

## Оцінка довговічності металевих сплавів в умовах багатовісного малоциклового блокового деформування

С. М. Шукаєв, К. В. Панасовський

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”, Київ, Україна

*Наведено результати теоретичних і експериментальних досліджень у діапазоні малоциклової втоми за нерегулярного багатовісного деформування. Представлено дані випробувань титанових сплавів ВТ9 та ВТ1-0 в умовах двовісного малоциклового регулярного і блокового деформування. Розроблено метод оцінки довговічності металевих сплавів в умовах багатовісного малоциклового блокового деформування, який базується на еквівалентній деформації типу Писаренка–Лебедева та модифікованій моделі Менсона–Хелфорда. Показано переваги запропонованого методу перед іншими підходами до оцінки довговічності металевих сплавів в умовах багатовісного блокового деформування.*

**Ключові слова:** малоциклова втома, пропорційні та непропорційні траєкторії деформування, блокове деформування, критерії граничного стану, модель накопичування пошкоджень.

**Вступ.** Багато конструкцій, таких як трубопроводи хімічного й енергетичного обладнання, посудини високого тиску, елементи авіаційної і космічної техніки та ін., потребують проведення розрахунків на малоциклову втому. Як правило, в процесі експлуатації навантаження конструкцій проходить за складних режимів, параметри яких змінюються у часі. Оцінка втомної довговічності конструкційних матеріалів за таких умов є складною задачею, адже необхідно одночасно враховувати багато чинників, зокрема вид напруженого стану, непропорційність траєкторії циклу деформування, нерегулярність деформування та ін.

Існуючі методи не в повній мірі описують ефекти, які супроводжують нерегулярне багатовісне малоциклове деформування. У багатьох випадках це призводить до суттєвих похибок у розрахунках. Недостатня вивченість поведінки матеріалів за умови одночасного впливу нерегулярності та непропорційності деформування пов'язана з обмеженою кількістю експериментальних досліджень у даному напрямку, що зумовлено складністю проведення таких випробувань. На сьогодні відомо одиничні експериментальні дослідження, в яких вивчається вплив не окремих чинників, а їх спільна дія, зокрема вид напруженого стану, тип траєкторії деформування, чутливість матеріалу до непропорційності деформування, нерегулярність деформування.

У зв'язку з цим проблема адекватного описування процесів непружного деформування та оцінки довговічності матеріалів і конструкцій, що працюють в умовах нерегулярного багатовісного малоциклового деформування, як і раніше, залишається актуальною і потребує подальшого вивчення.

**Експериментальні дослідження.** Об'єктом випробувань служили титанові сплави ВТ1-0 та ВТ9, які широко використовуються в аерокосмічній техніці, суднобудуванні, хімічній промисловості, медицині та інших галузях

народного господарства. Ці матеріали мають унікальний комплекс фізико-механічних, хімічних та експлуатаційних властивостей: висока питома міцність; унікальна корозійна стійкість у різних середовищах; мінімальний серед металів коефіцієнт термічного розширення; досить висока температура плавлення.

Сплав ВТ1-0 є технічно чистим титаном. Жароміцний титановий сплав ВТ9 системи Ti–Al–Mo–Zr–Si відноситься до двофазних  $\alpha + \beta$ -сплавів мартенситного класу.

Експериментальне обладнання, зразки та методика проведення випробувань описані в роботах [1–3].

Зразки випробовувалися у жорсткому режимі навантаження (із контролем за деформаціями). Осьова деформація  $\varepsilon(t)$  і деформація зсуву  $\gamma(t)$  змінювалися за синусоїдальним законом:

$$\varepsilon_x(t) = \varepsilon_a \sin(\omega t), \quad \gamma_{xy}(t) = \gamma_a \sin(\omega t + \theta),$$

де  $\varepsilon_a, \gamma_a$  – амплітуда осьової деформації та деформації зсуву відповідно;  $\omega$  – колова частота;  $\theta$  – кут зсуву фаз.

На рис. 1 у просторі деформацій  $\varepsilon_{xx} - \gamma_{xy}/\sqrt{3}$  зображено базові траєкторії деформування: розтяг–стиск (траєкторія “а”,  $\gamma_a \equiv 0$ ); знакозмінне кручення (траєкторія “т”,  $\varepsilon_a \equiv 0$ ); пропорційне деформування (траєкторія “і”,  $\varepsilon_a = \gamma_a/\sqrt{3}$ ); непропорційне деформування з кутом зсуву фаз  $\theta = \pi/2$  (траєкторія “о”).

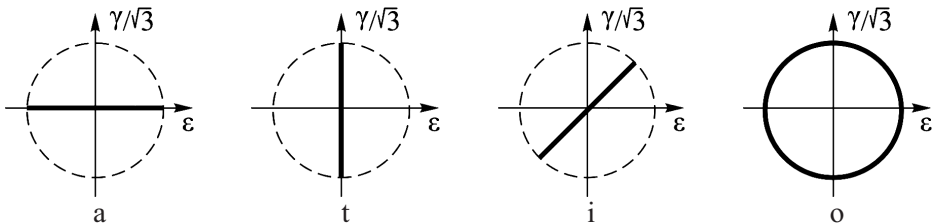


Рис. 1. Базові траєкторії деформування.

