

УДК 621.9

І.Г. Грабар, д.т.н., проф.
Житомирський інженерно-технологічний інститут

ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РЕСУРСУ В УМОВАХ СКЛАДНОГО ТЕМПЕРАТУРНО-СИЛОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ СУЧАСНИХ МАШИН

Зроблено спробу побудови методології натурних випробувань конструкцій в умовах складного температурно-силового навантаження.

Як правило, найбільш навантаженими елементами багатьох сучасних машин – газотурбінних двигунів, силових установок ракетно-космічної техніки, накопичувачів механічної енергії, електричних машин великої потужності є ротори. Саме в цих конструкціях, поряд з агресивним середовищем, високими температурами, змінними напруженнями, аеродинамічними навантаженнями додаються відцентрові сили, що діють протягом значної кількості часу – 10000–100000 годин.

Умови роботи роторів у даних конструкціях мають спільні особливості:

- підвищені температури;
- вплив відцентрових сил протягом тривалого часу;
- спільність конструктивних форм;
- тяжкі соціальні, економічні й екологічні наслідки від їх руйнування.

Ці, а також деякі інші загальні особливості для перерахованих груп конструкцій ускладнюють застосування аналітичних методів для оцінки ресурсу. Хоча аналітичні та числові методи, і особливо метод кінцевих елементів і метод граничних елементів, дозволили досягти істотного прогресу в області оптимального проектування роторів перерахованих пристроїв. В той же час наявність дуже точної і достовірної інформації про локальні й інтегральні поля компонент тензорів напруг і деформацій є недостатніми для безпечної експлуатації цих виробів. Очевидно, в найближче десятиліття в прогнозуванні ресурсу особливо відповідальних вузлів і деталей, із важкими соціальними, економічними й екологічними наслідками у випадку раптових відмов є і залишаються експериментальні методи натурних випробувань.

Для успішного вирішення задач натурних випробувань, і особливо на стадії виготовлення лідерних зразків виробів, необхідно знаходити компроміс між множиною протиріч, із яких основні:

- врахування головних чинників, що впливають на довговічність;
- максимальне скорочення термінів випробувань;
- здешевлення випробувань;
- максимальна правдоподібність одержуваної інформації.

На даний час відсутня єдина методологія прискорених натурних випробувань конструкцій в умовах складного температурно-силового навантаження. Пропонується спроба побудови такої методології на основі принципів синергетики і термоактиваційної концепції руйнування.

Узагальнені граничні поверхні жароміцних сплавів на основі нікелю і на основі заліза

Для оцінки довготривалої міцності і прогнозування гарантованого ресурсу елементів роторів необхідно розглянути поведінку конструкційного матеріалу в тривимірному просторі “час–напруга–температура”, якому в стаціонарних умовах відповідає стаціонарне рівняння Журкова:

$$\tau = \tau_0 \exp \frac{U_0 - \gamma_j \sigma}{kT}, \quad (1)$$

де γ_j – активаційний об'єм. Для цієї цілі частіше користуються узагальненими діаграмами, які забезпечують більш просту графічну інтерпретацію експериментальних даних. Із логарифмування (6.1), отримаємо:

$$\sigma = \frac{U_0}{\gamma} - \frac{k \ln 10}{\gamma} (T \lg \frac{\tau}{\tau_0}), \quad (2)$$

що відповідає лінійному рівнянню:

$$\sigma = A - B * P_r, \quad (3)$$

де

$$A = \frac{U_0}{\gamma}; \quad B = \frac{k}{\gamma} \ln 10; \quad P_\tau = T \cdot \lg \frac{\tau}{\tau_0}$$

Як правило, для переважної більшості жароміцних сплавів на основі заліза та на основі нікелю, і, пасамперед, сплавів ЕІ і ЕП, повна діаграма “ σ - P_τ ” в широкому діапазоні значень параметра (P_τ ($P_\tau \in [4500-22000]$ – від короточасної міцності при кімнатних температурах до тривалої міцності 10000 годин при 0.7–0.8 Ts) містить два лінійних участки (рис. 1).

