

УДК 539.388.1

Можаровська Тамара Миколаївна

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,
доцент кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів*

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Можаровская Тамара Николаевна

кандидат технических наук, старший научный сотрудник,

доцент кафедры динамики и прочности машин

и сопротивления материалов

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Mozharovska Tamara

Candidate of Engineering Science, Senior Researcher,

Associate Professor of Department of Dynamics and Strength of

Machines and Materials Resistance

National Technical University of Ukraine

"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

**ПЛАСТИЧНЕ ДЕФОРМУВАННЯ ТЕПЛОСТІЙКИХ СТАЛЕЙ В
УМОВАХ ПОВЗУЧОСТІ ТА СКЛАДНОГО НАПРУЖЕНОГО СТАНУ
ПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ
СТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ И СЛОЖНОГО
НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ
PLASTIC DEFORMATION OF HEAT-RESISTANT STEELS UNDER
CREEP AND COMPLEX STRESS CONDITIONS**

Анотація. В статті досліджено закономірності пластичного деформування сталі 15Х2МФА ($T=550^{\circ}\text{C}$) в умовах повзучості та складного напруженого стану. Представлено експериментально обґрунтоване рівняння стану, що описує повзучість сталі з урахуванням впливу виду напруженого стану на інтенсивність деформацій повзучості сталі при довготривалому статичному навантаженні.

Ключові слова: повзучість, вид напруженого стану, довготривале статичне навантаження.

Аннотация. В статье исследованы закономерности пластического деформирования стали 15Х2МФА ($T=550^{\circ}\text{C}$) в условиях ползучести и сложного напряженного состояния. Представлено экспериментально обоснованное уравнение состояния, описывающее ползучесть стали с учётом влияния вида напряженного состояния на интенсивность деформаций ползучести стали при длительном статическом нагружении.

Ключевые слова: ползучесть, вид напряженного состояния, длительное статическое нагружение.

Summary. In the article the regularities of plastic deformation of steel 15Х2МФА ($T = 550^{\circ}\text{C}$) under conditions of creep and complex stressed state are investigated. The experimentally substantiated state equation describing the creep of steel is presented, taking into account the influence of the type of the stressed state on the intensity of steel creep deformations under long-term static loading.

Key words: creep, type of stressed state, long-term static load.

Більшість елементів конструкцій сучасного машинобудування працюють в умовах підвищених температур, складного напруженого стану та піддаються довготривалій дії різних комбінацій зовнішніх сил.

Удосконалення методів розрахунку елементів конструкцій та підвищення ефективності їх роботи, з точки зору їх міцності та довговічності, є однією з актуальних проблем в сучасному машинобудуванні.

Практичний інтерес представляють дослідження закономірностей деформування та руйнування конструкційних матеріалів в умовах повзучості з урахуванням виду напруженого стану.

При визначенні напружено-деформівного стану елементів конструкцій, які працюють довготривалий час в умовах складного напруженого стану, в якості фізичних рівнянь, як правило, використовують рівняння зв'язку між компонентами тензора деформацій і компонентами тензора напружень [1-5]:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2G} \left(\sigma_{ij} - \delta_{ij} \frac{3\mu}{1+\mu} \sigma_0 \right) + \frac{3}{2} \frac{\varepsilon_{ic}}{\sigma_i} (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_0) \quad (1)$$

При цьому співвідношення між інтенсивністю напружень σ_i та інтенсивністю деформацій повзучості ε_{ic} в часі приймаються за однією з гіпотез [2; 6]:

$$\varepsilon_{ic} = \Omega(t) \sigma_i^n; \quad (2)$$

$$\varepsilon_{ic} = \left[\frac{Lt}{\beta} \right]^\beta \exp \left[\frac{\beta \sigma_i}{D} \right], \quad (3)$$

де $\Omega(t)$ – функція часу; β, n, L, D – постійні матеріалу при заданій температурі;

$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$ – інтенсивність напружень [7].