Програма експериментальних досліджень включала:

- 1) статичні випробування на розтяг та кручення зразків;
- 2) випробування на малоциклову втому при регулярному деформуванні:
  - одновісний розтяг–стиск;
  - знакозмінне кручення;
  - непропорційне деформування;
- 3) випробування на малоциклову втому при блоковому деформуванні:
  - блокове деформування розтягом–стиском або знакозмінним крученням зі зміною величини амплітуди еквівалентної деформації типу Мізеса  $\varepsilon_M$  за незмінної форми траєкторії деформування (на рис. 2 програми А.1, А.2, Т.1, Т.2, Т.3);
  - двоступеневе блокове деформування зі зміною типу траєкторії деформування за незмінної амплітуди еквівалентної деформації типу Мізеса (на рис. 2 програми В.1, В.2, В.3, В.4, В.5, В.6);

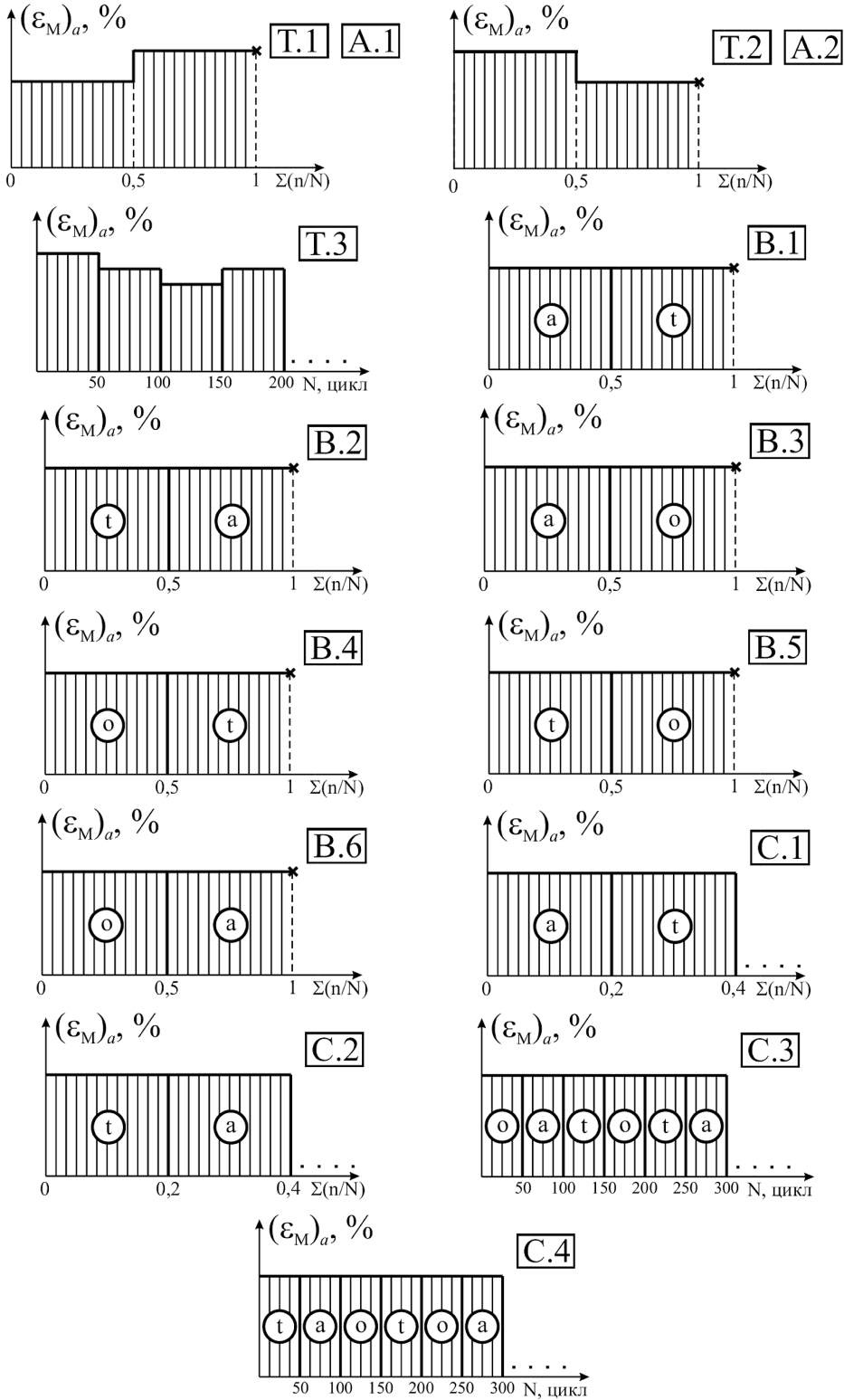


Рис. 2. Програми випробувань титанових сплавів ВТ9 та ВТ1-0 за блокового деформування: *a*, *t*, *o* – відповідно одновісний розтяг–стиск, знакозмінне кручення, непропорційне деформування.