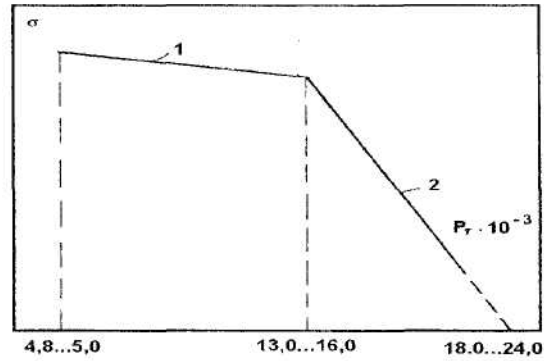


Рис. 1. Схематичне зображення узагальненої “ σ – P_τ ” – діаграми жароміцних ЕІ і ЕІ сплавів

На рис. 2–4 наведені узагальнення “ σ – P_τ ” діаграм для деяких із сплавів ЕІ і ЕП.

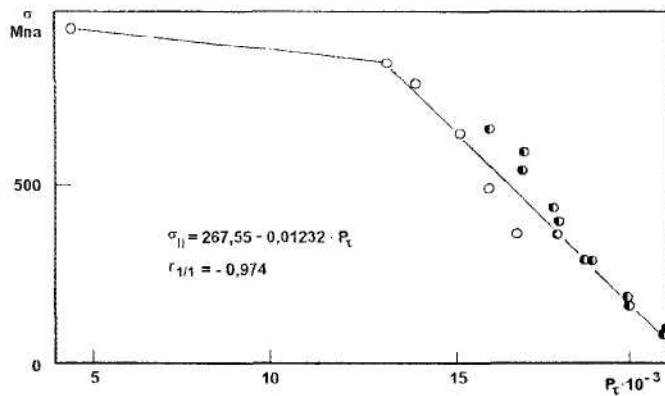


Рис. 2. Узагальнена “ σ – P_τ ” – діаграма сплаву ЕІ 437 Б

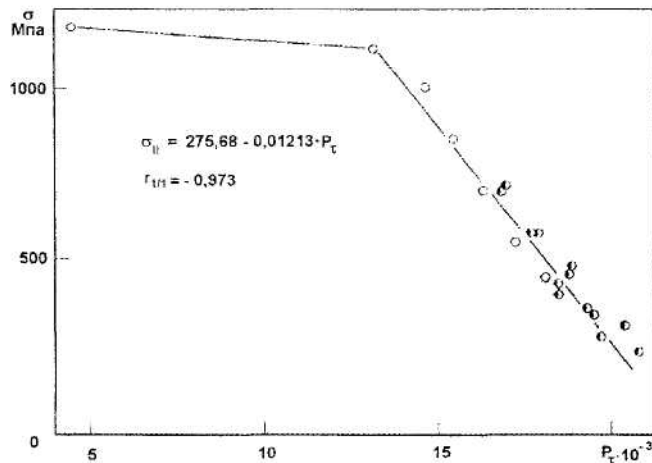


Рис. 3. Узагальнена “ σ – P_τ ” – діаграма сплаву ЕП 590

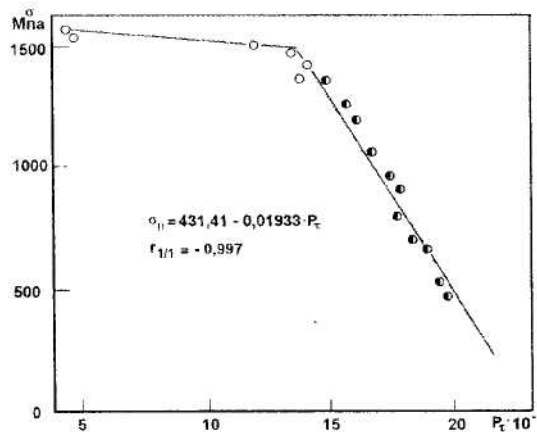


Рис. 4. Узагальнена “ $\sigma - P\tau$ ” – діаграма сплаву ЕП962ІД

В табл. 1 наведені результати термоактиваційного аналізу для кожного зі сплавів.