Згідно з вище наведених гіпотез (2), (3) впливає, що інтенсивність деформацій повзучості ε_{ic} залежить тільки від інтенсивності напружень σ_i . Це означає, що залежність $\varepsilon_{ic} \div t$ при $\sigma_i = const$ та температурі випробувань $T = const$ повинна бути представлена єдиною кривою інваріантною до виду напруженого стану, а кут виду девіатора напружень Ψ_σ протягом всього активного навантаження

$$\Psi_\sigma = \frac{1}{3} \arccos \left[\frac{27J_3(D_\sigma)}{2\sigma_i^3} \right] = const, \quad (4)$$

де $J_3(D_\sigma)$ – третій інваріант девіатора напружень.

Однак, експериментальні дослідження, які наведені в літературі [8-13 та ін.], свідчать про вплив на ізотермічні криві повзучості при $\sigma_i = const$ виду напруженого стану.

В представлений статті приведені основні результати досліджень процесів пружно-пластичного деформування сталі 15X2МФА ($T=550^\circ\text{C}$) в умовах повзучості та складного напруженого стану при довготривалому статичному навантаженні та рівняння стану, що описує повзучість теплостійкої сталі з урахуванням виду напруженого стану на її ресурс.

Експериментальні дослідження на повзучість сталі були проведені на тонкостінних циліндричних зразках однієї плавки за спеціально розробленою програмою [14] в пружно-пластичній області ($\sigma_i > \sigma_{iT}$) в координатах А.А. Ільюшина [1], які навантажувались одночасно розтягуючою силою та крученням.

Напружений стан тонкостінного циліндричного зразка при одночасному навантаженні осьовою силою та крутним моментом оцінюється шаровим тензором σ_0 , другим $J_2(D_\sigma)$, та третім $J_3(D_\sigma)$ інваріантами девіатора напружень, які в даному випадку [15] пов'язані з нормальними та дотичними напруженнями формулами виду:

$$\begin{aligned}\sigma_0 &= \frac{\sigma_{zz}}{3}; \\ J_2(D_\sigma) &= \frac{1}{3}\sigma_{zz}^2 + \tau_{z\theta}^2; \\ J_3(D_\sigma) &= \frac{2}{27}\sigma_{zz}^3 + \frac{1}{3}\sigma_{zz}\tau_{z\theta}^2.\end{aligned}\tag{5}$$

Вирази (5) використані для конкретизації рівняння стану, що описує повзучість конструкційного матеріалу (3):

$$\varepsilon_{ic} = \Psi_1[\sigma_0, J_2(D_\sigma), J_3(D_\sigma)]\tag{6}$$

В нашому випадку досягнення одного і того ж значення $\sigma_i = const$ може бути здійснене різними траєкторіями пропорційного навантаження, які характеризуються кутом φ (рис. 1):

