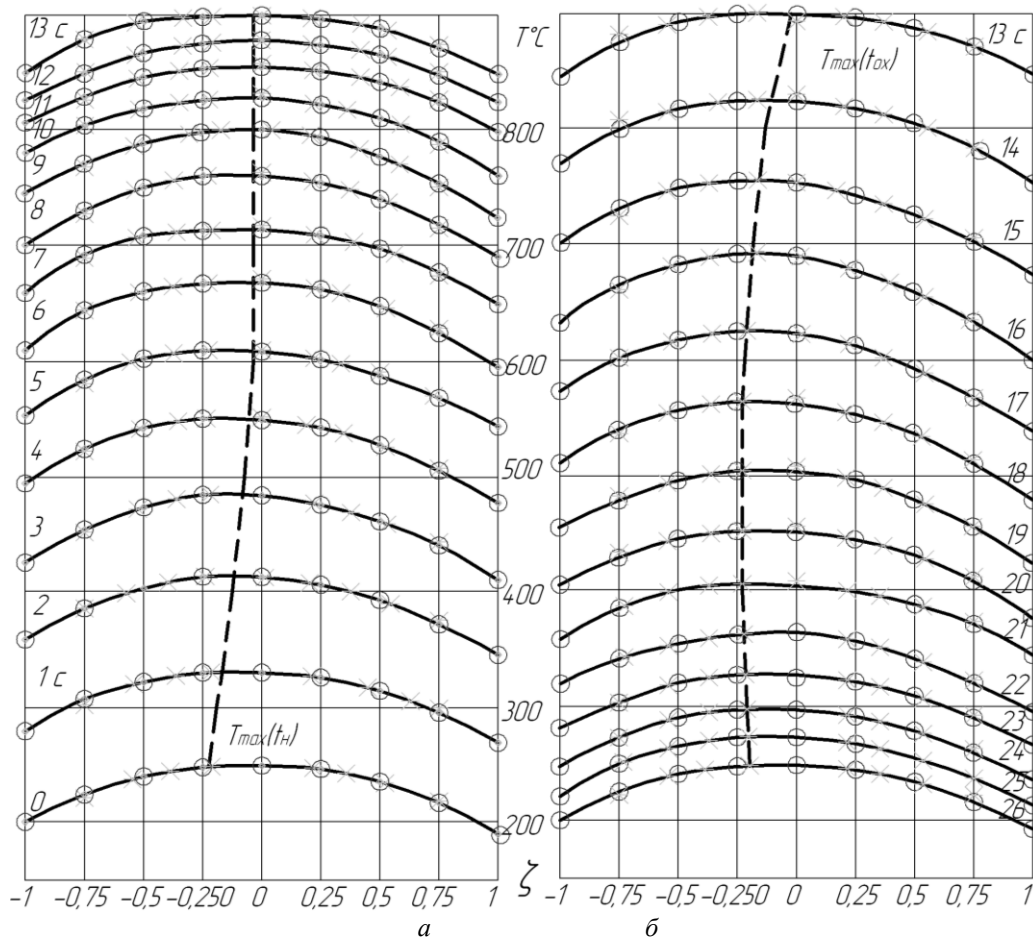


Рис. 2. Щосекундні розподіли температури за довжиною зразків зі сплаву ЖС26В1 при нагріванні (а) і охолодженні (б): $T_{\min} \leftrightarrow T_{\max} = 250 \leftrightarrow 900$ °С; $\circ, *$ — експериментальні значення температури; лінії — розрахункові дані (за раніше викладеному методу [13])

На рис. 2, а також у додатку дослідження для всіх матеріалів і режимів випробування подано щосекундні криві розподілу температури по довжині зразків, що побудовані на основі виконаних розрахунків за формулами (2) і (3) з використанням даних табл. 4.

У середній частині кривих розподілу температури на кожному з поданих рисунків показано лінії максимальних температур ($T_{\min}(t_n)$; $T_{\max}(t_{ox})$), у зоні переміщення яких локалізуються найбільші деформації і пошкодження жароміцних матеріалів та розповсюджуються тріщини втоми зразків матеріалів подібно до деталей «гарячої частини» ГТД.

Дані проведеного дослідження температурних полів у зразках були використані також у роботі для точного налаштування циклічних теплових режимів випробування, а також для якісного аналізу деформованого стану зразків.

При подальшому розвитку досліджень ці дані були використані для кількісної оцінки кінетики деформованого стану зразків у процесі термоциклічних випробувань.