Таблиця 1

Термоактиваційні параметри сплавів на основі Fe і на основі Ni, розраховані за діаграмами короточасної (КМ) та тривалої (ТМ) міцності

Сплав	Осно- ва	U_0 , кДж / моль		γ , кДж / моль · МПа	
		КМ	ТМ	КМ	ТМ
Сталь 20	Fe	312,4	330,9	0,338	0,405
Сталь 40	Fe	297,5	326,7	0,198	0,253
Сталь 45	Fe	--	329,2	--	0,264
ЕІ 388	Fe	397,6	410,1	0,240	0,334
ЕІ 473 б	Ni	379,9	415,7	0,141	0,155
ЕІ 481	Fe	429,6	421,2	0,299	0,255
ЕІ 617	Ni	--	481,1	--	0,322
ЕІ 680	Fe	--	403,0	--	0,297
ЕІ 696	Fe	419,0	422,6	0,219	0,198
ЕІ 698	Ni	395,7	422,9	0,127	0,134
ЕІ 765	Ni	--	457,0	--	0,309
ЕІ 802	Fe	--	395,7	--	0,308
ЕІ 867	Ni	403,1	455,9	0,126	0,161
ЕІ 961	Fe	356,8	348,3	0,147	0,126
ЕІ 993	Fe	--	393,1	--	0,247
ЕП 590	Ni	403,0	437,7	0,127	1,157
ЕП 709	Fe	393,4	418,3	0,145	0,147
ЕП 800	Ni	450,4	466,7	0,182	0,181
ЕП 898	Fe	494,8	--	0,407	--
ЕП 962	Ni	405,3	427,1	0,093	0,099

Для всіх перерахованих матеріалів для участка 2 “ $\sigma - P\tau$ ” діаграм отримані кореляційні рівняння виду (2) із високим значенням коефіцієнта кореляції ($r > 0,96$). Значення активаційного об’єму та енергії активації визначалося за співвідношеннями:

$$\gamma = \frac{k}{B} \ln 10 ; \quad U_0 = \frac{A}{B} k \ln 10 . \quad (4)$$

В табл. 1 наведені значення γ і U_0 , обчислені для участка 2 діаграм за граничними кривими “ $\sigma_B - P\tau$ ”, “ $\sigma_e - P\tau$ ”, “ $\sigma_{ДП} - P\tau$ ”, причому σ_e для деформування із постійною швидкістю отримано із параболічного наближення. Як показали наші дослідження, всі три наближення дають близькі значення активаційних параметрів. Нами вперше встановлено, що ділянки 2 залежностей “ $\sigma - P\tau$ ” для сплавів на основі залізу і для сплавів на основі нікелю є автомодельними.

На рис. 5 і рис. 6 на зображуючих площинах наведені автомодельні залежності жароміцних сплавів на основі заліза і на основі нікелю .

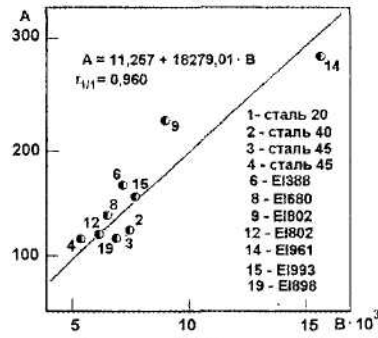


Рис. 5. Зображуючий простір для площини II залежностей $\sigma = A - B \cdot P_{\tau}$ жароміцних сплавів на основі заліза

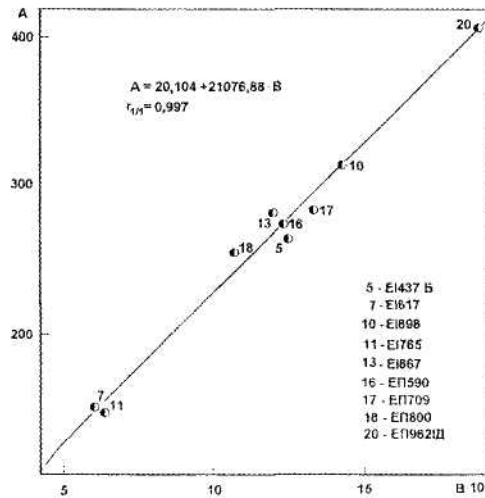


Рис. 6. Зображуючий простір для площини II залежностей $\sigma = A - B \cdot P_{\tau}$ жароміцних сплавів на основі нікелю

Кореляційний аналіз дає:

а) для сплавів на основі заліза:

$$A = 11,2574 + 18279,01 B; \quad r = 0,960; \tag{5}$$

б) для сплавів на основі нікелю:

$$A = 20,1044 + 21076,88 B; \quad r = 0,997. \tag{6}$$

Високі значення коефіцієнтів кореляції дозволяють припустити, що (5) і (6) можуть бути використані як додаткові умови прогнозу довготривалої міцності. Використовуючи рівняння автотривалості, є можливість прогнозувати тривалу міцність в широкому діапазоні температур і довговічностей (в межах ділянки 2) за єдиною кривою деформування.