$$\varphi = \arctg \frac{\sqrt{3}\tau_{z\theta}}{\sigma_{zz}} \quad (7)$$

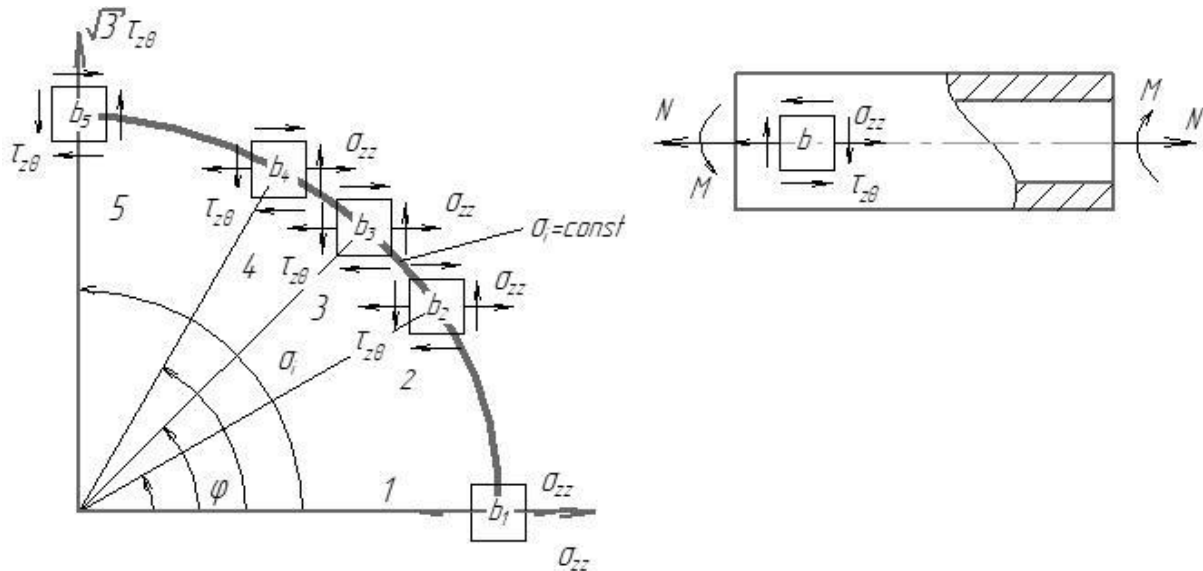


Рис. 1. Траєкторії пропорційного навантаження тонкостінного циліндричного зразка осьовою силою та крутним моментом

Крива b_1, b_2, b_3, b_4, b_5 – крива однакового рівня інтенсивності напружень

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{zz}^2 + (\sqrt{3}\tau_{z\theta})^2} \quad (8)$$

Для двомірної задачі, що розглядається, компоненти тензора напружень мають вигляд:

$$\sigma_{zz} = \sigma_i \cos \varphi ; \quad (9)$$

$$\tau_{z\theta} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_i \sin \varphi,$$

а головні напруження:

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} \sigma_i \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{4}{3} \operatorname{tg}^2 \varphi}}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}} ;$$

$$\sigma_2 = 0 ; \quad (10)$$

$$\sigma_3 = \frac{1}{2} \sigma_i \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{4}{3} \operatorname{tg}^2 \varphi}}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}};$$

Тоді вирази (5) з урахуванням (9) можна записати у вигляді:

$$\sigma_0 = \frac{1}{3} \sigma_i \cos \varphi;$$

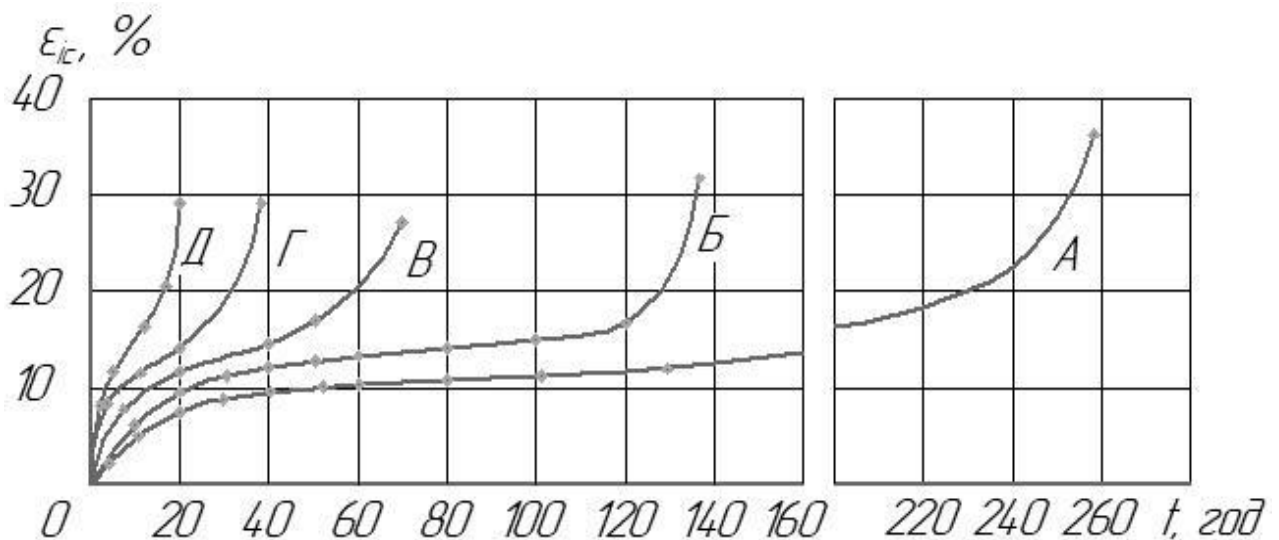
$$J_2(D_\sigma) = \frac{1}{3} \sigma_i^2; \quad (11)$$