Методи та обсяги термоциклічних випробувань матеріалів

Більш детальне дослідження довговічності було проведено для малопластичного та циклічно стабільного матеріалу ЖС6К. Цей ливарний сплав був випробуваний у достатньо широкому діапазоні зміни асиметрії циклу термомеханічного навантаження, включаючи і малі негативні її значення, для цього було реалізовано більшість (три з чотирьох) із запропонованих у даному дослідженні способів навантаження.

Сплав ЖС6К був випробуваний на декількох температурних режимах, причому на кожному з рівнів термомеханічних напружень випробуванню піддавалося понад 10—15 зразків.

Випробування більш пластичних конструкційних матеріалів ЖС6У, ЕП99вд, ЕІ437Б і Х18Н10Т проведені за схемою комплексного термомеханічного навантаження в позитивній області рівнів асиметрії циклу, причому на кожному рівні випробувано не менш 5 зразків. Усього за вищенаведеною програмою було випробувано 719 зразків.

Значення коефіцієнтів апроксимуючих функцій

Матеріал	$T_{\min} \leftrightarrow T_{\max}$	b_0	b_1	b_2	c_0	c_1	c_2	d_0	d_1	d_2
ЖС6К	Нагрівання									
	150→800	144,3128	70,5202	-1,5159	-8,2347	-2,9631	0,19991	-34,7724	-10,1333	0,41673
	250→900	243,3393	68,9966	-1,3874	-8,7888	-3,4886	0,2694	-30,0509	-7,6203	0,18459
	350→1000	341,7365	82,4128	-2,4119	-6,5564	0,928	-0,12404	-51,6020	-17,2356	0,86672
ЖС6У	450→1100	447,8844	101,0738	-3,9744	-54,4319	7,8847	-0,28049	-85,8796	-3,9745	0,30384
	250→900	253,6542	72,4442	-1,737	-4,5971	-1,2314	0,04048	-21,2626	-13,5026	0,65456
	350→1000	356,1054	70,9758	-1,6504	-5,6978	-1,7451	0,12166	-24,8828	-9,9846	0,34555
ЖС6У	450→1100	447,0355	98,4124	-3,7523	-37,1207	4,6522	-0,19153	-98,6751	6,2497	-0,24096
	ЕП99вд	250→900	251,6716	86,2710	-2,8176	-5,5550	-1,4920	0,14400	-57,3369	-17,6665
ЕІ437Б	250→900	247,3833	77,4030	-2,0637	-8,4562	1,3191	-0,06648	-39,6454	-3,9168	0,2400
Х18Н10Т	100→750	94,2194	84,5663	-2,6331	-11,6849	-2,5030	0,20215	-25,4645	-16,5348	1,02715
ЖС26ВІ	350→1000	351,8356	78,8428	-2,2118	-5,5464	1,728	-0,12440	-41,5010	-16,8366	0,76562
	250→900	248,3473	69,8963	-1,4863	-6,5878	-3,2896	0,1594	-28,1524	-9,5603	0,58354
ЖС32ВІ	350→1000	346,3234	76,5488	-1,8534	-5,8984	-1,3541	0,12460	-38,5826	-11,2326	0,68437
Охолодження										
ЖС6К	150←800	811,8241	-80,0160	2,1958	-11,9811	-4,0906	0,35179	-104,7560	0,2102	0,46231
	250←900	908,9663	-79,2158	2,1598	-11,4887	-3,9478	0,32529	-98,92312	-1,0295	0,50967
	350←1000	1013,2548	-66,2627	1,0915	-28,4151	-5,4061	0,58132	-149,9493	-6,1357	1,12606
	450←1100	1103,2607	-62,78047	0,8705	-4,8082	-9,3519	0,45389	-98,60575	-3,18664	0,40924
ЖС6У	250←900	907,1124	-72,6743	1,7248	-13,4578	1,8388	-0,07724	-99,92883	11,0250	-0,32180
	350←1000	999,1570	-73,3698	1,8113	-7,91137	-3,7944	0,31703	-88,8354	3,74897	0,151587
	450←1100	1102,3312	-69,7497	1,4120	-8,43971	-6,1747	0,30425	-58,90079	-15,7640	1,046543
ЕП99вд	250←900	906,86078	-79,80536	2,2303	-7,10666	-3,5319	0,30732	-59,34455	-3,50283	0,361804
ЕІ437Б	250←900	904,21496	-79,03517	2,1874	-5,46519	-5,4763	0,40796	-61,02235	-4,57697	0,517889
Х18Н10Т	100←750	746,9060	75,7717	1,9668	25,9816	-1,4706	0,26524	-85,14092	-0,23515	0,435865
ЖС26ВІ	350←1000	1025,2584	-64,1637	1,2935	-24,3121	-4,5461	0,59352	-129,5953	-6,57154	1,02501
	250←900	908,2328	-75,3455	2,0492	-12,4483	-3,4438	0,13539	-98,93262	-3,1255	0,45957
ЖС32ВІ	350←1000	998,2540	-76,4678	1,4943	-21,51247	-4,5834	0,43273	-99,7364	4,24794	0,742747

