



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **88612** (13) **U**
(51) МПК (2014.01)
G01N 3/00

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2013 11696**
(22) Дата подання заявки: **03.10.2013**
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **25.03.2014**
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: **25.03.2014, Бюл.№ 6**

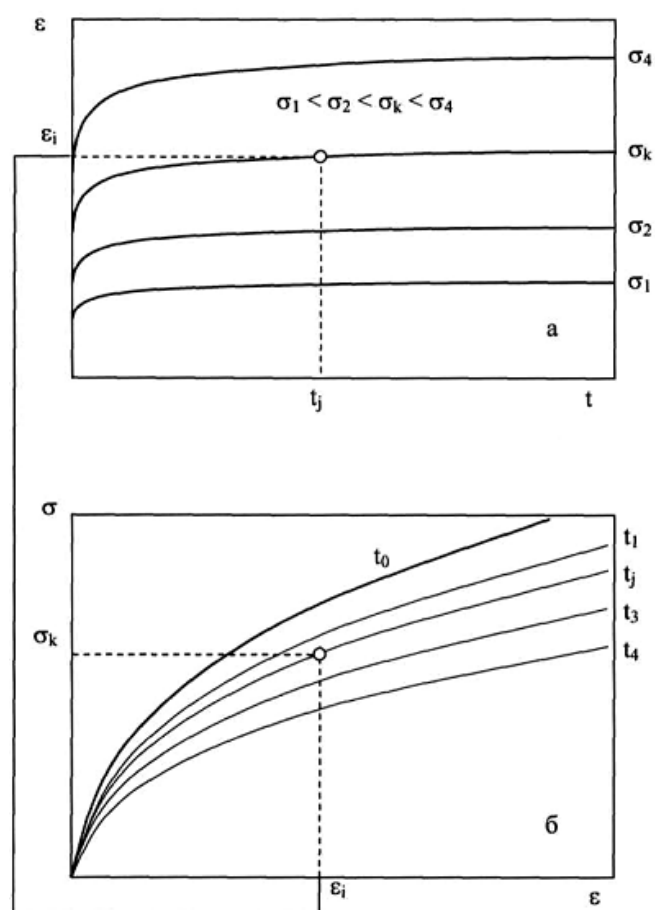
(72) Винахідник(и):
**Голуб Владислав Петрович (UA),
Желдубовський Олександр
Володимирович (UA),
Кобзар Юрій Михайлович (UA),
Рагуліна Віра Сергіївна (UA),
Фернаті Павло Вікторович (UA)**
(73) Власник(и):
**ІНСТИТУТ МЕХАНІКИ ІМ. С.П.
ТИМОШЕНКА НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ
НАУК УКРАЇНИ,
вул. Нестерова, 3, м. 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 першу 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 " $\varepsilon - t$ ". На основі кривих повзучості будують ізохронні діаграми повзучості у координатах " $\sigma - \varepsilon$ ", другу групу зразків матеріалу випробовують на одновісний короткочасний розтяг, будують діаграму миттєвого деформування. Визначаючи нелінійність процесу повзучості і закон подібності між ізохронними діаграмами і діаграмою миттєвого деформування і на основі розрахованих дискретних значень функцій подібності визначають параметри ядра спадковості. Вимірюють швидкість повзучості на початковій $t \rightarrow 0$, розраховують швидкість зміни функції подібності ізохронних діаграм повзучості та діаграми миттєвого деформування. Далі розраховують дискретні значення ядра повзучості $\tilde{K}(t)$, апроксимують дискретні значення $\tilde{K}(t)$ аналітичним співвідношенням, визначають час t_* як точку перегину апроксимуючої функції, що виникає внаслідок урахування значень $\tilde{K}(t)$ при $t \rightarrow 0$, мінімізують функціонал квадратичного відхилення апроксимуючої функції від дискретних значень $\tilde{K}(t)$ із використанням вагових функцій і визначають параметри ядер спадковості.

UA 88612 U



Фиг.1

Корисна модель належить до галузі механічних випробувань матеріалів, 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 " $\varepsilon-t$ ", на їх основі будують ізохронні діаграми повзучості у координатах " $\sigma-\varepsilon$ ", 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.