$$J_3(D_\sigma) = \frac{2}{27} \sigma_i^3 \frac{(1 + \frac{3}{2} \operatorname{tg}^2 \varphi)}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}};$$

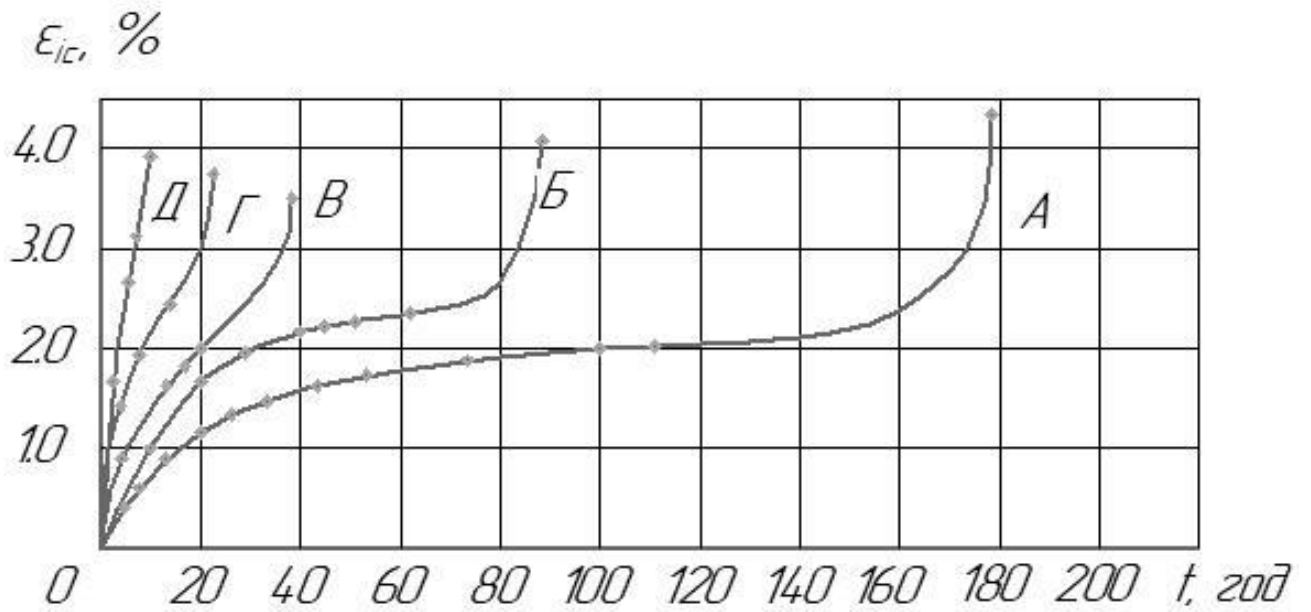
Таким чином, вид напруженого стану циліндричного тонкостінного зразка при активному пропорційному навантаженні у двомірному просторі повністю визначається інтенсивністю напружень σ_i та кутом φ , а рівняння (6) можна представити у вигляді:

$$\varepsilon_{ic} = f^*(t) \Phi_1^*(\sigma_i, \varphi) \quad (12)$$

На рис. 2 а, б, в, г представлені криві повзучості для сталі 15Х2МФА при $T=550^\circ\text{C}$ в умовах плоского напруженого стану при деяких значеннях σ_i, φ .