блокове деформування зі зміною величини амплітуди еквівалентної деформації типу Мізеса та типу траєкторії деформування (на рис. 2 програми С.1, С.2, С.3, С.4).

У табл. 1 наведено фізико-механічні характеристики титанових сплавів ВТ9 та ВТ1-0.

Т а б л и ц я 1

**Фізико-механічні характеристики титанових сплавів ВТ9 та ВТ1-0**

Матеріал	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\tau_{0,3}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$E$ , ГПа	$G$ , ГПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
ВТ9	865	465	970	118	44,7	17	45
ВТ1-0	490	270	565	112	39,5	25	55

**Примітка.**  $\sigma_{0,2}$  – границя текучості при розтязі;  $\tau_{0,3}$  – границя текучості при крученні;  $\sigma_B$  – границя міцності;  $E, G$  – модулі пружності;  $\delta$  – відносне подовження;  $\psi$  – відносне звуження.

При дослідженні титанових сплавів за регулярного циклічного деформування було виявлено властивості, які характерні для циклічно стабільних матеріалів.

Т а б л и ц я 2

**Параметри рівнянь Коффіна–Менсона для сплавів ВТ9 та ВТ1-0**

Матеріал	$\sigma'_f$ , МПа	$\epsilon'_f$	$b$	$c$	$\tau'_f$ , МПа	$\gamma'_f$	$b_0$	$c_0$
ВТ9	4248,00	0,233	-0,280	-0,880	876	0,136	-0,075	-0,512
ВТ1-0	796,67	0,047	-0,092	-0,373	482,2	0,326	-0,079	-0,546

В табл. 2 наведено параметри рівнянь Коффіна–Менсона для випадків розтягу–стиску:

$$\epsilon'_a = \epsilon_a^e + \epsilon_a^p = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (1a)$$

і знакозмінного кручення:

$$\gamma'_a = \gamma_a^e + \gamma_a^p = \frac{\tau'_f}{G} (2N_f)^{b_0} + \gamma'_f (2N_f)^{c_0}. \quad (16)$$

Результати випробувань сплавів ВТ9 і ВТ1-0 при блоковому деформуванні представлено відповідно в табл. 3 і 4, де  $n_i$  – число циклів деформування на  $i$ -му ступені;  $N_f$  – число циклів до руйнування зразка.

Аналіз отриманих даних свідчить, що для більшості програм блокового деформування лінійний закон накопичування пошкоджень не виконується. Так, при реалізації програми А.1 при двоступінчатому блоковому деформуванні розтягом–стиском із переходом від низького до високого рівня дефор-

Т а б л и ц я 3

## Результати випробувань титанового сплаву ВТ9 при блоковому деформуванні

Програма випробувань (рис. 2)	Трасекторія деформування (рис. 1)	Параметри процесу деформування			$N_f$ , цикл
		$\varepsilon_a$ , %	$\gamma_a/\sqrt{3}$ , %	$n_i$ , цикл	
A.1	a	0,8/1,0	–	157/136	293
A.1	a	0,6/1,0	–	408/124	532
A.2	a	1,0/0,8	–	98/147	245
T.1	t	–	0,8/1,2	505/187	692
T.2	t	–	1,2/0,8	213/458	671
T.3	t	–	0,8/1,0/1,2/1,0	50	601
T.3	t	–	1,2/1,0/0,8/1,0	50	528
B.5	t	–	1,0	282	390
	o	1,0	1,0	108	
B.6	o	1,0	1,0	61	131
	a	1,0	–	70	
C.1	a	1,0	–	65	510
	t	–	1,0	219	
C.1	a	1,0	–	40	423
	t	–	1,0	130	
C.3	–	1,0	1,0	50	475
C.2	t	–	1,0	176	457
	a	1,0	–	66	
C.2	t	–	1,0	209	377
	a	1,0	–	65	
B.1	a	1,0	–	97	398
	t	–	1,0	301	
B.2	t	–	1,0	398	603
	a	1,0	–	205	
B.3	a	1,0	–	98	184
	o	1,0	1,0	86	
B.4	o	1,0	1,0	80	384
	t	–	1,0	304	

мацій спостерігається збільшення втомної довговічності, тобто має місце так званий ефект “тренування” матеріалу, в той час як із переходом від високого до низького рівня деформацій (A.2) втомна довговічність зменшується. При двоступінчатому крученні (T.1, T.2) процес накопичування пошкоджень близький до лінійного закону.