Цей 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.

Відомий також, обраний як прототип, спосіб визначення параметрів ядер спадковості нелінійно-в'язкопружних матеріалів [2], 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 " $\varepsilon-t$ ", на їх основі будують ізохронні діаграми повзучості у координатах " $\sigma-\varepsilon$ ", 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 в якості базової діаграми, розраховують дискретні значення функції подібності і на цій підставі визначають параметри ядра спадковості.

Однак, цей спосіб має недолік як наслідок внесення похибок у процес визначення параметрів ядра спадковості у випадку спроби врахування початкової стадії випробування ($t \rightarrow 0$), що обумовлено наявністю динамічних ефектів, які супроводжують процес первинного навантаження. Це призводить до зниження точності у визначенні параметрів ядра спадковості.

В основу корисної моделі поставлено задачу у способі визначення параметрів ядер спадковості нелінійно-в'язкопружних матеріалів шляхом вимірювання швидкості повзучості на початковій стадії довготривалого навантаження ($t \rightarrow 0$), розрахунку швидкості зміни функції подібності ізохронних діаграм повзучості та діаграми миттєвого деформування, розрахунку дискретних значень ядра повзучості $\tilde{K}(t)$, апроксимації дискретних значень $\tilde{K}(t)$ аналітичним співвідношенням, визначення часу t_* як точки перегину апроксимуючої функції, що виникає внаслідок урахування значень $\tilde{K}(t)$ при $t \rightarrow 0$, мінімізації функціонала квадратичного відхилення апроксимуючої функції від дискретних значень $\tilde{K}(t)$ із використанням вагових функцій, усунення притаманної прототипу тенденції збереження похибки у визначенні параметрів ядер на початковій стадії деформування за рахунок використання даних по швидкості повзучості на цій стадії та вагових функцій у розрахунках, внаслідок чого підвищується точність визначення параметрів ядер спадковості.

Поставлена задача вирішується тим, 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 " $\varepsilon-t$ ", і на їх основі побудову ізохронних діаграм повзучості у координатах " $\sigma-\varepsilon$ ", формулювання функції подібності ізохронних діаграм, випробування другої

групи зразків на одновісний короткотривалий розтяг, побудову діаграми миттєвого деформування, ідентифікацію нелінійного закону залежності деформації від напруження, що визначає нелінійність процесу повзучості, встановлення закону подібності між ізохронними діаграмами і діаграмою миттєвого деформування, що використовується в якості базової, розрахунок дискретних значень функції подібності і на цій підставі визначення параметрів ядер спадковості, згідно із запропонованим способом вимірюють швидкість повзучості на початковій стадії ($t \rightarrow 0$), розраховують швидкість зміни функції подібності ізохронних діаграм повзучості та діаграми миттєвого деформування, розраховують дискретні значення ядра повзучості $\tilde{K}(t)$, апроксимують дискретні значення $\tilde{K}(t)$ аналітичним співвідношенням, визначають час t_* як точку перегину апроксимуючої функції, що виникає внаслідок урахування значень $\tilde{K}(t)$ при $t \rightarrow 0$, мінімізують функціонал квадратичного відхилення апроксимуючої функції від дискретних значень $\tilde{K}(t)$ із використанням вагових функцій і визначають параметри ядра спадковості з урахуванням початкової стадії навантаження, що підвищує точність способу внаслідок використання в розрахунках параметрів швидкості повзучості та вагових функцій і дозволяє нехтувати впливом динамічних ефектів на результати вимірювань експериментальних величин, які характеризують процес повзучості.