Випробування монокристалічних складно легированих нікелевих сплавів ЖС32-ВІ та ЖС26-ВІ проведено за схемою комплексного термомеханічного навантаження з високими позитивними рівнями асиметрії циклу.

Перед випробуваннями в протокол занесли дані про матеріал, номер зразка, його початкові геометричні параметри, дані про «жорсткість» пружних елементів силового ланцюга динамометра установки і характеристики режиму випробувань, тобто параметри термоциклів, механічного і термічного навантаження.

Перед закріпленням зразка в захватах установки вага рухомої траверси врівноважувалася за допомогою пристрою балансування.

При закріпленні зразка забезпечувалося його надійне центрування і виключення можливості виникнення в ньому згинальних і крутих напружень.

Потім усувалися всі люфти і зазори в силовому ланцюзі установки, але без підвантаження зразка, що контролювалося за показниками тензометра і індикатора годинного типу. Після монтажу зразка всі контрольні і реєструючі прилади встановлювалися на початок відліку і проводилася фіксація їх показань у пам'яті комп'ютера, потім прикладалося задане статичне навантаження (без термоцикловання) і виконувався запис у протокол і в пам'ять комп'ютера статичних напружень $\sigma_{ст}$ і деформацій $\epsilon_{ст}$.

Далі навантаження із зразка знімалося і вмикалася автоматика термоцикловання на заданих рівнях температур. Проводилося ретельне регулювання термоцикла за контрольним мілівольтметром mV і реєструвалися параметри вільного теплового розширення зразка $\Delta l_{cb}(\Delta T)$, протягом перших десяти термоциклів.

Після плавного додавання (у напівциклі охолодження) статичного навантаження $\sigma_{ст}$ вмикався пристрій термічного навантаження $\Delta\sigma_T(t)(\Delta T)$, а також лічильник імпульсів для відліку циклів N випробування зразка, при цьому безперервно реєструвалися робочі параметри $T(t)$, $\sigma_{tm}(t)$, $\epsilon_u(t)$ до стабілізації вимірюваних деформацій ϵ_u .

Далі в процесі автоматичних випробувань проводився періодичний (через декілька десятків циклів) контроль параметрів випробувань.

Реєстрація на комп'ютері параметрів випробувань $T(t)$, $\sigma_{tm}(t)$, $\epsilon_u(t)$ проводилася безперервно. Під час руйнування зразка процес випробувань припинявся автоматично.

Після випробувань записувалась кількість циклів до руйнування зразка N та його залишкові деформації ϵ_u , у міліметрах.

Зруйновані зразки піддавалися детальному вимірюванню поперечних геометричних параметрів ψ , у відсотках.

Метод дослідження напруженого і деформованого стану зразків при термоциклічному навантаженні

Експериментальна установка забезпечує стабілізацію в процесі випробувань параметрів циклу термомеханічних напружень.

Реєстрація термомеханічних напружень здійснювалася шляхом фіксації в пам'яті комп'ютера сигналів від тензорезисторів, наклеєних на динамометричній тязі. Така реєстрація напружень $\sigma_{tm}(t)$ була виконана для кожного режиму навантаження, передбаченого обраною програмою випробувань (див. табл. 1).

У попередній статті [13] було показано зміну термомеханічних напружень при асиметричному $\sigma_{1tm}(t)$ і симетричному $\sigma_{2tm}(t)$ циклах для режиму термоцикловання. $T_{min} \leftrightarrow T_{max} = 350 \leftrightarrow 1000$ °C. За допомогою таких циклограм для кожного режиму випробувань було визначено розмахи термомеханічних напружень $\Delta\sigma_{tm}(\Delta T)$ і середнє напруження циклу σ_m , величини яких наведено на отриманих характеристиках довговічності матеріалів. З рис. 2, а статті [13] виходить, що залежності термомеханічних напружень від часу $\sigma_{tm}(t)$ нагріву або охолодження мають монотонний характер і близькі до експоненціальних. Це виправдовує вибір для їх апроксимації експоненціальних функцій.