## Результати випробувань титанового сплаву ВТ1-0 при блоковому деформуванні

Програма випробувань (рис. 2)	Траєкторії деформування (рис. 1)	Параметри процесу деформування			$N_f$ , цикл
		$\varepsilon_a$ , %	$\gamma_a/\sqrt{3}$ , %	$n_i$ , цикл	
A.1	a	0,7/1,1	–	491/214	705
A.2	a	1,1/0,7	–	104/302	406
A.2	a	1,0/0,7	–	200/184	384
T.1	t	–	0,7/1,1	1115/242	1357
T.2	t	–	1,1/0,7	198/805	1003
T.2	t	–	1,1/0,7	198/1253	1451
C.4	–	0,7	0,7	50	1045
B.5	t	–	0,9	428	683
	o	0,9	0,9	255	
B.1	a	0,9	–	228	625
	t	–	0,9	397	
B.2	t	–	0,9	434	809
	a	0,9	–	375	
B.3	a	0,9	–	228	463
	o	0,9	0,9	235	
B.4	o	0,9	0,9	138	605
	t	–	0,9	467	
B.6	o	0,9	0,9	138	293
	a	0,9	–	155	

У результаті випробувань зразків із титанових сплавів ВТ9 та ВТ1-0 за програмою В отримано, що при послідовності “непропорційне–пропорційне” деформування процес накопичування пошкоджень є більш інтенсивним, ніж при послідовності “пропорційне–непропорційне” деформування. Незважаючи на те що під час кожного випробування змінювалася тільки траєкторія деформування, а амплітуда еквівалентної деформації типу Мізеса залишалася сталою величиною, відхилення від лінійного закону накопичування пошкоджень були значними для більшості програм випробувань.

Для програми випробування С.1 спостерігається збільшення втомної довговічності титанового сплаву ВТ9 внаслідок ефекту “тренування” у порівнянні з довговічністю, розрахованою за лінійною гіпотезою накопичування пошкоджень. І навпаки, під час реалізації програми С.2 має місце ефект, протилежний ефекту “тренування”, тобто такий, що призвів до зменшення втомної довговічності титанового сплаву ВТ9 у порівнянні з довговічністю, розрахованою за лінійною гіпотезою накопичування пошкоджень.

Випробування титанового сплаву ВТ9 за програмою С.3 показали, що ефект “тренування” матеріалу суттєво впливає на процес накопичування пошкоджень. Втомна довговічність матеріалу у порівнянні з довговічністю, розрахованою за лінійним законом накопичування пошкоджень, збільшується.

На відміну від титанового сплаву ВТ9, для технічно чистого титану ВТ1-0 при реалізації програми С.4 ефекти “тренування” матеріалу та протилежний йому фактично не спостерігалися, тому процес накопичування пошкоджень був близький до лінійного закону.

**Деформаційний параметр руйнування.** Для оцінки граничного стану металевих сплавів у діапазоні малоциклової втоми за багатовісного пропорційного і непропорційного малоциклового деформування за параметр руйнування було взято розмах еквівалентної деформації [3, 4], який визначався за формулою

$$\Delta \varepsilon_{NP} = (1 + \eta f_{NP}) \Delta \varepsilon_{PL}. \quad (2)$$

Тут  $\eta$  – коефіцієнт чутливості матеріалу до непропорційності деформування,  $\eta = \frac{1}{f_{NP}} \left[ \frac{B}{B'} (N)^{k'-k} - 1 \right]$ ;  $B, k$  – параметри кривої втоми при розтязі–стиску;  $B', k'$  – параметри кривої втоми при непропорційному деформуванні за довільною плоскою траєкторією у просторі деформацій типу Мізеса;  $f_{NP}$  – параметр непропорційності циклу деформування [5], який залежить тільки від геометрії траєкторії деформування,

$$f_{NP} = \frac{\pi}{2T\varepsilon_{I\max}} \int_0^T (|\sin \xi(t)| \varepsilon_I(t) dt), \quad (3)$$

де

$$\varepsilon_I(t) = \begin{cases} |\varepsilon_1(t)| & \text{при } |\varepsilon_1(t)| \geq |\varepsilon_3(t)|, \\ |\varepsilon_3(t)| & \text{при } |\varepsilon_1(t)| < |\varepsilon_3(t)|; \end{cases} \quad \varepsilon_{I\max} = \max[\varepsilon_I(t)];$$

$T$  – тривалість циклу;  $\xi(t)$  – кут між напрямками  $\varepsilon_{I\max}$  і  $\varepsilon_I(t)$ ;  $\varepsilon_1(t), \varepsilon_3(t)$  – значення максимальної та мінімальної головних деформацій у момент часу  $t$ ;  $\Delta \varepsilon_{PL}$  – розмах еквівалентної деформації типу Писаренка–Лебедева,

$$\varepsilon_{PL} = \chi_\varepsilon \frac{\sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}}{\sqrt{2}(1 + \nu^*)} + (1 - \chi_\varepsilon) \left[ \frac{\varepsilon_1 + \frac{\nu^*}{1 - 2\nu^*} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)}{1 + \nu^*} \right]; \quad (4)$$

$$\chi_\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{3} - 1} [2(1 + \nu^*) (\varepsilon_{fs} / \gamma_{fs}) - 1];$$

$\gamma_{fs}$  – гранична амплітуда деформації зсуву в умовах симетричного знакозмінного кручення для заданої довговічності;  $\varepsilon_{fs}$  – гранична амплітуда осьової деформації в умовах симетричного розтягу–стиску для цієї ж довговічності;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  – величини головних деформацій.