Запропонований спосіб розроблений для нелінійно-в'язкопружних матеріалів, для яких залежність між деформаціями, напруженням та часом з урахуванням розширеної умови подібності ізохронних діаграм повзучості задається у вигляді

$$\begin{aligned} \varphi_0(\varepsilon(t)) &= \sigma(t) + \lambda \int_0^t K(t-\tau) \sigma(\tau) d\tau, \\ \sigma(t) &= \varphi_0(\varepsilon(t)) - \lambda \int_0^t R(t-\tau) \varphi_0(\varepsilon(t)) d\tau, \end{aligned} \quad (1)$$

де перше рівняння описує процес повзучості, а друге - процес релаксації. Тут $\varepsilon(t), \varepsilon(\tau)$ - повна деформація, що містить пружну компоненту ε^e і деформацію повзучості ε^c у моменти часу t і τ ; $\sigma(t), \sigma(\tau)$ - діючий рівень напруження у моменти часу t і τ ; $\varphi_0(\bullet)$ - функція, що задає діаграму миттєвого деформування; $K(t-\tau)$ - ядро повзучості; $R(t-\tau)$ - ядро релаксації; λ - реологічний параметр ($\lambda > 0$); t - час спостереження; τ - час, що передує моменту спостереження.

Нелінійність процесу повзучості визначається нелінійністю діаграми миттєвого деформування $\varphi_0(\bullet)$ і є наслідком умови існування єдиної ізохронної діаграми деформування. Єдина ізохронна діаграма відображає 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 ізохрону для моменту часу $t = 0$, записується у вигляді

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

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 ізохронним діаграмам повзучості відповідно для кожного з моментів часу t_j .

Дискретні значення осередненої функції подібності $\bar{G}(t_j)$ визначаються шляхом мінімізації функціонала (9) у прототипі, в результаті чого отримаємо співвідношення

$$\bar{G}(t_j) = \frac{\sum_{i=1}^{\ell} (\varphi_0(\varepsilon_i) \cdot \varphi(\varepsilon_i, t_j))}{\sum_{i=1}^{\ell} (\varphi(\varepsilon_i, t_j))^2}, \quad (3)$$

яке дає можливість розрахувати дискретні величини функції подібності між ізохронними діаграмами $\varphi_j(\varepsilon_i, t_j)$ та діаграмою миттєвого деформування $\varphi_0(\varepsilon_i)$. В якості ядер спадковості $K(t - \tau)$ або $R(t - \tau)$ в нелінійних інтегральних рівняннях (1) можуть бути використані різні ядра спадковості, параметри яких визначаються за результатами обробки експериментальних даних на одновіснуповзучість за фіксованої температури на декількох рівнях сталого напруження.

Надалі, запобігаючи ускладнень у представленні матеріалів заявки, в якості ядра спадковості буде розглядатися ядро повзучості $K(t - \tau)$. Процедура розрахунку швидкості зміни функцій подібності ізохронних діаграм повзучості та діаграм миттєвого деформування полягає у перетворенні на базі гіпотези існування єдиної ізохронної діаграми деформування співвідношення (2) із заміною величини деформації $\varepsilon_i(0)$ на $\varepsilon_i(t)$, функції подібності $1 + G(t_j)$ на $1 + G(t_j)$ до вигляду

$$\varphi_0(\varepsilon(t)) = (1 + G(t))\sigma \Rightarrow \varepsilon(t) = \varphi_0^{-1}((1 + G(t))\sigma), \quad (4)$$

з наступним її диференціюванням по t . В (4) прийнято, що $\sigma = \varphi_t(\varepsilon(t))$, а φ_0^{-1} - обернення функції φ_0 .

В результаті для швидкості нелінійної повзучості отримуємо рівняння

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = \sigma \left\{ \frac{d\varphi_0^{-1}[(1 + G(t))\sigma]}{d[(1 + G(t))\sigma]} \right\} \frac{d(1 + G(t))}{dt}, \quad (5)$$

де з метою спрощення форми запису символ осереднення є відсутнім. Із порівняння (5) і першого співвідношення (1) записується співвідношення

$$\varphi_0(\varepsilon(t)) = \sigma \left(1 + \lambda \int_0^t \tilde{K}(\tau) d\tau \right), \quad (6)$$

так що швидкість повзучості задається рівнянням

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = \left\{ \frac{d\varphi_0(\varepsilon(t))}{d\varepsilon(t)} \right\}^{-1} \lambda \tilde{K}(t) \sigma, \quad (7)$$

звідкіля для ядра нелінійної повзучості отримуємо співвідношення

$$\tilde{K}(t) = \frac{1}{\lambda} \frac{d(1 + G(t))}{dt}, \quad (8)$$

яке демонструє, що ядро повзучості в нелінійній моделі (1) пропорційно швидкості зміни функції подібності $1 + G(t)$ ізохронних діаграм повзучості та діаграми миттєвого деформування.