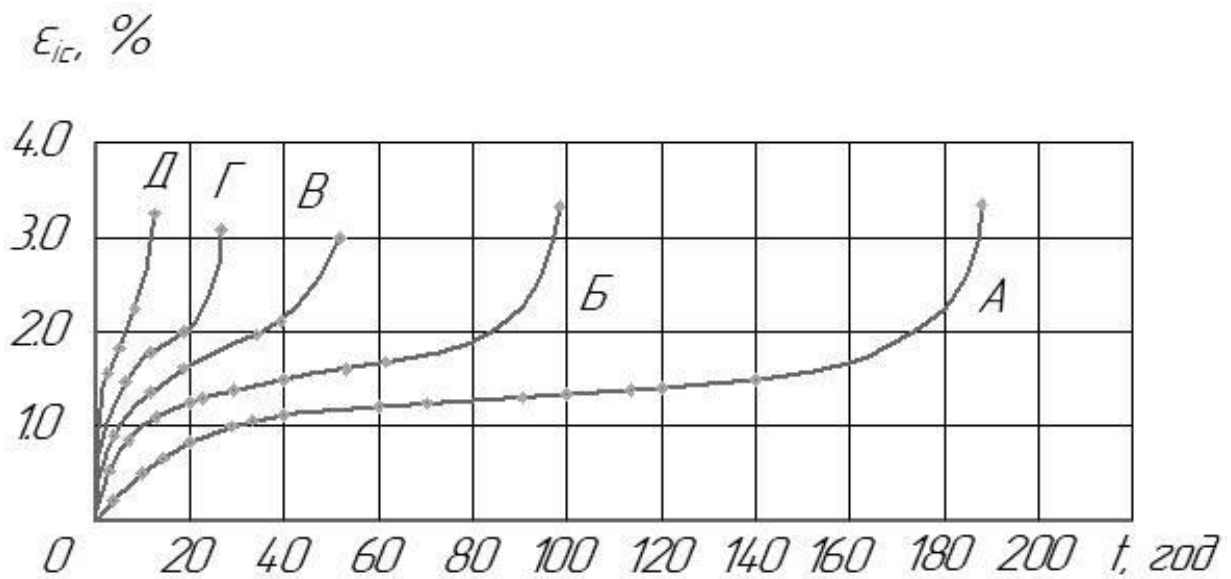


(a)