Обраний у праці спосіб термоциклічного навантаження зразків характеризується істотною зміною їх деформацій $\epsilon_u(t)$ як у часі циклу випробувань, так і за числом циклів N навантаження. Крім цього, через нерівномірності температурних полів має місце значна нерівномірність розподілу і локалізація деформацій по довжині зразків. Це привело до необхідності докладнішого дослідження деформованого стану зразків у процесі випробувань, що було зроблено в спеціальному дослідженні локалізації пошкоджень [13].

Також у праці [13] було визначено зміни по довжині зразків деформацій $\sigma_{1tm}(t)$ і $\sigma_{2tm}(t)$ протягом одного циклу для двох режимів термомеханічного навантаження $\sigma_{1tm}(t)$ і $\sigma_{2tm}(t)$, показані схеми накопичення непружних деформацій у циклі, з яких виходить, що для циклу термомеханічних напружень з позитивною середньою напругою $+\sigma_m$ і коефіцієнтами асиметрії $r = -0,217$ характерне накопичення непружних деформацій розтягування, а при симетричному циклі ($\sigma_m = 0$; $r = -1$) має місце нагромадження деформації стиснення. Отже, у діапазоні коефіцієнтів асиметрії $-0,25 > r > -1$ повинен існувати режим навантаження, за якого не відбувається накопичення залишкових деформацій.

У дослідженні [13] розглянуто нагромадження залишкових деформацій розтягування ($+\epsilon$, в мм) по числу циклів N навантаження зразків з малопластичного матеріалу ЖС6К.

Залежності $\varepsilon_u(N)$ аналогічні кривим повзучості матеріалів та мають три характерні ділянки: початковий несталій період I; період накопичення деформації з постійною швидкістю II і період інтенсивного зростання деформацій перед руйнуванням III.

Подібний же характер мають криві нагромадження непружних деформацій стиснення ($-\varepsilon_u$, у міліметрах) у зразках та, вочевидь, у конструктивних елементах ГТД, що випробовують термомеханічне навантаження.

Якщо для цих елементів вимірювати в процесі експлуатації накопичення непружних деформацій, то за їх різким зростанням на початку третього періоду можна судити про наближення термовтомного руйнування, тобто проводити достовірне оцінювання технічного стану за даним критерієм (наприклад, методами акустичної емісії).

Також наведено розподіл і локалізацію поперечних залишкових деформацій (ψ , у відсотках) за довжиною зразка після його руйнування, що свідчить про те, що максимальні деформації нагромаджуються в середній частині зразка, де діють не тільки термомеханічні напруження, а максимальні температури, що зменшують модуль пружності і межу пропорційності матеріалу.

Кінетику нагромадження (граничних) непружних деформацій у зразку зі сплаву ЖС6К за кількістю циклів навантаження показано на рис. 3, а [13]. На цьому рисунку подано також цикли зміни температури $T(t)$ і термомеханічних напружень $\sigma_{tm}(t)$.

Рис. 3 наведено з метою продемонструвати, що при малій кількості циклів до руйнування ($N = 39$ циклів), як правило, відсутній III-й період інтенсивного зростання деформацій $\varepsilon_u(N)$, бо II-й період був достатньо інтенсивний.

Залежності нагромаджених поздовжніх деформацій від кількості циклів навантаження [13] (рис. 3, б) для сплавів ЖС6К та ЖС6У демонструють також наявність виявлених III періодів роботи. З рис. 3, б видно, чим менші величини нагромадженої деформації ε , тим більшої довговічності N набувають зразки.

Для інших матеріалів і умов випробування графіки повздовжнього деформування зразків показано на рис. 3, в. З цих рисунків видно, що для сплаву ЖС6К при однакових кількостях циклів до руйнування залишкові деформації стиснення значно перевищують по величині деформації розтягування. Для сплавів ЕІ437Б і Х18Н10Т величини накопичених деформацій до моменту руйнування приблизно на порядок вище, ніж у сплавів ЖС6К, ЖС6У, ЖС26ВІ і ЖС32ВІ. Крім цього, для кожного з даних матеріалів, випробуваних приблизно при однакових величинах розмахів термомеханічних напружень, більшої кількості циклів N до руйнування відповідають менші значення нагромаджених дефор-

мацій. Це наглядно показано для матеріалу Х18Н10Т, який витримав понад 13 000 циклів навантаження (рис. 3, в, N_1). Ураховуючи цей факт, а також істотну залежність величини і характеру накопичення непружних деформацій ε_u від асиметрії циклу термомеханічних напружень можна зробити висновок про те, що за умови $\Delta\sigma_{tm} = \text{const} (\Delta T = \text{const})$ рівень асиметрії циклу r напружень, що не призводить до накопичення непружних деформацій, забезпечуватиме максимально можливу кількість циклів до руйнування N_{max} (слід мати на увазі, що за відсутності залишкових деформацій можлива непружна деформація зразка, тільки вона матиме в цьому випадку знакозмінний, компенсуючий характер).