В (6) прийнято, що $\tilde{K}(\tau) = K(t - \tau)$.

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 " $\varepsilon-t$ " для кожного з реалізованих рівнів напруження. На їх основі будують ізохронні діаграми повзучості у координатах " $\sigma-\varepsilon$ ". На початковій стадії повзучості ($t \rightarrow 0$)

5 вимірюють швидкість повзучості $\dot{\varepsilon}^c$ і будують залежність у координатах $\dot{\varepsilon}^c-t$.

Співвідношення (8) дає можливість визначити дискретні значення ядер нелінійної повзучості $\tilde{K}(t_j)$, використовуючи аналітичне представлення функції подібності у вигляді згладжуючого кубічного сплайну

$$1+G(t_j) = \overline{A}_j + \overline{B}_j(t-t_j) + \overline{C}_j(t-t_j)^2 + \overline{D}_j(t-t_j)^3, \quad (9)$$

10

яке будується за результатами апроксимації дискретних значень осередненої функції подібності $(1+G(t))$, де A, B, C, D - коефіцієнти сплайну. Підставляючи (9) у (8), для визначення дискретних значень ядра $\tilde{K}(t_j)$ отримаємо співвідношення

$$\tilde{K}(t_j) = \frac{1}{\lambda} [B_j + 2C_j(t-t_j) + 3D_j(t-t_j)^2]. \quad (10)$$

15

Апроксимація дискретних значень ядер має задовольняти властивостям їх сингулярності і при $t \rightarrow 0$ відображати умову $d\varepsilon(t)/dt \rightarrow \infty$ і відповідно $\tilde{K}(t) \rightarrow \infty$. В якості критерію найкращої відповідності аналітичного виразу ядра $K(t)$ до дискретних його значень використовується умова мінімізації квадратичного відхилення апроксимуючої функції $K(t)$ від дискретних значень

20

$\tilde{K}(t)$, тобто мінімізації функціонала

$$F(\lambda, q_s) = \sum_{j=1}^n (\tilde{K}(t_j) - \lambda K(t, q_s))^2, \quad (11)$$

де q_s - параметри ядра повзучості ($s = \overline{1, k}$), n - число дискретних значень ядер повзучості в інтервалі $\{0, t_j\}$.

25

В зв'язку з тим, що дискретні значення ядер $\tilde{K}(t)$ в інтервалі $j = \overline{1, n}$ не є рівновагими внаслідок прояву динамічних ефектів при $t < t_*$, що пов'язано з миттєвим прикладанням навантаження і супроводжується похибками у експериментальних значеннях $\varepsilon(t_j)$ і відповідно у значеннях $1+G(t_j)$ і $\tilde{K}(t_j)$. Як наслідок, значення ядер повзучості в інтервалі $\{0, t_*\}$ не задовольняють вимозі $\tilde{K}(0) \rightarrow \infty$.

30

Для визначення дискретних значень ядер $\tilde{K}(t)$ в інтервалі $\{0, t_*\}$, що задовольняють вимозі $\tilde{K}(t) \rightarrow \infty$ при $t \rightarrow 0$ використовуються дані замірів швидкості повзучості $\dot{\varepsilon}^c$, отримані при $\{0, t_*\}$, а апроксимація $\tilde{K}(t)$ виконується за допомогою вагових функцій. В цьому випадку функціонал (11) представляється у вигляді

$$F(\lambda, q_s) = \sum_{j=1}^{n_*} [p_j(t) [\tilde{K}(t_j) - \lambda \tilde{K}(t, q_s)]]^2 + \sum_{j=n_*+1}^n [\tilde{K}(t_j) - \lambda \tilde{K}(t, q_s)]^2, \quad (12)$$