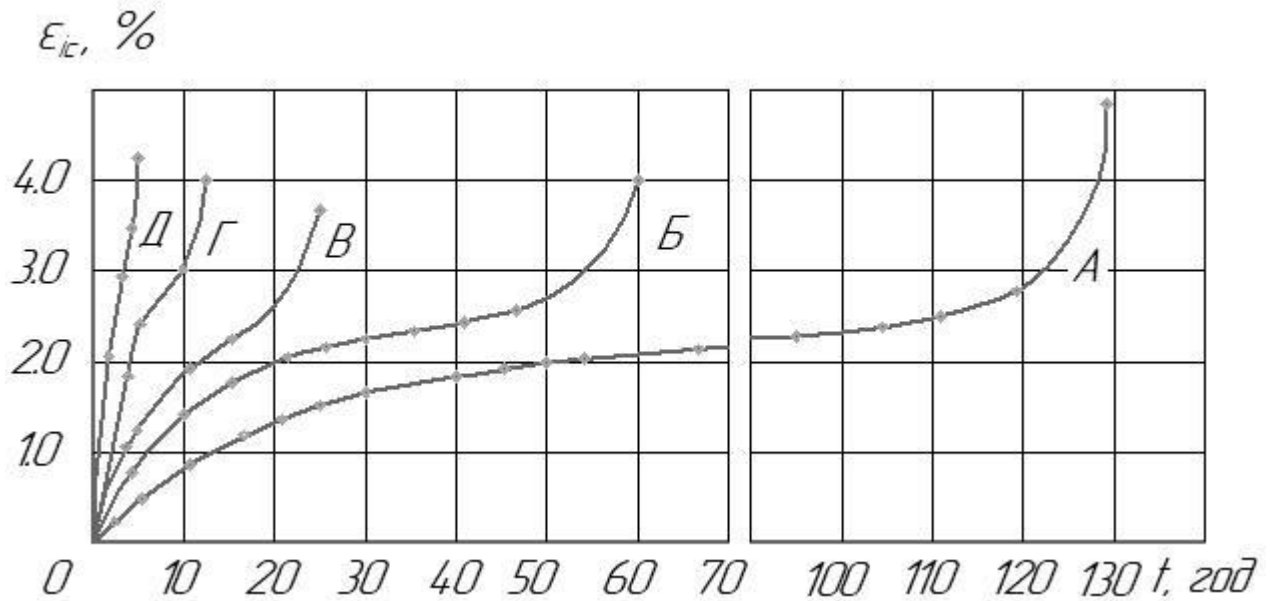


(а)

Рис. 2 а, б Криві повзучості сталі 15Х2МФА ($T=550^{\circ}\text{C}$) при $\varphi=0$ (а) і $\varphi=\pi/3$ (б):
А – $\sigma_i = 340$ МПа; Б - $\sigma_i = 360$ МПа; В – $\sigma_i = 380$ МПа; Г – $\sigma_i = 400$ МПа;
Д – $\sigma_i = 420$ МПа.



(б)



(г)

Рис. 2 в, г Криві повзучості сталі 15X2МФА ($T=550^{\circ}\text{C}$) при $\varphi = -\pi/4$ (в) і $\varphi = \pi/2$ (г):
 А – $\sigma_i = 340$ МПа; Б - $\sigma_i = 360$ МПа; В – $\sigma_i = 380$ МПа; Г – $\sigma_i = 400$ МПа;
 Д – $\sigma_i = 420$ МПа.

Обробка експериментальних даних показала, що всі криві повзучості можуть бути описані рівнянням виду:

$$\varepsilon_{ic}(\sigma_i, \varphi, t) = \left[\frac{L(\varphi)t}{\beta(\varphi)} \right]^{\beta(\varphi)} \exp \left[\frac{\beta(\varphi)\sigma_i}{D(\varphi)} \right], \quad (13)$$

де $L(\varphi), \beta(\varphi), D(\varphi)$ – параметри, що характеризують здатність матеріалу до пластичного деформування при повзучості залежно від виду напруженого стану [6; 16].

Для сталі 15X2МФА виявилось, що параметр β є величиною постійною ($\beta=0,43$) і не залежить від виду напруженого стану. Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що параметри $L(\varphi) \approx L(-\varphi)$ і $D(\varphi) \approx D(-\varphi)$ тобто може бути встановлена симетрія властивостей повзучості сталі і, як результат, можна скоротити число експериментальних досліджень вдвічі.

В таблиці 1 наведені деякі результати розрахункових та експериментальних значень деформацій повзучості сталі 15X2МФА ($T=550^{\circ}\text{C}$) для деяких значень σ_i та φ .