Для визначення режимів асиметричного термомеханічного навантаження матеріалів, за яких відсутнє нагромадження непружних деформацій, у роботі проаналізоване залежності поперечних (ψ , у відсотках) деформацій, нагромаджених у зразках до моменту руйнування, від коефіцієнта асиметрії циклу напружень $r = \sigma_{\text{min}}/\sigma_{\text{max}}$. Зазначені залежності показано на рис. 4, де кожна точка отримана шляхом усереднення результатів 5—15 зразків вимірювань. Більші абсолютні значення нагромаджених деформацій на цих залежностях відповідають меншим кількостям циклів до руйнування зразків і навпаки.

Як впливає з поданих на рис. 4 діаграм, найбільше відносне звуження зразків відбувається при коефіцієнті асиметрії циклу, що дорівнює одиниці ($r = 1$), тобто при тривалому статичному навантаженні в умовах циклічно змінних температур. Це пояснюється тим, що постійно діючі однознакові напруження викликають інтенсивну непружну деформацію зразків при високих температурах циклу.

При пульсуючому циклі ($r = 0$) термомеханічні напруження близькі до нуля при високих температурах їх циклу, у зв'язку з чим непружна деформація можлива лише при середніх і низьких температурах, за яких вона протікає з малою інтенсивністю, не дивлячись на високі рівні напружень.

Симетричний цикл ($r = -1$) характеризується тим, що максимальні термомеханічні напруження стиснення діють при найбільших температурах циклу, викликаючи переважаюче нагромадження деформацій стиснення, оскільки максимальні напруження розтягування відповідають низьким температурам циклу, за яких матеріал має значно вищу опірність пластичній деформації. Унаслідок цього при $r = -1$ відносне потовщення зразків перед руйнуванням досягає істотних величин (рис. 4) і для досліджених матеріалів у 1,5 ... 2 рази перевищує відносне звуження після випробувань за пульсуючим циклом напружень ($r = 0$).

З рис. 4 видно, що для всіх досліджених матеріалів і режимів випробувань у діапазоні коефіцієнтів асиметрії циклу напруження ($-0,25 \dots -0,5$) накопичення непружних деформацій не відбувається чи майже не відбувається. Як показали дослідження, за таких значень коефіцієнта асиметрії непружні деформації зразків мають знакозмінний характер, при якому накопичені за напівцикл нагрівання деформації стиснення компенсуються непружними деформаціями розтягування, що виникають у напівциклі охолодження і навпаки. Очевидно, при такій деформації в матеріалі зразків невідомо поглинається мінімальна кількість підведеної енергії порівняно з будь-якими іншими рівнями асиметрії циклу напру-

ження, унаслідок чого дана асиметрія циклу забезпечуватиме, за інших рівних умов, максимально можливу кількість циклів до руйнування N_{\max} .

Таким чином, асиметрія циклу термомеханічних напружень, за яких має місце знакозмінна непружна деформація матеріалу без накопичення деформацій, є оптимальною в сенсі максимальної термоциклічної довговічності.

Цей важливий висновок підтверджується, зокрема, результатами випробувань зразків із сплаву ЖС6К, відповідно до яких максимальні значення розмаху граничних термомеханічних напружень відповідають коефіцієнтам асиметрії циклу ($-0,2 \dots -0,4$).