35

де вагова функція $p_j(t)$ задається співвідношенням

$$p_j(t) = \frac{1}{1 + \left| \frac{\tilde{K}(t_j) - \lambda \tilde{K}(t, q_s)}{\tilde{K}(t_*) - \lambda \tilde{K}(t_*, q_s)} \right|^m}, \quad (13)$$

причому $p_j(t) \rightarrow 0$, коли $K(t, q_s) \rightarrow \infty$ і $p_j(t) = 1$, коли $\tilde{K}(t_j) = \lambda \tilde{K}(t, q_s)$. Тут n_* - число дискретних значень ядер повзучості в області $\{0, t_*\}$; m - порядок моментів різностей ($m = 2, 3, 4, 5, \dots$).

5 Параметр λ і параметри ядер повзучості q_s в (12) визначаються в два етапи.

На першому - визначаються початкові значення λ_0 і q_{s0} без урахування значень ядер $\tilde{K}(t_j)$ із діапазону $\{0, t_*\}$. В цьому випадку мінімізується функціонал

$$F(\lambda_0, q_{s0}) = \sum_{j=n_*+1}^n [\tilde{K}(t_j) - \lambda_0 \tilde{K}(t, q_{s0})]^2 \quad (14)$$

10 і визначаються λ_0 і q_{s0} за результатами апроксимацій тільки рівноважних значень $\tilde{K}(t_j)$ з діапазону $\{t_*, t_n\}$.

На другому етапі значення параметрів λ_0 і q_{s0} використовуються для визначення вагових функцій $p_j(t)$. В результаті підстановки λ_0 і q_{s0} в (12) отримуємо співвідношення

$$p_j(t) = \frac{1}{1 + \left| \frac{\tilde{K}(t_j) - \lambda_0 \tilde{K}(t, q_{s0})}{\tilde{K}(t_*) - \lambda_0 \tilde{K}(t_*, q_{s0})} \right|^m}, \quad (15)$$

15

яке дозволяє варіювати значення $p_j(t)$ при варіюванні моментів різностей m . Кінцеві значення вагових функцій $p_j(t)$ встановлюються з урахуванням величин сумарної квадратичної похибки

$$\delta = \sum_{j=1}^{n_*} \{p_j(t) [\tilde{K}(t_j) - \lambda_0 \tilde{K}(t, q_{s0})]\}^2, \quad (16)$$

20

яка відповідає квадратичній похибці першої суми в (12) і фактично є загальною похибкою функціоналу.

Сума в (16) розраховується для різних значень вагових функцій $p_j(t)$, знайдених згідно (15) і є спадаючою за умов зростання величини m . В результаті визначаються величини $p_j(t)$, що відповідають мінімальній похибці δ_{\min} і використовуються в подальшому у (13) для розрахунку кінцевих значень параметрів λ і q_s .

25

Приклад. Розглянемо задачу визначення параметрів ядер спадковості нелінійно-в'язкопружних матеріалів. У якості об'єкту дослідження оберемо склопластик ТС 8/3-250, для якого відсутня подібність первинних кривих повзучості. Для цього матеріалу підтверджується подібність ізохронних діаграм повзучості. Результати випробувань зразків матеріалу 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).

30

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

35

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

Таблиця 1

Матеріал	x_i	a_3	a_2	a_1	a_0
Склопластик ТС 8/3-250	0	21,13	147,7	1018,2	0
	0,05				
		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				
	0,08100072				
		D	C	B	A
	1	$1,258 \cdot 10^{-5}$	$-1,072 \cdot 10^{-3}$	$3,170 \cdot 10^{-2}$	0,996
	28,19	$2,188 \cdot 10^{-8}$	$-1,011 \cdot 10^{-5}$	$1,774 \cdot 10^{-3}$	1,277
	146,50	$5,117 \cdot 10^{-10}$	$-7,164 \cdot 10^{-7}$	$3,984 \cdot 10^{-4}$	1,344
	447,40	$1,241 \cdot 10^{-11}$	$-4,622 \cdot 10^{-8}$	$9,854 \cdot 10^{-5}$	1,389
	1242,0				

Підстановка в (3) експериментальних величин напружень $\varphi_0(\varepsilon_i), \varphi(\varepsilon_i, t_j)$ дає можливість побудувати залежність $\bar{G}(t_j)$, що наведена на фіг. 2 точками, а їх апроксимація у вигляді згладжуючого кубічного сплайну (9) нанесена тонкою суцільною лінією. Коефіцієнти A, B, C, D цих сплайнів занесені до табл. 1.