**Експериментальні та розрахункові значення ε_{ic} для сталі 15X2МФА
при $T=550^{\circ}\text{C}$**

σ_i , МПа	φ , рад	ε_{ic}	t, ГОД								
			5	15	25	40	50	80	130	150	
340	0	Експ.	0,27	0,58	0,75	0,80	0,87	1,08	1,26	1,39	
		Розр.	0,32	0,56	0,74	0,84	0,85	1,14	1,34	1,42	
		$\pm\Delta$, %	18,52	1,54	3,95	2,30	7,07	2,54	6,35	2,16	
	$-\frac{\pi}{6}$	Експ.	0,29	0,64	0,82	1,05	1,15	1,35	1,58	1,64	
		Розр.	0,38	0,68	0,87	1,05	1,14	1,40	1,62	1,68	
		$\pm\Delta$, %	31,03	6,25	6,10	0	0,87	3,70	2,53	2,44	
	$-\frac{\pi}{4}$	Експ.	0,38	0,69	0,89	1,18	1,25	1,47	1,55	-	
		Розр.	0,42	0,74	0,98	1,15	1,30	1,58	1,78	-	
		$\pm\Delta$, %	10,53	7,25	10,11	5,93	4,00	7,48	4,84	-	
	$+\frac{\pi}{3}$	Експ.	0,49	0,86	1,32	1,51	1,75	1,90	-	-	
		Розр.	0,59	0,98	1,49	1,74	1,89	2,27	-	-	
		$\pm\Delta$, %	20,41	13,95	12,88	15,2	8,00	19,5	-	-	
	$-\frac{\pi}{2}$	Експ.	0,57	1,18	1,49	1,75	1,81	2,10	-	-	
		Розр.	0,78	1,23	1,52	1,87	2,01	2,31	-	-	
		$\pm\Delta$, %	36,80	4,24	2,01	2,86	11,1	10,00	-	-	
	360	0	Експ.	0,48	0,77	1,00	1,25	1,30	1,42	-	-
			Розр.	0,50	0,82	1,04	1,30	1,35	1,53	-	-
			$\pm\Delta$, %	4,17	6,49	4,00	4,00	3,85	7,75	-	-
$+\frac{\pi}{6}$		Експ.	0,52	1,01	1,29	1,50	1,55	1,75	-	-	
		Розр.	0,61	0,98	1,31	1,50	1,60	1,84	-	-	
		$\pm\Delta$, %	17,24	2,97	1,55	0	3,23	5,14	-	-	
$-\frac{\pi}{4}$		Експ.	0,56	1,12	1,28	1,50	1,55	-	-	-	
		Розр.	0,73	1,21	1,41	1,69	1,75	-	-	-	
		$\pm\Delta$, %	30,36	8,04	10,16	12,7	12,9	-	-	-	
$+\frac{\pi}{3}$		Експ.	0,68	1,65	1,81	2,10	2,25	-	-	-	
		Розр.	0,89	1,59	1,93	2,25	2,65	-	-	-	
		$\pm\Delta$, %	30,88	3,64	6,63	7,14	13,3	-	-	-	
$-\frac{\pi}{2}$		Експ.	0,95	1,72	2,15	2,49	-	-	-	-	
		Розр.	1,04	1,81	2,30	2,70	-	-	-	-	
		$\pm\Delta$, %	9,47	5,23	6,98	8,43	-	-	-	-	

Якщо ввести поняття безрозмірних параметрів у вигляді:

$$\frac{L(\varphi)}{L(0)} = \Phi(\varphi); \quad \frac{D(\varphi)}{D(0)} = \Omega(\varphi); \quad \frac{\beta(\varphi)}{\beta(0)} = \eta(\varphi) \cong 1, \quad (14)$$

де $L(0), D(0), \beta(0)$ – параметри матеріалу, що визначаються з експериментальних досліджень при одновісному розтягненні; $\Omega(\varphi), \Phi(\varphi)$ – параметри, що залежать від виду напруженого стану, то рівняння (13) прийме вигляд:

$$\varepsilon_{ic}(\sigma_{e\phi}(\sigma_i, \varphi), t) = \left[\frac{L(0)t}{\beta(0)} \right]^{\beta(0)} \exp \left[\frac{\beta(0)\sigma_{e\phi}}{D(0)} \right], \quad (15)$$

