



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **71218** (13) **U**
(51) МПК
G01N 3/08 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2011 14458	(72) Винахідник(и): Голуб Владислав Петрович (UA), Желдубовський Олександр Володимирович (UA), Фернаті Павло Вікторович (UA)
(22) Дата подання заявки: 06.12.2011	
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 10.07.2012	
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 10.07.2012, Бюл.№ 13	(73) Власник(и): ІНСТИТУТ МЕХАНІКИ ІМ. С.П.ТИМОШЕНКА НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ, вул. Нестерова, 3, м. Київ-57, 03057 (UA)

(54) СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯДЕР СПАДКОВОСТІ НЕЛІНІЙНО-В'ЯЗКОПРУЖНИХ МАТЕРІАЛІВ

(57) Реферат:

Спосіб визначення параметрів ядер спадковості нелінійно-в'язкопружних матеріалів полягає у тому, що групу зразків досліджуваного матеріалу випробовують на повзучість, вимірюють дискретні величини часу навантаження t та деформації повзучості ϵ , будують криві та ізохронні діаграми повзучості. Другу групу зразків матеріалу випробовують на одновісний короткотривалий розтяг, будують діаграму миттєвого деформування, встановлюють закон подібності між ізохронними діаграмами і діаграмою миттєвого деформування, і визначають параметри ядра спадковості.

UA 71218 U

Запропоноване технічне рішення належить до галузі механічних випробувань матеріалів, а безпосередньо до способів випробувань зразків матеріалів на повзучість та релаксацію напружень і визначення параметрів ядер спадковості, на аналітичному представленні котрих базуються методи вирішення задач нелінійної в'язкопружності.

Характеристики повзучості і релаксації напружень у вигляді відповідних графіків і діаграми миттєвого деформування, а також методологія визначення параметрів ядер спадковості, що побудована на основі запропонованого способу, можуть бути використані у дослідній практиці конструкторських бюро та заводських лабораторій підприємств авіаційного, автомобільного та залізничного транспорту, а також під час обґрунтування призначення та прогнозування довговічності матеріалів, що працюють довготривалий час за умов статичного навантаження та високих температур.

Відомим є спосіб визначення параметрів ядер спадковості нелінійно-в'язкопружних матеріалів [1], згідно з яким групу зразків матеріалу випробовують на повзучість за фіксованої температури на декількох рівнях напружень, вимірюють дискретні величини часу навантаження t та деформації повзучості ϵ , що їм відповідають, будують криві повзучості у координатах " ϵ - t ", визначають базову криву повзучості, що зазвичай відповідає найбільшому рівню із напружень, для яких побудовані криві ϵ - t , формулюють умову подібності цих кривих і на цій підставі шляхом апроксимації експериментальної базової кривої повзучості нелінійним інтегральним рівнянням та мінімізації функціонала коефіцієнта подібності визначають параметри ядра спадковості.

Однак цей спосіб має недолік внаслідок його невисокої точності визначення в'язкопружних характеристик, що є наслідком невизначеності при виборі базової кривої повзучості, відносно якої формулюється умова подібності, а також при виборі самої функції подібності. Окрім того, для багатьох матеріалів подібність первинних кривих повзучості може бути взагалі відсутньою.

Відомий також, вибраний як прототип, спосіб визначення параметрів ядер спадковості нелінійно-в'язкопружних матеріалів [2], згідно з яким групу зразків матеріалу випробовують на повзучість за фіксованої температури на декількох рівнях напружень, вимірюють дискретні величини часу навантаження t та деформації повзучості ϵ , що їм відповідають, будують криві повзучості у координатах " ϵ - t ", на їх основі будують ізохронні діаграми повзучості у координатах " σ - ϵ ", формулюють функцію подібності ізохронних діаграм відносно вибраної базової ізохронної діаграми і шляхом мінімізації квадратичного відхилення розрахункових і експериментальних величин функції подібності визначають параметри ядра спадковості.

Відомий спосіб має недолік внаслідок його недостатньої точності, що обумовлено загальними труднощами у визначенні параметрів ядер спадковості, пов'язаними з неоднозначністю вибору базової ізохронної діаграми, що призводить до невизначеності при ідентифікації параметрів ядер.