Розраховуємо згідно (11) дискретні значення $\tilde{K}(t_j)$. На фіг. 3 точками наведені дискретні значення $\tilde{K}(t_j)$ і визначено момент часу t_* .

Визначаємо початкові значення параметрів λ_0 і q_{s0} , мінімізуючи функціонал (14), при цьому в якості ядра спадковості використано дробово-експоненційну функцію, з урахуванням якої функціонал (12) набуває вигляду.

$$F(\lambda, q_{s0}) = \sum_{j=n_*}^n \left[\tilde{K}(t_j) - \lambda \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-(\lambda + \beta)^n t_j^{(1+\alpha)(1+n)}}{\Gamma[1 + (1+\alpha)(1+n)]} \right]^2, \quad (1п)$$

Значення параметрів λ_0 і $q_{s0} = \beta_0$, знайдених для дослідженого матеріалу, занесені до табл. 2.

Таблиця 2

α_0	0,355	α	0,65
β_0 , год. $^{-(1+\alpha)}$	0,061	β , год. $^{-(1+\alpha)}$	0,19
λ_0 , год. $^{-(1+\alpha)}$	0,021	λ , год. $^{-(1+\alpha)}$	0,12

Визначаємо значення вагових функцій p_j для моментів часу в області $\{0, t_*\}$ згідно з (15) і (16). Ці значення занесені до табл. 3.

Таблиця 3

t_j	1	5	10	15
p_j	$1,95 \cdot 10^{-4}$	$2,13 \cdot 10^{-3}$	$1,31 \cdot 10^{-2}$	0,075

Мінімізуючи функціонал (12) з урахуванням знайдених значень вагової функції p_j отримуємо значення параметрів ядер спадковості. Знайдені таким чином остаточні значення параметрів α, β, λ занесені до табл. 2.

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 (1) з урахуванням результатів визначення $\varphi_0, \sigma(t)$ і $K(t - \tau)$ за методологією, викладеною у прототипі, записується у вигляді

$$\varepsilon(t) = \sum_{s=0}^3 b_1 \left\{ \left[1 + \lambda \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-\beta)^n t^{(1+\alpha)(1+n)}}{\Gamma[1+(1+\alpha)(1+n)]} \right] \sigma_k \right\}^s. \quad (2n)$$

Величини деформацій повзучості $\varepsilon(t)$, що розраховані за співвідношенням (2n) з використанням коефіцієнтів b_i , наведених у табл. 1 і параметрів α, β і λ у табл. 2, співставленні на фіг. 4 з експериментальними даними для повзучості склопластику ТС 8/3-250 (точки - експеримент, пунктирні лінії - розрахунок). Рівні напружень використані в процесі випробувань на повзучість, що наведені на фіг. 4 відповідно до позначених точок, складають: $\sigma = 19,9$ (○) (○); $39,8$ (●) (●); $59,7$ (●) (●); $79,6$ (●) (●); $99,5$ (●) (●); $119,4$ (●) (●) МПа. Наведене співставлення експериментальних та розрахункових даних, визначених 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 з експериментальними 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 за умов релаксації. Розрахунок залежності рівня напружень від часу в процесі релаксації виконано за співвідношенням

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

На фіг. 5 наведено результати співставлення експериментальних і розрахункових даних по релаксації напружень склопластику ТС 8/3-250 при початкових напруженнях: (○) - 53,94, (●) - 79,63, (●) - 99,54 МПа.