В табл. 2 наведені експериментальні значення (чисельник) при випробуваннях на довготривалу міцність і прогноз довготривалої міцності (9) (знаменник). Як витікає з табл. 2, дані прогнозу (в межах дії одного механізму деформування, тобто в діапазоні між двома сусідніми точками біфуркації) досить задовільні.

Таблиця 2

Експериментальні (чисельник) і теоретичні (знаменник) значення тривалої міцності для жароміцного нікелевого сплаву ЕП962 ІД

τ , час	100		500		1000	
	P_{τ}	$\sigma_{дп}$, МПа	P_{τ}	$\sigma_{дп}$, МПа	P_{τ}	$\sigma_{дп}$, МПа
823	15272	1340/1270	15847	1260/1296	16094	1210/1244
923	17127	1020/1028	17773	910/833	18050	860/835
973	18055	780/834	18735	670/691	19028	530/629
1023	18983	630/639	19698	510/490	20006	460/425

Прискорення термоактиваційних процесів при натурних випробуваннях

Як показано вище, привести у відповідність результати, отримані в умовах одноосьових випробувань на тривалу міцність, до оцінки тривалої міцності конструкцій в умовах складного напружено-деформованого стану, є дуже проблематичним. Аналогічна за складністю задача виникає при оцінці еквівалентності двох складних НДС, що ускладнює прогноз ресурсу, отриманого при одних значеннях компонент тензора $\{\sigma_{ij}\}$ (прискорені випробування) на випадок експлуатаційних (більш низьких) значень компонент тензора $\{\sigma_{ij}\}$. В дійсній роботі почата спроба прогнозу довготривалої міцності в умовах складного НДС, заснована на уявленнях термоактиваційного аналізу і синергетики (в рамках сталості структурного параметра – активаційного обсягу).

Як показано вище на ряді жароміцних і конструкційних матеріалів, учасок 2 залежності " $\sigma - P_\tau$ " має достатньо високі ($r > 0,96$) значення коефіцієнта кореляції для випробувань при різноманітних сполученнях $\{\sigma, \tau, T\}$. Це дозволяє підтверджувати, що в просторі $\{\{\sigma_{ij}\}; \tau, T\}$, де $\{\sigma_{ij}\}$ – тензор напружень, якщо неможливо визначити критерії еквівалентності НДС, можна знайти інші шляхи прискорення випробувань, що дозволяють обминути виниклу трудність.

В тензорному вигляді рівняння Журкова для стаціонарного навантаження при складному НДС можна записати:

$$\{\tau_{ij}\} = \{\tau_0\} \exp \frac{U_0 - \gamma \{\sigma_{ij}\}}{k\{T_{ij}\}}. \quad (7)$$

Як відомо, незалежні змінні "час" і "температура" мають нульовий ранг тензорів, тоді як тензор напружень має ранг, що дорівнює двом. Це дозволяє записати (без врахування термопружних ефектів) для складного НДС:

$$\tau_{ij} = \tau_0 \exp \frac{U_0 - \gamma \{\sigma_{ij}\}}{kT}. \quad (8)$$

Із (8) витікає єдиний спосіб прискорення термоактиваційних процесів, що не пов'язаний із критеріями еквівалентності багатомірних розмірів – це масштабне перетворення тензорів нульового рангу (скалярів) як одномірних, а значить інваріантних розмірів.

Як показано вище, для жароміцних сплавів існує (в межах ділянки 2) однозначний лінійний зв'язок " $\sigma - P_\tau$ " із добрим ($r > 0,96$) значенням коефіцієнта кореляції. Легко побачити, що в координатах " $\{\sigma_{ij}\} - P_\tau$ " тензорні змінні розділилися за рангами. Так, комплекс:

$$P_\tau = T \cdot \lg \frac{\tau}{\tau_0} \quad (9)$$

є комбінацією тензорів нульового рангу. Це дозволяє запропонувати спосіб прискореного підтвердження гарантованого ресурсу для конструкцій, що працюють в умовах складного напружено-деформованого стану.