В основу корисної моделі поставлена задача: у способі визначення параметрів ядер спадковості нелінійно-в'язкопружних матеріалів шляхом випробування групи зразків на короткотривалий одновісний розтяг, побудови діаграми миттєвого деформування, ідентифікації нелінійного закону залежності деформації від напруження, який визначає нелінійність процесу повзучості, встановлення подібності між ізохронними діаграмами повзучості і діаграмою миттєвого деформування та розрахунку дискретних величин функції подібності, усунення існуючої в найближчому аналозі неоднозначності у визначенні параметрів ядер спадковості за рахунок використання діаграми миттєвого деформування, як базової ізохрони, що призводить до модифікації умови подібності ізохронних діаграм повзучості внаслідок чого підвищується точність визначення параметрів ядер.

Поставлена задача вирішується за рахунок того, що у способі визначення параметрів ядер спадковості нелінійно-в'язкопружних матеріалів, що містить випробування групи зразків матеріалу на повзучість за фіксованої температури на декількох рівнях напружень, вимірювання дискретних величин часу навантаження t та деформації повзучості ϵ , що їм відповідають, побудову кривих повзучості у координатах " ϵ - t ", і на їх основі побудову ізохронних діаграм повзучості у координатах " σ - ϵ ", формулювання функції подібності ізохронних діаграм відносно вибраної базової ізохронної діаграми і шляхом мінімізації квадратичного відхилення розрахункових і експериментальних величин функції подібності, визначення на цій підставі параметрів ядра спадковості, згідно із корисною моделлю, групу зразків матеріалу випробовують на одновісний короткотривалий розтяг, будують діаграму миттєвого деформування, ідентифікують нелінійний закон залежності деформації від напруження, що визначає нелінійність процесу повзучості, встановлюють закон подібності між ізохронними діаграмами повзучості і діаграмою миттєвого деформування, яку використовують як базову ізохронну, розраховують дискретні значення функції подібності і на цій підставі визначають параметри ядра спадковості, що підвищує точність способу за рахунок використання у

розрахунках параметрів діаграми миттєвого деформування, що дозволяє суттєво знизити вплив динамічних ефектів на результати вимірювань експериментальних величин, які характеризують процес повзучості.

Запропонований спосіб розроблений для нелінійно-в'язкопружних матеріалів, залежність між деформаціями, напруженням та часом яких задається у вигляді

$$\varphi_0(\varepsilon(t)) = \sigma(t) + \lambda \int_0^t K(t-\tau) \sigma(\tau) d\tau, \quad (1)$$

де $K(t-\tau)$ - ядро спадковості; $\sigma(t)$ - закон навантаження; $\varphi_0(\varepsilon(t))$ - функція, що характеризує механічні властивості матеріалу і визначається експериментально за діаграмою миттєвого деформування; λ - реологічний параметр.

Нелінійність процесу повзучості визначається нелінійністю діаграми миттєвого деформування $\varphi_0(\bullet)$ і є наслідком умови існування єдиної ізохронної діаграми деформування. Єдина ізохронна діаграма відображує подібність ізохронних діаграм повзучості $\varphi_t(\varepsilon_i(t_j))$ і діаграми миттєвого деформування $\varphi_0(\varepsilon_i(0))$.

Узагальнена умова подібності ізохронних діаграм повзучості, що включає і діаграму миттєвого деформування як ізохронну для моменту часу $t=0$, записується у вигляді

$$\varphi_0(\varepsilon_i(0)) = [1 + G(t_j)] \varphi_t(\varepsilon_i(t_j), t_j), \quad (2)$$

що задає подібність у площині (φ, ε) для кожного з фіксованих рівнів деформації $\varepsilon_i(t)$ в інтервалі $i = \overline{1, n}$ по параметру t_j . Тут $1 + G(t_j)$ ($j = \overline{1, n}$) - функція подібності, що визначається для кожної ізохронної діаграми повзучості; $\varphi_0(\bullet), \varphi_t(\bullet)$ - функції, що задають напруження σ_i по діаграмі миттєвого деформування і по ізохронних діаграмах повзучості відповідно для кожного з моментів часу t_j .

Як ядра спадковості $K(t-\tau)$ в нелінійному інтегральному рівнянні (1) можуть бути використані різні ядра спадковості, параметри яких визначаються за результатами обробки експериментальних даних на одновісну повзучість за фіксованої температури на декількох рівнях сталого напруження, яке задається співвідношенням

$$\sigma(t) = h(t) \sigma_k; \quad (k = \overline{1, m}), \quad (3)$$

де $h(t)$ - одинична функція Хевісайда ($h(t) = 0$ при $t < 0$ і $h(t) = 1$ при $t \geq 0$), а $\sigma_k = \text{const}$.