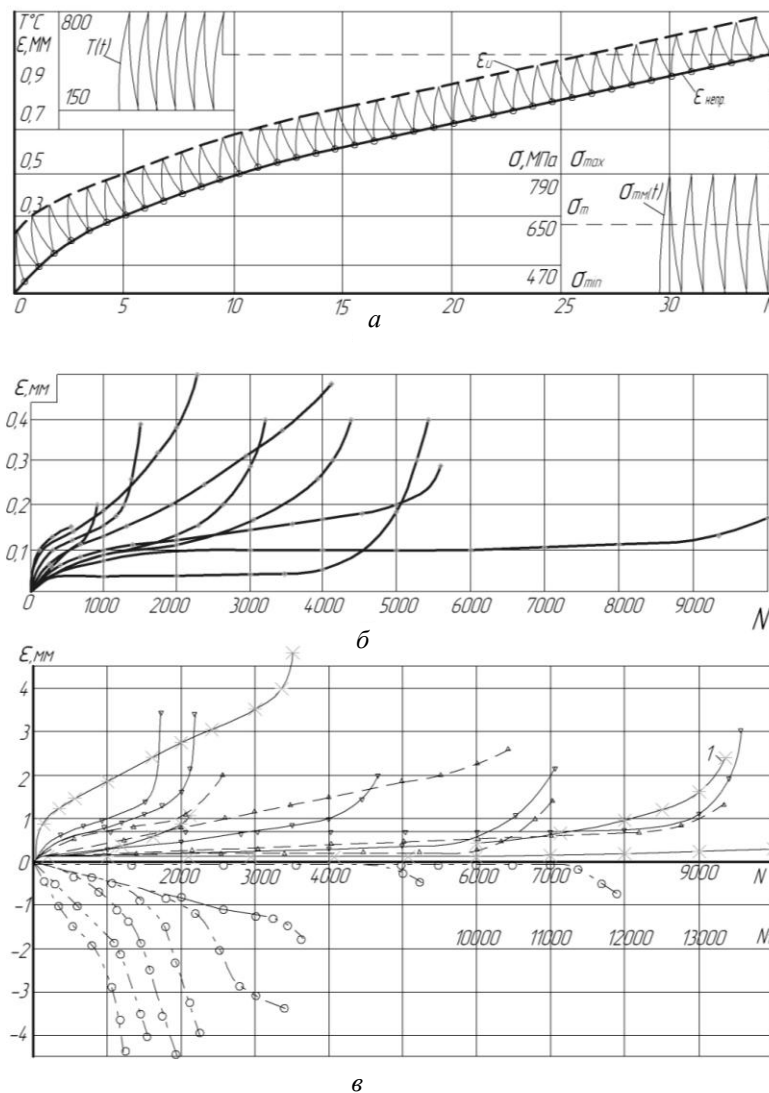


Рис. 3. Кінетика накопичення поздовжніх непружних деформацій у зразках:
 а — нагромадження непружних деформацій розтягування в зразку зі сплаву ЖС6К за малої кількості циклів до руйнування; б — сплави ЖС6К, ЖС6У;
 в — сплави ЖС6К, ЕП99вд, ЕІ437Б, Х18Н10Т, ЖС26ВІ, ЖС32ВІ

