

УДК 539.3

Данильчук Є.Л., к.т.н.

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТРИВАЛОГО ДЕФОРМУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ПОЛІПРОПІЛЕНОВИХ ВОЛОКНИСТИХ СТРУКТУР

Danil'chuk E.

G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

(danilchuk_ips@ukr.net)

STUDY OF PROCESSES OF LONG-TERM DEFORMATION OF A TECHNICAL POLYPROPYLENE FIBROUS STRUCTURE

Досліджується повзучість і міцність технічних високоміцних поліпропіленових ниток лінійною густиною 1000 текс, які використовуються в тканих стрічках транспортного та складського призначення. У роботі визначені області лінійності в'язкопружних властивостей досліджуваних полімерних ниток, доведено виконання умов подібності ізохронних кривих повзучості і побудована діаграма миттєвого деформування. Для досить широкого діапазону напружень визначена діаграма тривалої міцності. Проаналізовано можливості застосування лінійних та нелінійних моделей в'язкопружного деформування.

Ключові слова: полімерні нитки, діаграма деформування, повзучість, тривала міцність, нелінійна теорія в'язкопружності.

Вступ

Завдяки комплексу унікальних властивостей та низькій вартості волокнисті полімерні матеріали набули широкого використання в різноманітних галузях промисловості та в побуті. Цьому зокрема сприяє великий асортимент текстильної продукції: від хімічних волокон загального призначення (лінійною густиною від 0,11 до 1 текс) до ниток (від 3 до 250 текс) і монопіток. Також випускають мікрволокна і мікронитки, фізично, композиційно та хімічно модифіковані волокна. Докладно структура, властивості та рівень розвитку волокнистих полімерних матеріалів описані в [1-3].

До окремого типу волокнистих матеріалів відносяться технічні нитки – синтетичні нитки, що володіють підвищеною міцністю та зносостійкістю, більш високими значеннями модуля пружності Юнга та низькими значеннями видовжень при розриві. Вони застосовуються для виготовлення різних несівних елементів конструкцій і виробів (троси, канати, ремені, стрічки, тканини та ін.), гумовотехнічних виробів (транспортні стрічки, шланги високого тиску, приводні ремені, мембрани та ін.), автомобільних і авіаційних шин, засобів страхівки.

Найбільш поширеним матеріалом для виготовлення технічних ниток є поліпропілен. Для даних волокон характерний комплекс високих механічних характеристик, а їх винятковою особливістю являється низька густина ($\approx 900 \text{ кг/м}^3$), що дозволяє значно скоротити їх матеріалоємність при виробництві багатьох видів продукції. При цьому частина поліпропіленових волокон та ниток випускається хімічно та фізично модифікованими, що суттєво підвищує їх експлуатаційні властивості.

Значна частина технічних полімерних ниток використовується для виготовлення несівних конструкцій (троси, канати, стрічки та ін.), які працюють в умовах тривалого деформування. Тому в даній роботі досліджуються технічні високоміцні поліпропіленові нитки лінійною густиною 1000 текс фібрильованої структури, які використовуються в тканих стрічках транспортного та складського призначення, зокрема, в стрічкових вантажопідіймних пристосуваннях. Враховуючи особливості роботи таких елементів досліджувалась міцність та деформування технічних ниток при статичному короткочасному та тривалому навантаженні.

Експериментальна методика та результати

Випробування зразків з полімерних матеріалів має свої особливості, які пов'язані з їх структурою, зокрема зі специфічною ланцюговою будовою молекул. Це вимагає дотримання певних умов при експериментальному дослідженні даного класу матеріалів. Необхідним є кондиціонування зразків відповідно до загальноприйнятих стандартів [4, 5]. Тому досліджувані зразки витримували в стандартних кліматичних умовах протягом 2 діб. Під час проведення випробувань також слідкували за дотриманням даних вимог.

Особливістю випробувань волокнистих полімерних матеріалів є неможливість використання стандартних захватних пристроїв. При використанні пластинчастих зажимів можливе або проковзування зразків або їх пережим, що викликає місцеве послаблення структури матеріалу, створює додаткові напруження в зоні кріплення і призводить до передчасного руйнування. В цьому відношенні найбільш оптимальним є використання роликкових захватних пристроїв. Нитка при цьому не сприймає додаткових напружень, тому що плавно зходить з циліндричної поверхні.

Однак недоліком захватів такого типу є те, що зразок не має фіксованої довжини зажиму, що ускладнює визначення його видовження. Тому при статичних короткочасних та тривалих випробуваннях волокнистих матеріалів для вимірювання осової деформації використовувався оптичний метод, який полягав у визначенні абсолютної деформації між двома нанесеними на зразок реперними позначками за допомогою цифрової фотозйомки з високою роздільною здатністю. Вимірювання виконувались на базі 100 ± 10 мм.