Спосіб, що заявлений, здійснюється наступним чином:

Дві групи зразків із матеріалу, що досліджується за фіксованої температури, випробовують на повзучість на декількох рівнях напруження та одновісний короткочасний розтяг. Методику випробувань та обладнання для випробувань детально описано у [3].

Для зразків першої групи в процесі навантаження вимірюють дискретні величини часу навантаження t та деформації повзучості ε , що їм відповідають і будують криві повзучості у координатах "ε-т" для кожного з реалізованих рівнів напруження при навантаженні. На їх основі будують ізохронні діаграми повзучості у координатах "σ-ε".

Зразки матеріалу другої групи випробовують в умовах одновісного короткочасного розтягу, будують діаграму миттєвого деформування в координатах "σ-ε", яку приймають в подальшому за ізохронну діаграму для $t=0$.

Використовуючи отримане сімейство ізохронних діаграм повзучості, побудованих по кривим повзучості для різних рівнів сталого напруження σ_k , що задаються згідно з (3) рівнянням повзучості (1), при $\sigma(t) = \sigma_k = \text{const}$ записується у вигляді

$$\varphi_0(\varepsilon(t)) = \left(1 + \lambda \int_0^t K(\tau) d\tau \right) \sigma_k, \quad (4)$$

розв'язок якого відносно величини деформації $\varepsilon(t)$

$$\varepsilon(t) = \varphi_0^{-1} \left\{ \left(1 + \lambda \int_0^t K(\tau) d\tau \right) \sigma_k \right\} \quad (5)$$

встановлює залежність між деформацією, напруженням і часом. Тут прийнято, що $h(t)=1, \tau=0$, а $(t-\tau)=t$.

Вираз у дужках правої частини (4) задає коефіцієнт подібності при фіксованих t , функція $\varphi_0(\varepsilon(t))$ при $t=0$ описує діаграму миттєвого деформування, а функція $\varphi_0^{-1}(\bullet)$ - обернення функції $\varphi_0(\bullet)$. Функція $\varphi_0(\varepsilon(0))$ задається згладжуючим кубічним сплайном

$$\varphi_0(\varepsilon(0)) = a_{0,i} + a_{1,i}\varepsilon + a_{2,i}\varepsilon^2 + a_{3,i}\varepsilon^3, \quad (6)$$

а її обернення $\varphi_0^{-1}(\bullet)$ - відповідно сплайном

$$\varphi_0^{-1}\left((1+K^*)\sigma_k\right) = b_{0,i} + b_{1,i}\left((1+K^*)\sigma_k\right) + b_{2,i}\left((1+K^*)\sigma_k\right)^2 + b_{3,i}\left((1+K^*)\sigma_k\right)^3, \quad (7)$$

де $a_0, a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2, b_3$ - коефіцієнти сплайнів; K^* - інтегральний оператор Вольтера

$$K^* = \lambda \int_0^t K(\tau) d\tau. \quad (8)$$

Коефіцієнти a_i і b_i визначаються за результатами апроксимації діаграми миттєвого деформування $\varphi_0(\bullet)$ і її обернення $\varphi_0^{-1}(\bullet)$ відповідно сплайнами (6) і (7).

Параметри ядер спадковості визначаються, виходячи із умови подібності між ізохронними діаграмами повзучості і діаграмою миттєвого деформування на підставі обробки дискретних значень функції подібності $\bar{G}(t_j)$. Дискретні значення $\bar{G}(t_j)$ визначаються із умови найкращого узгодження діаграми миттєвого деформування $\varphi_0(\varepsilon_i)$ з приведеними до неї ізохронними діаграмами повзучості $\varphi_i(\varepsilon_i, t_j)$. Задача зводиться до мінімізації функціонала

$$\Phi(\bar{G}(t_j)) = \sum_{i=1}^n (\varphi_0(\varepsilon_i) - \bar{G}(t_j) \varphi(\varepsilon_i, t_j))^2, \quad (9)$$

де індекс j задає дискретизацію первинних кривих повзучості по t , а індекс i - дискретизацію ізохронних діаграм повзучості по ε . В результаті отримаємо співвідношення

$$\bar{G}(t_j) = \frac{\sum_{i=1}^{\ell} (\varphi_0(\varepsilon_i) \cdot \varphi(\varepsilon_i, t_j))}{\sum_{i=1}^{\ell} (\varphi(\varepsilon_i, t_j))^2}, \quad (10)$$

яке дає можливість розрахувати дискретні величини функції подібності між ізохронними діаграмами $\varphi_i(\varepsilon_i, t_j)$ та діаграмою миттєвого деформування $\varphi_0(\varepsilon_i)$.