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

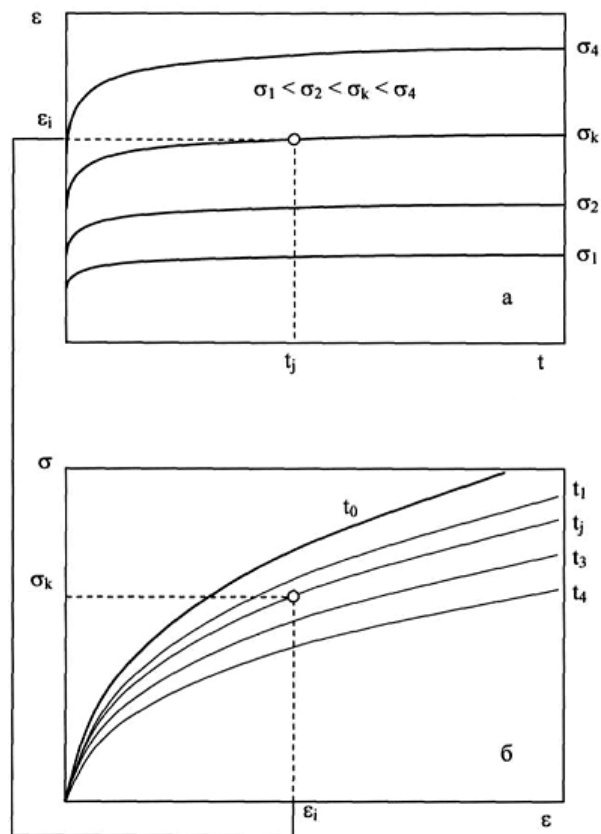
Використання запропонованого способу дозволяє підвищити точність способів визначення параметрів ядер спадковості практично без збільшення трудомісткості і незалежно від типу ядра, що використовується. Це можуть бути ядра спадковості Работнова, Абеля, Ржаніцина, ядро у вигляді суми експонент або ж степеневе.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

Джерела інформації:

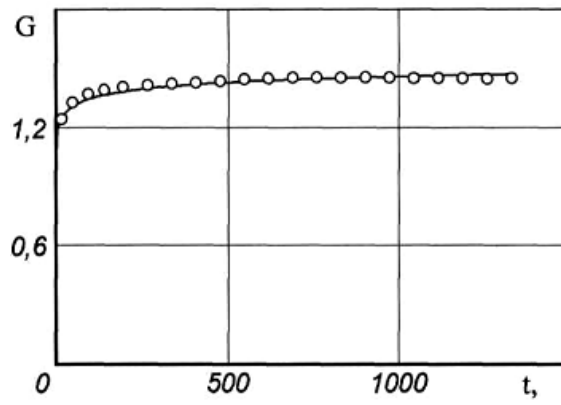
1. Работнов Ю.Н. Элементы наследственной механики твердых тел. - М.: Наука, 1977. - 384 с.
2. Голуб В.П., Желдубовський О.В. Фернаті П.В. Спосіб визначення параметрів ядер спадковості нелінійно-в'язкопружних матеріалів // Патент України №71812. - 2012. - С. 5-97.
3. Методы испытания, контроля и исследования машиностроительных материалов: Справочное пособие // Под общ. ред. А.Т. Туманова / Т. 2. Методы исследования механических свойств металлов. - М.: Машиностроение, 1974. - 320 с.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