Коефіцієнт поперечної деформації  $\nu^*$  розраховується за формулою типу Жукова:

$$\nu^* = 0,5 - \frac{(1 - 2\mu)\sigma_{0,2}}{2E\varepsilon_{PL}}. \quad (5)$$

Зв'язок між довговічністю й отриманим деформаційним параметром може бути записаний у вигляді рівняння Коффіна–Менсона:

$$\frac{\Delta\varepsilon_{NP}}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c. \quad (6)$$

**Модель накопичування пошкоджень.** За базову модель накопичування пошкоджень взято модель Менсона–Хелфорда [6, 7], що базується на кривій пошкоджуваності:

$$D_i = \left( \frac{n_i}{N_{fi}} \right)^q, \quad (7)$$

де  $D_i$  – пошкоджуваність на  $i$ -му ступені деформування;  $n_i$  – число циклів деформування на  $i$ -му ступені;  $N_{fi}$  – число циклів до руйнування зразка за режиму деформування, що відповідає  $i$ -му ступеню;  $q = (N_{f(i-1)} / N_{fi})^\beta$ ;  $\beta = 0,4$ .

Отримані експериментальні дані свідчать про те, що довговічність титанових сплавів ВТ9 та ВТ1-0 суттєво залежить від кута орієнтації траєкторії деформування  $\omega_\varepsilon$  у просторі деформацій типу Писаренка–Лебедева (рис. 3). Величина  $\omega_\varepsilon$  характеризує домінуючий вид деформованого стану і визначається як гострий кут між напрямком осьової деформації та прямою, що проходить через початок координат  $O$  і точку  $A$ , яка відповідає значенню максимальної еквівалентної деформації типу Писаренка–Лебедева в циклі деформування (рис. 3). Величина  $\omega_\varepsilon$  лежить в інтервалі  $0 \dots \pi/2$ .

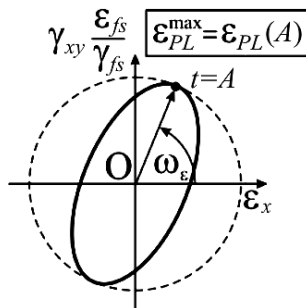


Рис. 3. Схема визначення  $\omega_\varepsilon$ .



При деформуванні розтягом–стиском та (або) знакозмінним крученням можна записати, що

$$\omega_\varepsilon = \arctg \left( \frac{\gamma_{xy}(A) \varepsilon_{fs}}{\varepsilon_x(A) \gamma_{fs}} \right). \quad (8)$$

У випадку, коли величини еквівалентної деформації  $\varepsilon_{PL}^{\max}$  при  $\omega_\varepsilon = 0$  і  $\pi/2$  збігаються, приймаємо  $\omega_\varepsilon = 0$ .

У результаті аналізу експериментальних даних, отриманих для титанових сплавів ВТ9 та ВТ1-0 при випробуваннях за програмою А, було зроблено припущення, що показник  $q$  у формулі (7) залежить не тільки від відношення довговічності  $N_{f1}$  на першому ступені деформування до довговічності  $N_{f2}$  на другому ступені, а й від кута орієнтації траєкторії деформування  $\omega_\varepsilon$ :

$$q = \left( \frac{N_{f1}}{N_{f2}} \right)^\beta + \frac{2\omega_\varepsilon}{\pi} \left[ 1 - \left( \frac{N_{f1}}{N_{f2}} \right)^\beta \right]. \quad (9)$$

Тоді при знакозмінному крученні ( $\omega_\varepsilon = \pi/2$ ) показник  $q = 1$ , тобто модель (7) зводиться до правила лінійного накопичування пошкоджень, що експериментально підтверджено для даних титанових сплавів. У випадку розтягу–стиску ( $\omega_\varepsilon = 0$ ) показник  $q = (N_{f1}/N_{f2})^\beta$ , що відповідає моделі Менсона–Хелфорда (7), яка базується на кривій пошкоджуваності.

Згідно з моделлю Менсона–Хелфорда, константа матеріалу  $\beta = 0,4$ . Проте результати експерименту показують, що для титанових сплавів ВТ9 та ВТ1-0 при послідовності зміни рівня деформації від “високого до низького” показник  $\beta = 0,2$  і  $0,4$  відповідно, а при послідовності від “низького до високого”  $\beta = 1,2$  для обох матеріалів. Тому виникла потреба у коригуванні цієї величини в залежності від послідовності зміни рівня деформації. Із цією метою запропоновано визначати показник  $\beta$  таким чином:

$$\beta = m + a \operatorname{sign}(N_{f1}/N_{f2} - 1). \quad (10)$$

Константи  $m$  і  $a$  визначаються за даними випробувань при двоступінчатому блоковому деформуванні розтягом–стиском із переходом як від “низького до високого” рівня деформації, так і навпаки. Для ВТ9 і ВТ1-0 величини  $m$  і  $a$  відповідно дорівнюють  $0,7$  і  $0,5$ ,  $0,8$  і  $0,4$ .