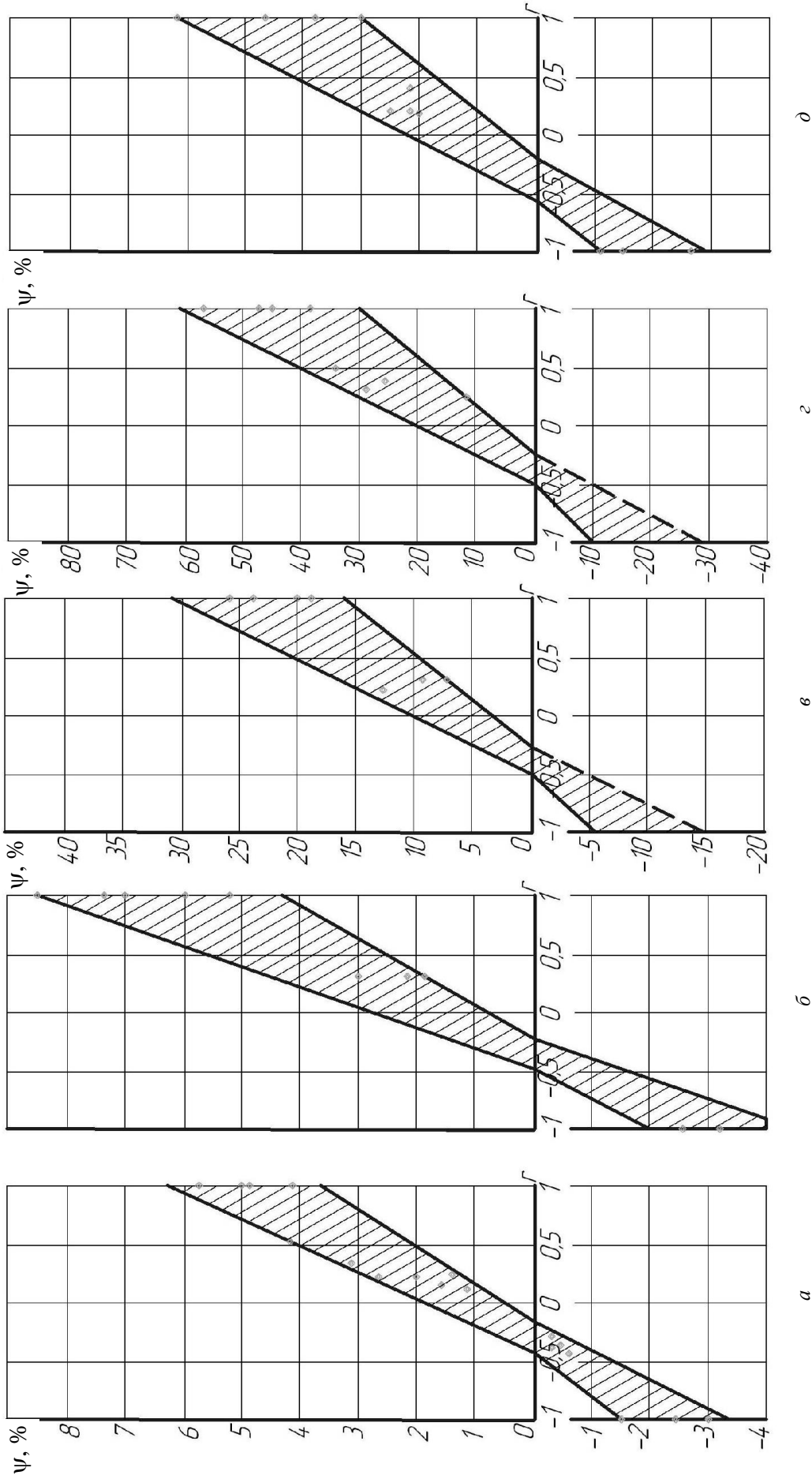


Рис. 4. Вплив асиметрії циклу термомеханічних напружень на величину відносних поперечних деформацій зразків, нагромаджених до моменту руйнування:

a — сплав ЖС6К, $T_{\min} \leftrightarrow T_{\max} = 350 \leftrightarrow 1000$ °С; *б* — сплав ЖС6У, $T_{\min} \leftrightarrow T_{\max} = 350 \leftrightarrow 1000$ °С;

в — сплав ЕП99ВД, $T_{\min} \leftrightarrow T_{\max} = 250 \leftrightarrow 900$ °С;

г — сплав Е1437Б, $T_{\min} \leftrightarrow T_{\max} = 250 \leftrightarrow 900$ °С; *д* — сталь Х18Н10Т, $T_{\min} \leftrightarrow T_{\max} = 100 \leftrightarrow 750$ °С

Висновки

1. Під час дослідження теплового стану зразків жароміцних матеріалів безконтактним методом виявлено, що чим більше жароміцність матеріалу, тим менше його випромінювальна здатність та відхилення променя L , мм. А за максимального відхилення променя на $L = 200$ мм на тарувальних залежностях $L(T)$ можна визначити максимальні робочі температури жароміцних сплавів (наприклад: для 1X18H10T — 750 °С, для EI437B — 900 °С, EP99вд — 950 °С, ЖС6К і ЖС6У — 1100 °С тощо).

2. При дослідженні температурних розподілів у зразках матеріалів виявлено зону дії максимальних температур у верхній чверті зразка від середини (з координатами ξ від 0 до $-0,25$), де локалізуються найбільші деформації при термоциклічних випробуваннях.

3. Аналіз напруженого стану зразків при різних рівнях асиметрії r циклів термомеханічного навантаження ($-1 \leq r \leq 1$) дав змогу зробити важливе припущення про існування режимів оптимального термомеханічного навантаження, коли довговічність роботи жароміцних матеріалів буде максимальною N_{\max} .

4. Дослідження поздовжніх деформацій дало змогу виявити три характерні періоди в роботі жароміцних матеріалів. Дослідження поперечних нагромаджених деформацій дозволили локалізувати їх у зоні дії максимальних температур, де і спостерігаються руйнування зразків.

5. У роботі виявлено діапазон асиметрій циклів термомеханічного навантаження зразків жароміцних матеріалів (від $-0,25$ до $-0,5$) в якому (незалежно від матеріалів і температурних режимів) знакозмінні пластичні деформації взаємокомпенсуються і майже не накопичуються, а довговічність матеріалів і деталей з них може бути збільшена від двох до п'яти разів.