Ідея методу заснована на дотриманні сталості компонент тензора:

$$\{\sigma_{ij}\} = \text{const}. \quad (10)$$

що, з огляду на високе значення коефіцієнта кореляції залежності " $\sigma - P_\tau$ ", дозволяє записати, що:

$$P_\tau = \text{const} \quad (11)$$

Коефіцієнт прискорення випробувань K_u можна задати у вигляді:

$$\lg k_u = (T_2 / T_1 - 1) \lg(t_2 / t_0),$$

де (T_2, τ_2) – температура і довготривалість прискорених випробувань;

T_1 – експлуатаційна температура.

Запропонований спосіб дозволяє реалізувати прискорення натурних випробувань як стаціонарного температурного поля ($d/dt = 0$; $\nabla T = 0$), так і при деяких сполученнях просторово-часової нестационарності $\frac{dT}{dt} = 0$.

Еквівалентні прискорені випробування на забезпечення гарантованого ресурсу дисків турбомашин

а) Просторово-часова стаціонарність температурного поля ($\dot{T} = 0$; $\nabla T = 0$).

Запропоновано експериментально-теоретичний спосіб прискорених натурних випробувань на забезпечення гарантованого ресурсу конструкцій при складному стаціонарному НДС, зокрема, роторів і дисків в полі відцентрових сил (ВЦС).

Ціль способу – скорочення часу дорогих натурних випробувань, особливо на стадії проектування і доводки виробів нової техніки, що містять відповідальні обертові конструкції з великим гарантованим ресурсом.

Поставлена ціль досягається тим, що випробування проводяться при частоті обертання на рівні експлуатаційної ($n_2 = n_1 + \Delta n$), що забезпечує адекватність тензора напруженого стану $\{\sigma_{ij}\}$ експлуатаційним умовам, а скорочення часу випробувань досягається за рахунок прискорення термоактиваційних процесів. При цьому, як очевидно із (9):

$$\tau_2 < \tau_1; T_2 > T_1, \quad (12)$$

де $\{T_1\tau_1\}$ – експлуатаційні температура і ресурси;

$\{T_2\tau_2\}$ – температура і час прискорених випробувань.

Із (9) знаходимо зв'язок між ними:

$$\tau_2 = \left(\frac{\tau_1}{\tau_0} \right)^{\frac{T_1}{T_2}}, \quad (13)$$

де $\tau_0 \approx$ період власних коливань вузлів кристалічного штахету матеріалу випробуваної конструкції.

Технічні можливості існуючих стендів для випробувань обертових конструкцій, в тому числі і стендів Житомирського інженерно-технологічного інституту, дозволяють скоротити час натурних випробувань на два-три порядки, що поряд із великим економічним ефектом забезпечить соціальний ефект, і насамперед – за рахунок більшої гнучкості і багатоваріантності конструкторських рішень, спрямованих на зниження матеріалоємкості при збереженні і навіть підвищенні гарантованого ресурсу.

Приклад.

Для диска газотурбінного авіаційного двигуна, що працює при частоті обертання $n = 13000$ об/хв. та температурі $T = 600$ °С, гарантований ресурс за тривалою міцністю повинен становити $\tau_1 = 10000$ год. Визначити умови еквівалентних прискорених випробувань із коефіцієнтом прискорення $K_y = 1000$.

Розв'язок.

Напружено-деформований стан диска є складним (навіть в осесиметричній постановці), що істотно ускладнює можливість скорочення часу випробувань за рахунок підвищення частоти обертання. Отже, частоту обертання прискорених випробувань прийемо на рівні експлуатаційної:

$$n_2 = n_1 + |\Delta n|,$$

де Δn – похибка виміру частоти обертання.

У нашому випадку $\frac{\Delta n}{n_1} \approx 0,02$. Тоді:

$$n_2 = 1,02n_1 = 13260 \text{ об/хв.}$$

З умови (6.16) маємо:

$$T_2 = (600 + 273) \frac{\lg(10^{13} \cdot 3600 \cdot 10000)}{\lg(10^{13} \cdot 3600 \cdot 10)} = 1022 \text{ K} = 749^\circ \text{C}$$

Таким чином, неруйнування диска при частоті обертання $n_2 = 13260$ об/хв і температурі $T = 749$ °С протягом 10 годин гарантує тривалу міцність диска в 10000 годин при температурі 600 °С і частоті обертання 13000 об/хв.

Експериментальна перевірка підтвердила достовірність наведених оцінок.

ГРАБАР Іван Григорович – доктор технічних наук, професор, перший проректор, проректор з наукової роботи Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

- синергетика та нелінійні явища;
- нелінійна динаміка;
- фізика та механіка руйнування;
- сучасні технології.