Запропонована модель накопичування пошкоджень перевірялася на відповідність даним випробувань титанових сплавів ВТ9 і ВТ1-0 та нержавіючої сталі 304SS [8]. Фізико-механічні характеристики сталі:  $\sigma_{0,2} = 405$  МПа,  $\sigma_B = 754$  МПа,  $E = 171$  ГПа,  $G = 66$  ГПа,  $\nu = 0,3$ .

Випробування трубчатих зразків з указаної сталі проводилися при дво-вісному малоцикловому блоковому деформуванні. Базові траєкторії деформування такі самі, як і на рис. 1.

Зразки навантажувалися за чотирма програмами:  $at$ ,  $io$ ,  $oi$ ,  $ta$  (рис. 1). Відносне число циклів деформування на перших ступенях дорівнювало  $0,25$ ;

0,5; 0,75. Це дало можливість проаналізувати вплив відносного числа циклів деформування на процес накопичування пошкоджень.

Результати оцінки довговічності досліджуваних матеріалів за запропонованим методом представлено на рис. 4.

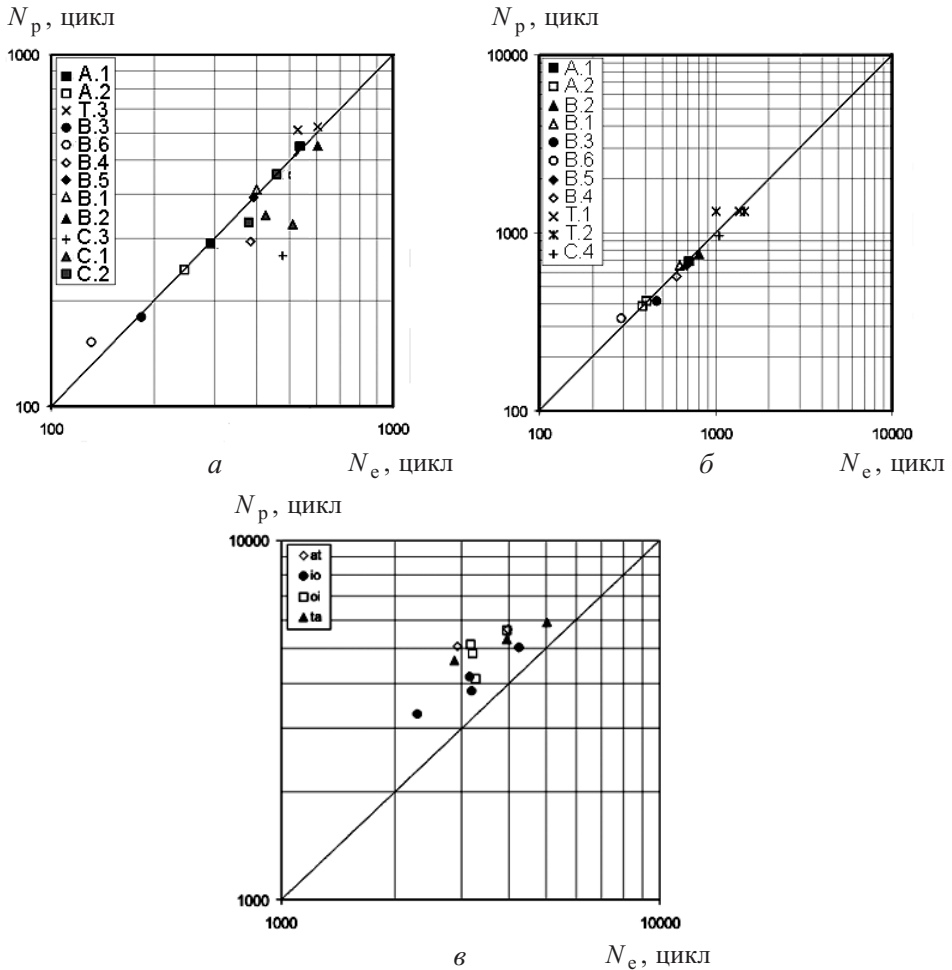


Рис. 4. Порівняння розрахункових за запропонованим підходом довговічностей з експериментальними даними для сплавів VT9 (а), VT1-0 (б) і сталі 304SS (в).

Аналіз результатів розрахунків, виконаних за допомогою запропонованої моделі накопичування пошкоджень та деформаційного параметра руйнування  $\Delta\epsilon_{NP}$ , показав, що при такому підході не враховується вплив чутливості матеріалу до непропорційності деформування  $\eta$  на процеси накопичування пошкоджень. Так, для нержавіючої сталі 304SS всі розрахунки дали завищену оцінку довговічності у порівнянні з експериментом, а для титанових сплавів VT9 та VT1-0, які є малочутливими до непропорційності деформування, отримано добру кореляцію між результатами розрахунків та експерименту.