6. Останній висновок потребує додаткових теоретичних та експериментальних досліджень для його обґрунтування та комплексу новітніх матеріалів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Баладин Ю. Ф. Термическая усталость металлов в судовом энергомашиностроении / Ю.Ф. Баладин. — Л. : Судпромгаз, 1967. — 272 с.
2. Серенсен С. В. К оценке сопротивления разрушению при термической усталости / С. В. Серенсен, Р. А. Дульнев, Н. А. Бычков // Проблемы прочности. — К. : 1961. — № 1. — С. 12—19.
3. Гецов Л. Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин / Л. Б. Гецов. — М. : Недра, 1996. — 591 с.
4. Усталость жаропрочных сплавов и рабочих лопаток ГТД / Б. А. Грязнов, С. С. Городецкий, Ю. С. Налимов [и др.]; под ред. В. Т. Трощенко. — К. : Наук. думка, 1992. — 264 с.
5. Третьяченко Г. Н. Прочность и долговечность материалов при циклических тепловых воз-

действиях / Г. Н. Третьяченко, Б. С. Карпинос. — К. : Наук. думка, 1990. — 256 с.

6. Третьяченко Г. Н. Исследования разрушения лопаток газовых турбин под воздействием тепловых / Г. Н. Третьяченко // Проблемы прочности. — К. : 1971. — № 2. — С. 28—35.

7. Третьяченко Г. Н. Разрушение материалов при циклических нагревах / Г. Н. Третьяченко, Б. С. Карпинос, В. Г. Барило. — К. : Наук. думка, 1993. — 288 с.

8. Еленевский Д. С. Предельное состояние и ресурс лопаток турбин при многофакторном неизотермическом нагружении / Д. С. Еленевский, В. А. Соляников // Известия Самарского научного центра РАН. — 1999. — № 2. — С. 325—328.

9. Коффин Л. Ф. О термической усталости сталей / Л. Ф. Коффин // Сб. науч. труд.; пер. с англ.; под ред. Л.Б. Гецова и М.Г. Таубиной. — М. : Госэнергоиздат, 1969. — 288 с.

10. Менсон С. С. Температурные напряжения и малоцикловая усталость / С.С. Менсон; пер. с англ. Л.В. Солина. — М. : Машиностроение, 1974. — 344 с.

11. Miller D.R. Thermal stresses ratchet Mechanism in pressure vassels // Miller D/R/I. Basic Eng., Transactions ASME. — S. D. — Vol. 81, № 2, June 1959, — P. 190—196.

12. Киселевский В. Н. Исследование ползучести и длительной прочности жаропрочных материалов в условиях термоциклирования / В. Н. Киселевский // Сб. науч. труд. — М. : Наука, 1971. — С. 350—354.

13. Локалізація критичних зон пошкодження жароміцних матеріалів та роторних деталей ГТД / М. С. Кулик, О. Г. Кучер, М. О. Ковешніков [і др.]. // Наукоємні технології. — К. : НАУ, 2009. — С. 3—13.

14. Иноземцев А. А. Газотурбинные двигатели / А.А. Иноземцев, В.Л. Сандрацкий. — М. : ОАО Авиадвигатель, 2006. — 1202 с.

15. Иноземцев А. А. Динамика и прочность авиационных двигателей и энергетических установок / А.А. Иноземцев, М.И. Нихамкин, В.Л. Сандрацкий. — М. : Машиностроение, 2008. — 204 с.

16. Новые технологические процессы и надежность ГТД: Сб. науч. трудов под науч. ред. Ю.А. Ножницкого, Р.И. Ткаченко. — М. : ЦИАМ, 2008. — № 7. — 172 с.

17. ВІАМ. Режим доступу. www.viam.ru

18. ЦІАМ. Режим доступу. <http://www.ciam.ru/>

19. Параметры двигателя ДЗОКП с бесполочными рабочими лопатками первой ступени турбины на основных режимах для характерных условий полета: техническая справка № 6618/Пермский машиностроительный завод (ПМЗ). — Пермь, 1974. — 68 с.

20. Расчет эпюр температур рабочей лопатки первой ступени турбины и газодинамических параметров на режимах расчета на прочность / двигатель НК-8-2У/ отчет № РС-0003-77. — Казань: Казанский машиностроительный завод (КМЗ), 1977. — 62 с.

21. Влияние температурных градиентов на деформации и напряжения в элементах конструкции / И.С. Пиняк, А.Ф. Белявин, А.В. Махоткин, В.А. Ровков // Вестник двигателестроения. — Запорожье, 2005. — №3. — С. 31—36.

Стаття надійшла до редакції 20.10.09.