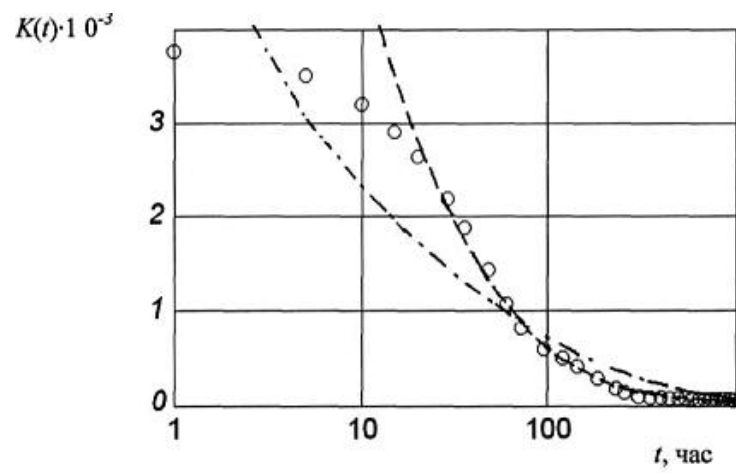
Спосіб визначення параметрів ядер спадковості нелінійно-в'язкопружних матеріалів, який полягає у тому, що першу групу зразків досліджуваного матеріалу випробовують на повзучість за фіксованої температури на декількох рівнях напружень, вимірюють дискретні величини часу навантаження t та деформації повзучості ε , що їм відповідають, будують криві повзучості у координатах " $\varepsilon - t$ ", на їх основі будують ізохронні діаграми повзучості у координатах " $\sigma - \varepsilon$ ", другу групу зразків матеріалу випробовують на одновісний короточасний розтяг, будують діаграму миттєвого деформування, визначаючи нелінійність процесу повзучості і закон подібності між ізохронними діаграмами і діаграмою миттєвого деформування і на основі розрахованих дискретних значень функцій подібності визначають параметри ядра спадковості, який **відрізняється** тим, що вимірюють швидкість повзучості на початковій $t \rightarrow 0$, розраховують швидкість зміни функції подібності ізохронних діаграм повзучості та діаграми миттєвого деформування, розраховують дискретні значення ядра повзучості $\tilde{K}(t)$, апроксимують дискретні значення $\tilde{K}(t)$ аналітичним співвідношенням, визначають час t_* як точку перегину апроксимуючої функції, що виникає внаслідок урахування значень $\tilde{K}(t)$ при $t \rightarrow 0$, мінімізують функціонал квадратичного відхилення апроксимуючої функції від дискретних значень $\tilde{K}(t)$ із використанням вагових функцій і визначають параметри ядер спадковості.



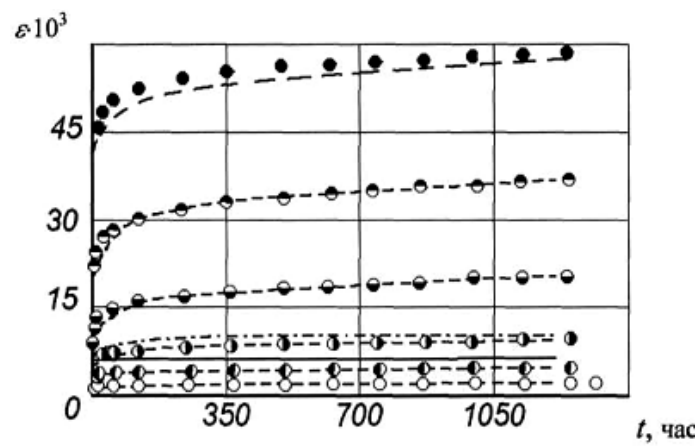
Фіг.1



Фиг.2



Фиг.3



Фиг.4

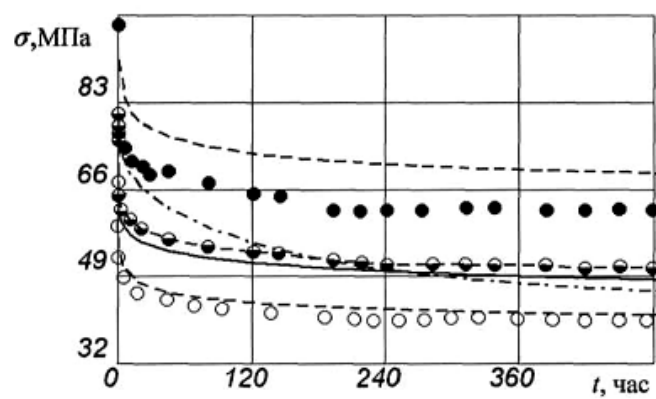


Fig.5

Комп'ютерна верстка М. Ломалова

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