Їх апроксимація з використанням функції

$$G(t) = 1 + \lambda \int_0^t K(\tau) d\tau, \quad (11)$$

що задається з урахуванням (2) і (5), дозволяє визначити параметри ядра спадковості.

Приклад. Розглянемо задачу визначення параметрів ядер спадковості нелінійно-в'язкопружних матеріалів. Як об'єкти дослідження виберемо склопластик ТС-8/3-250 та нейлон FM 10001, які випробовувались відповідно при 23° і 25 °С, і для яких відсутня подібність первинних кривих повзучості. Для цих матеріалів підтверджується подібність ізохронних діаграм повзучості. Результати випробувань зразків матеріалів на повзучість за умов статичного навантаження на декількох рівнях напруження та постійної температури надаються у вигляді стандартних кривих повзучості схематично представлених на фіг. 1,а та ізохронних діаграм повзучості (фіг. 1,б).

На фіг. 1,б схематично приведено діаграму миттєвого деформування.

Значення коефіцієнтів a_i, b_i , визначених за результатами апроксимації сплайнами (6) та (7) наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Матеріал	x_i	a_3	a_2	a_1	a_0
Нейлон FM 10001	0	$7,12 \cdot 10^5$	-29219	1463,7	0,1453
	0,018				
		b_3	b_2	b_1	b_0
	0	$-3,43521 \cdot 10^{-7}$	$1,81486 \cdot 10^{-5}$	0,000618	$4,44085 \cdot 10^{-5}$
	12,5				
Склопластик TC-8/3-250		b_3	b_2	b_1	b_0
	0,0000001	65972105,9	-1722538,6	19680,95789	0,911365
	0,0079571	2204032,64	-200307,529	7568,379078	33,03846
	0,0290702	9716,4575	-8940,07608	2005,294085	86,94507
	0,08100072				

- Підстановка в (10) експериментальних величин напружень $\varphi_0(\varepsilon_i), \varphi(\varepsilon_i, t_j)$ дає можливість побудувати залежності $\bar{G}(t_j)$, що наведені на фіг. 2 (точки: (o) - TC-8/3-250, (•) - нейлон FM10001), а їх апроксимація співвідношенням (11), з урахуванням структури дробово-експоненційного ядра, у вигляді

$$G(t) = 1 + \lambda \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-\beta)^n t_j^{(1+\alpha)(1+n)}}{\Gamma[1+(1+\alpha)(1+n)]}, \quad (12)$$

нанесена тонкими суцільними лініями. Величини параметрів α, β і λ апроксимуючої функції знаходяться шляхом мінімізації функціонала

$$\Phi(\alpha, \beta, \lambda) = \sum_{j=1}^n \left\{ \bar{G}(t_j) - \left(1 + \lambda \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-\beta)^n t_j^{(1+\alpha)(1+n)}}{\Gamma[1+(1+\alpha)(1+n)]} \right) \right\}^2, \quad (13)$$

Для досліджених матеріалів величини визначених параметрів ядер спадковості наведені у табл. 2.

Таблиця 2

Матеріал	α	β , час ^{$-(1+\alpha)$}	λ , час ^{$-(1+\alpha)$}
Нейлон FM 10001	-0,488	0,086	0,072
Склопластик TC-8/3-250	-0,651	0,195	0,124

- Експериментальна перевірка ефективності визначення параметрів ядер спадковості запропонованим способом здійснена шляхом розрахунку деформацій повзучості та релаксації напружень вказаних матеріалів та співставлення розрахункових даних з експериментальними.

Таким чином, залежність деформацій ε від часу t , виходячи з (5) з урахуванням (2) і (7), записується у вигляді

$$\varepsilon(t) = \sum_{s=0}^3 b_s \left\{ \left(1 + \lambda \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-\beta)^n t_j^{(1+\alpha)(1+n)}}{\Gamma[1+(1+\alpha)(1+n)]} \right)^s \right\}. \quad (14)$$

- Величини деформацій повзучості $\varepsilon(t)$, що розраховані за співвідношенням (14) з використанням коефіцієнтів b_i , наведених у табл. 1 і параметрів α, β і λ у табл. 2 співставленні на фіг. 3 з експериментальними даними для повзучості нейлону FM 10001 (точки - експеримент, пунктирні лінії - розрахунок). Рівні напружень використані в процесі випробувань на повзучість, що наведені на фіг. 3, відповідно до позначених точок, складають: (o) - 3,2, (•) - 4,96, (•) - 6,78, (•) - 9,27, (•) = 12,41 МПа. Наведене співставлення розрахункових даних по повзучості нейлону FM 10001 з розрахованими із використанням запропонованого способу демонструє задовільний рівень співпадання, що свідчить про ефективність використання визначених запропонованим способом параметрів ядра спадковості.