Наступним кроком у побудові моделі стало врахування впливу типу матеріалу на процес накопичування пошкоджень в умовах нерегулярного багаточисельного малоциклового деформування через величину додаткового зміц-

нення. Для цього було введено функціонал  $A$ , який залежить від ступеня додаткового зміцнення матеріалу  $\alpha$  та відношення величин деформаційного параметра  $(\Delta\varepsilon_{NP})_1/(\Delta\varepsilon_{NP})_2$  на першому і другому етапах деформування. Для знаходження емпіричної залежності  $A = f(\alpha, (\Delta\varepsilon_{NP})_1/(\Delta\varepsilon_{NP})_2)$  використовуються результати експериментальних досліджень нержавіючої сталі 304SS [8]. У результаті апроксимації експериментальних даних методом найменших квадратів отримано

$$A = e^{-2\alpha} + \alpha \lg \frac{(\Delta\varepsilon_{NP})_1}{(\Delta\varepsilon_{NP})_2}. \quad (11)$$

В остаточному вигляді вираз для показника при відносній довговічності в модифікованому рівнянні Менсона–Хелфорда запишемо так:

$$q = A \left\{ \left( \frac{N_{f1}}{N_{f2}} \right)^\beta + \frac{2\omega_\varepsilon}{\pi} \left[ 1 - \left( \frac{N_{f1}}{N_{f2}} \right)^\beta \right] \right\}. \quad (12)$$

Оскільки для нержавіючої сталі 304SS ступінь додаткового зміцнення  $\alpha = 0,6$ , то  $A = e^{-1,2} + 0,6 \lg(\Delta\varepsilon_1/\Delta\varepsilon_2)$ , в той час як для титанових сплавів ВТ9 і ВТ1-0 додаткове зміцнення практично відсутнє, тому величина  $A \approx 1$ , і формула (12) зводиться до (9).

Результати оцінки довговічності нержавіючої сталі 304SS з урахуванням впливу чутливості матеріалу до непропорційності деформування на процеси накопичування пошкоджень представлено на рис. 5.

Для випадку загального багатоступеневого деформування модифікований підхід Менсона–Хелфорда має такий вигляд:

$$\left( \left( \left( \frac{n_1}{(N_f)_1} \right)^{q_1} + \frac{n_2}{(N_f)_2} \right)^{q_2} + \dots + \frac{n_k}{(N_f)_{k-1}} \right)^{q_{k-1}} + \frac{n_k}{(N_f)_k} = 1, \quad (13)$$

де

$$q_{k-1} = \left[ \frac{(N_f)_{k-1}}{(N_f)_k} \right]^{\beta_{k-1}} + \frac{2(\omega_\varepsilon)_{k-1}}{\pi} \left\{ 1 - \left[ \frac{(N_f)_{k-1}}{(N_f)_k} \right]^{\beta_{k-1}} \right\};$$

$$\beta_{k-1} = m + a \operatorname{sign} \left[ \frac{(N_f)_{k-1}}{(N_f)_k} - 1 \right]; \quad (\omega_\varepsilon)_{k-1} = \operatorname{arctg} \left[ \frac{(\gamma_a)_{k-1} \varepsilon_{fs}}{(\varepsilon_a)_{k-1} \gamma_{fs}} \right];$$

$k = 1, 2, 3$  – номер етапу деформування.

Використання рівняння (13) спільно з деформаційним параметром (2) дозволило розробити метод оцінки довговічності металевих сплавів при багатовісному малоцикловому блоковому деформуванні.

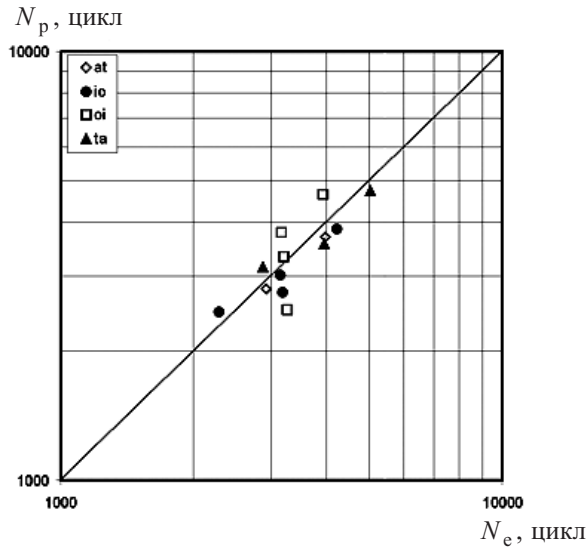


Рис. 5. Порівняння розрахункових за запропонованим підходом довговічностей з експериментальними даними для сталі 304SS з урахуванням впливу величини додаткового зміцнення матеріалу.

Для реалізації запропонованого методу необхідно.

1. Провести базові випробування на малоциклову втому в умовах регулярного деформування розтягом–стиском та знакозмінним крученням. За результатами випробувань визначити параметри рівнянь Коффіна–Менсона (1а) і (1б) та еквівалентної деформації типу Писаренка–Лебедева (4).