де $\sigma_{e\phi}$ – ефективне напруження, що відповідає однаковому значенню інтенсивності деформацій повзучості при різних значеннях величини кута φ :

$$\sigma_{e\phi} = \sigma_i \left[\frac{1}{\frac{D(\frac{\pi}{2})}{D(0)} + \left[1 - \frac{D(\frac{\pi}{2})}{D(0)} \right] z^2(\varphi)} + \frac{D(0)}{\sigma_i} \ln \left\{ \frac{L(\frac{\pi}{2})}{L(0)} + \left[1 - \frac{L(\frac{\pi}{2})}{L(0)} \right] z^2(\varphi) \right\} \right], \quad (16)$$

а $z(\varphi)$ – універсальна функція, що характеризує вид напруженого стану:

$$z(\varphi) = \frac{1 + \frac{3}{2}tg^2\varphi}{\sqrt{(1 + tg^2\varphi)^3}} \quad (17)$$

Отримане рівняння стану (15), що описує повзучість теплостійкої сталі 15Х2МФА ($T=550^\circ\text{C}$) при довготривалому статичному пропорційному навантаженні розтягненням та крученням, дозволить врахувати вплив виду напруженого стану на одну з характеристик повзучості ε_{ic} , та підвищити міцність і довговічність елементів конструкцій сучасного машинобудування.

Література

1. Ильющин А.А. Пластичность. Основы общей математической теории. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. 272 с.
2. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975. 387 с.
3. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. – М.: Изд-во иностр. лит., 1954, т.І. 647 с.
4. Писаренко Г.С., Мажаровський Н.С. Уравнение и краевые задачи теории пластичности и ползучести. – Киев: Наук. думка, 1981. 496 с.

5. Шевченко Ю.Н., Терехов Р.Г. Физические уравнения термовязкопластичности. – Киев: Наук. думка, 1982. 227 с.
6. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. – М.: Наука, 1966. – 752с.
7. Писаренко Г.С., Агаров В.А., Квитка А.Л. и др. Сопротивление материалов. – Киев: Гос. изд-во техн. лит. УССР, 1963. 786 с.
8. Горев Г.В., Рубанов В.В., Соснин О.В. О построении уравнений ползучести для материалов с различными свойствами на растяжение и сжатие. Прикл. матем. и техн. физика, 1979. № 4. С. 121-128.
9. Ермаков В.П., Рабинович А.И. Ползучесть теплопрочного алюминиевого сплава при сложном напряженном состоянии. Прикл. механика и техн. физика. 1971. №2. С. 83-86.
10. Можаровский Н.С., Антипов Е.А., Бобырь Н.И. Ползучесть и долговечность материалов при программном нагружении. – Киев: Изд-во Вища школа, 1982. 130 с.
11. Можаровский Н.С., Бобырь Н.И. Влияние вида напряженного состояния на характеристики ползучести и пластичности материала в зависимости от формы цикла изменения интенсивности напряжений. Пробл. прочности, 1978. № 9. С. 8-11.
12. Наместников В.С. О ползучести при постоянных нагрузках в условиях сложного напряженного состояния. Изв. АН СССР, ОТН, 1957. № 4. С. 141-146.
13. Наместников В.С. О ползучести при сложном напряженном состоянии. – В кн.: Ползучесть и длительная прочность. Новосибирск, изд-во СО АН СССР, 1963. С. 100-109.
14. Можаровская Т.Н. Программа и методика исследования ползучести и длительной прочности материалов с учетом вида девиатора напряжений и истории нагружения. – Пробл. прочности, 1984. № 11. С. 83-88.

15. Можаровская Т. Н., Гигиняк Ф. Ф. О взаимосвязи между девиатором пластических деформаций и девиатором напряжений при одновременном растяжении и кручении тонкостенного цилиндра в зависимости от вида девиатора напряжений предварительного нагружения. – Пробл. прочности, 1981. №1. С. 45-49.
16. Зельдович Я. Б. Мышкис А. Д. Элементы прикладной математики. М.: Наука, 1972. 592 с.