Майже аналогічний рівень відповідності розрахункових даних експериментальним спостерігається у випадку використання визначених за результатами випробувань на повзучість параметрів ядра спадковості склопластику ТС-8/3-250 для розрахунку залежності рівня напружень в матеріалі від часу в умовах релаксації. Розрахунок залежності рівня напружень від часу в процесі релаксації виконано за співвідношенням

$$\sigma_k(t) = (a_{0,i} + a_{1,i} \cdot \varepsilon_k(0) + a_{2,i} \cdot \varepsilon_k(0)^2 + a_{3,i} \cdot \varepsilon_k(0)^3) \times \left(1 - \lambda \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-(\lambda + \beta)^n t^{(1+\alpha)(1+n)}}{\Gamma[1 + (1+\alpha)(1+n)]} \right) \quad (4п)$$

На фіг. 4 наведено результати співставлення експериментальних і розрахункових даних по релаксації напружень склопластику ТС-8/3-250 при початкових напруженнях: (○) - 53494, (●) - 79,63, (•) - 99,54 МПа.

Внаслідок порівняння результатів розрахунків із експериментом встановлено, що максимальна відносна похибка для даних по повзучості нейлону FM 10001 визначених з використанням запропонованого способу складає не більше 10 %, для даних по релаксації напружень склопластику ТС-8/3-250 вона визначається величиною 15 %.

Використання запропонованого способу дозволяє підвищити точність способів визначення параметрів ядер спадковості практично без збільшення трудомісткості і незалежно від типу ядра, що використовується. Це можуть бути ядра спадковості Работнова, Абеля, Ржаніцина, ядро у вигляді суми експонент або ж степеневе. Наведений приклад підтверджує отримання технічного результату під час реалізації способу із використанням дробово-експоненційного ядра спадковості Работнова.

Джерела інформації:

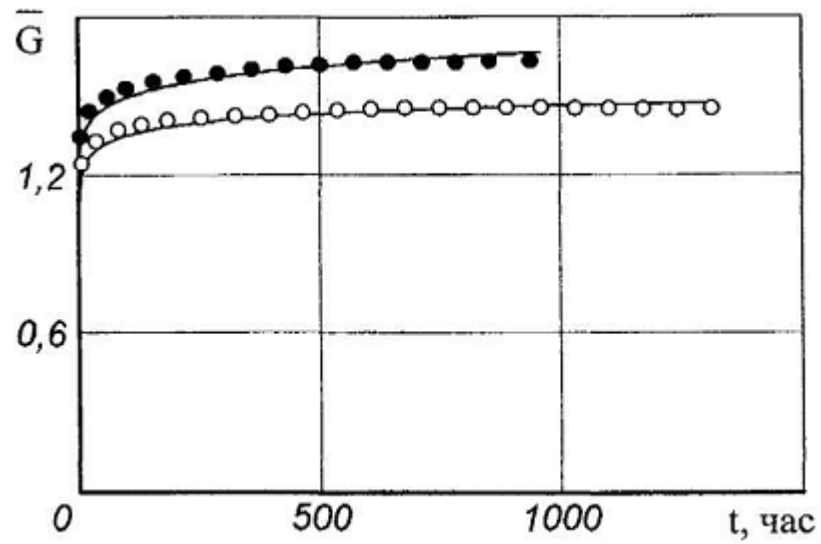
1. Leaderman H. Elastic and creep properties of filaments materials and other high polymers. - Washington: Textile Foundation, 1943. - 278 p.

2. Работнов Ю. Н. Элементы наследственной механики твердых тел. - Москва: Наука, 1977. - 384 с.