2. Визначити параметр непропорційності деформування  $f_{NP}$ . Для цього необхідно знати лише траєкторію циклу деформування.

3. Визначити коефіцієнт чутливості матеріалу до непропорційності деформування  $\eta$ , для чого необхідно мати криву малоциклової втоми на розтяг–стиск та криву малоциклової втоми за довільною непропорційною траєкторією деформування (для досягнення більшої точності рекомендується використовувати “колову” траєкторію).

4. За діаграмами циклічного деформування, одержаними з випробувань при пропорційному та непропорційному малоцикловому деформуванні, визначити ступінь додаткового зміцнення матеріалу  $\alpha$  при непропорційному деформуванні.

5. Провести випробування на одновісний розтяг–стиск при блоковому деформуванні зі зміною рівня деформації для визначення показника степеня  $\beta$  в модифікованому підході Менсона–Хелфорда.

## Висновки

1. Показано, що процес накопичування пошкоджень залежить від виду напруженого стану. Так, при знакозмінному крученні процес найкраще описується лінійною гіпотезою. При одновісному розтязі–стиску він має нелінійний характер, і для обох матеріалів ступінь відхилення від гіпотези лінійного накопичування пошкоджень при послідовності зміни рівня деформації від “низького до високого” є більшою, ніж при послідовності від “високого до

низького”. Встановлено, що пошкодження при послідовності “непропорційне–пропорційне” деформування накопичуються більш інтенсивно, ніж при послідовності “пропорційне–непропорційне”.

2. Модифікована модель накопичування втомних пошкоджень Менсона–Хелфорда для режимів багатовісного деформування дозволяє описувати процес накопичування пошкоджень у залежності від типу траєкторії деформування (розтяг–стиск, знакозмінне кручення, непропорційне деформування), враховувати особливості поведінки металевих сплавів при зміні типу траєкторії і рівня деформації.

Розроблений на її основі метод оцінки втомної довговічності металевих сплавів із використанням деформаційного параметра типу Писаренка–Лебедева дозволяє враховувати вид напруженого стану, ефекти непропорційного та нерегулярного деформування.

Перевірка відповідності результатів розрахунків, виконаних за запропонованим методом, даним випробувань металевих сплавів різного типу на малоциклову втому в умовах багатовісного пропорційного і непропорційного блокового деформування засвідчила високу ефективність та надійність методу.

## Резюме

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований в диапазоне малоциклового усталости при нерегулярном многоосном деформировании. Представлены данные испытаний титановых сплавов ВТ9 и ВТ1-0 в условиях двухосного малоциклового регулярного и блочного деформирования. Разработано метод оценки долговечности металлических сплавов в условиях многоосного малоциклового блочного деформирования, который базируется на эквивалентной деформации типа Писаренко–Лебедева и модифицированной модели Мэнсона–Хелфорда. Показаны преимущества предложенного метода перед другими подходами к оценке долговечности металлических сплавов в условиях многоосного блочного деформирования.

1. *Можаровский Н. С., Заховайко А. А., Рудаков К. Н.* Установка и методика исследования закономерностей деформирования и разрушения материалов при криволинейных траекториях нагружения в условиях сложного напряженного состояния // Пробл. прочности. – 1981. – № 7. – С. 22 – 27.
2. *Можаровский Н. С., Шукаев С. Н., Рудаков К. Н. и др.* Испытательный комплекс и методика исследования статической и малоциклового прочности конструкционных материалов при простом и сложном нагружении в условиях плоского напряженного состояния // Там же. – 1986. – № 7. – С. 105 – 110.
3. *Гладський М. М.* Метод оцінювання малоциклової міцності металевих сплавів при складному навантажуванні: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Київ, 2006. – 20 с.
4. *Шукаев С. Н., Панасовский К. В., Гладский М. Н.* Оценка долговечности металлических сплавов при непропорциональном малоциклового нагружении // Пробл. прочности. – 2007. – № 4. – С. 31 – 39.

5. *Itoh T., Sakane M., Ohnami M., and Socie D. F.* Nonproportional low cycle fatigue criterion for type 304 stainless steel // *ASME J. Eng. Mater. Tech.* – 1995. – **117**, No. 3. – P. 285 – 292.
6. *Manson S. S. and Halford G. R.* Practical implementation of the double linear damage rule and damage curve approach for treating cumulative fatigue damage // *Int. J. Fract.* – 1981. – **17**, No. 2. – P. 169 – 192.
7. *Manson S. S. and Halford G. R.* Re-examination of curative fatigue damage analysis – an engineering perspective // *Eng. Fract. Mech.* – 1986. – **25**. – P. 539 – 571.
8. *Chen X., Jin D., and Kim K. S.* Fatigue life prediction of type 304 stainless steel under sequential biaxial loading // *Int. J. Fatigue.* – 2006. – **28**. – 289 – 299.

Поступила 05. 02. 2010