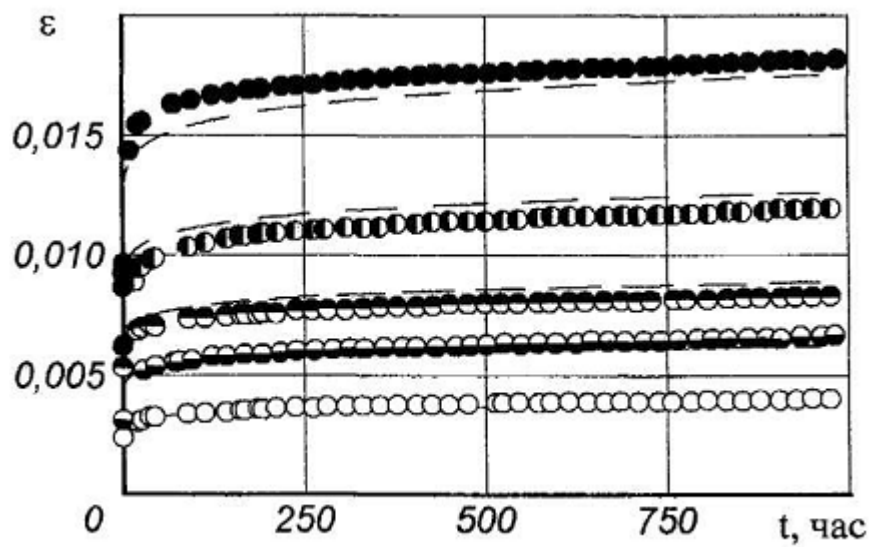
3. Методы испытания, контроля и исследования машиностроительных материалов: Справочное пособие // Под общ. ред. А. Т. Туманова / Методы исследования механических свойств металлов. - Москва: Машиностроение, 1974. - Т. 2. - 320 с.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

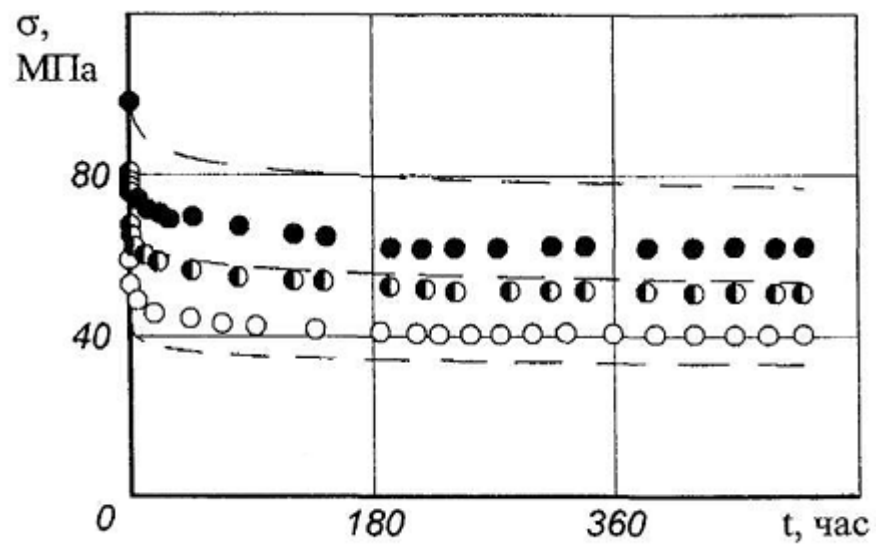
Спосіб визначення параметрів ядер спадковості нелінійно-в'язкопружних матеріалів, який полягає у тому, що групу зразків досліджуваного матеріалу випробовують на повзучість за фіксованої температури на декількох рівнях напружень, вимірюють дискретні величини часу навантаження t та деформації повзучості ε , що їм відповідають, будують криві повзучості у координатах " ε - t ", на їх основі будують ізохронні діаграми повзучості у координатах " σ - ε ", формулюють функцію подібності ізохронних діаграм відносно вибраної базової ізохронної діаграми і шляхом мінімізації квадратичного відхилення розрахункових і експериментальних величин функції подібності визначають параметри ядра спадковості, який **відрізняється** тим, що другу групу зразків матеріалу випробовують на одновісний короткотривалий розтяг, будують діаграму миттєвого деформування, ідентифікують нелінійний закон залежності деформації від напруження, що визначає нелінійність процесу повзучості, встановлюють закон подібності між ізохронними діаграмами і діаграмою миттєвого деформування, яку використовують як базову діаграму, розраховують дискретні значення функції подібності і на цій підставі визначають параметри ядра спадковості.



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4

Комп'ютерна верстка Д. Шеверун

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601