Визначення механічних характеристик досліджуваних ниток при статичному короткочасному розтязі здійснювалося на експериментальній установці BiSS Bi-00-701. Вимоги до зразків, дослідного обладнання та швидкості навантаження регламентувалися міжнародними та вітчизняними стандартами [6, 7]. Вивчення механічної поведінки ниток при тривалому навантаженні проводили на розробленому стенді для випробувань волокнистих полімерних матеріалів на повзучість.

Під час проведення експериментальних досліджень волокнистих полімерних матеріалів в умовах статичного короткочасного навантаження визначались наступні механічні характеристики: граничні напруження та деформації в напрямку прикладених зусиль, модуль поздовжньої пружності (модуль Юнга), а також діаграма деформування.

Під час проведення статичних тривалих досліджень головними характеристиками, які підлягали визначенню, були закони зміни деформацій з плином часу за різних рівнів навантаження (криві повзучості), швидкості повзучості та діаграми тривалої міцності.

Статичні короткочасні випробування поліпропіленової технічної нитки проведені за різних режимів та швидкостей навантаження (для жорсткого режиму – 20 мм/хв, 50 мм/хв, 120 мм/хв та 200 мм/хв, для м'якого режиму – 0,2 кН/хв, 0,5 кН/хв та 1,2 кН/хв) [8]. Отримані діаграми деформування представлені на рис. 1. Залежність діаграм розтягу досліджених полімерних ниток від виду та швидкості навантаження пов'язана в першу чергу з особливостями деформування полімерних матеріалів, для яких характерні реологічні властивості, а також з тим, що в початковий момент часу має місце нерівномірний розподіл навантаження по всіх елементарних волокнах нитки.

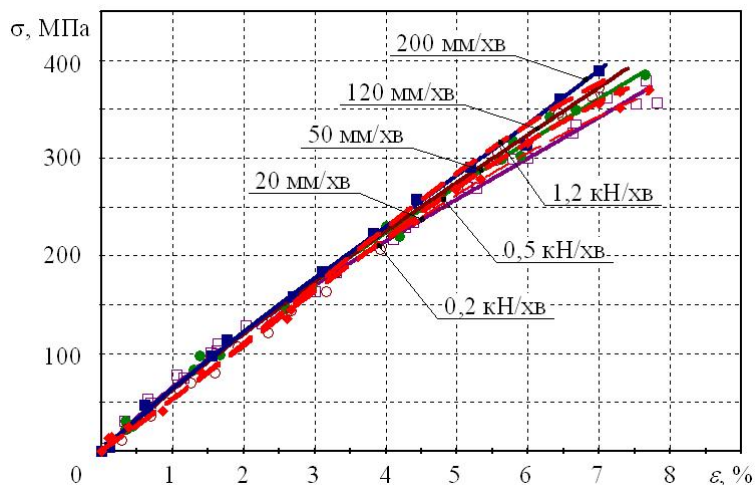


Рис. 1. Діаграми деформування нитки за м'якого та жорсткого режимів навантаження

Для дослідження тривалих характеристик поліпропіленової технічної нитки випробування проводилися для 8 рівнів напружень $\sigma_k = p \cdot \sigma_b$ відповідно, де σ_b – границя міцності, $p = 0,11; 0,24; 0,35; 0,46; 0,57; 0,68; 0,75; 0,79$. При цьому особлива увага була приділена області підвищених напружень, де досліджувана волокниста структура поводить себе, як нелінійний в'язкопружний матеріал.

Отримані залежності повних деформацій $\varepsilon(t, \sigma_k)$ від часу t для різних фіксованих рівнів напружень наведені на рис. 2.

При випробуваннях на повзучість дуже важко отримати достовірні експериментальні данні про початкові етапи деформування, а миттєва деформація, яка виникає одразу після навантаження, як правило, фіксується з недостатньою точністю. Крім того, отримані при статичних короткочасних випробуваннях діаграми розтягу залежать від виду та швидкості прикладання зусиль, а для подальшого використання потрібна діаграма

пружних властивостей, яка буде інваріантна до виду напруженого стану та швидкості деформування. Тому необхідним є визначення миттєвої діаграми деформування, яка може розглядатись як дійсна діаграма пружних властивостей досліджуваної волокнистої структури. Деформації повзучості, які при експериментальному дослідженні супроводжують будь-які процеси деформування полімерних матеріалів, на миттєвій діаграмі деформування відсутні [9, 10, 11].

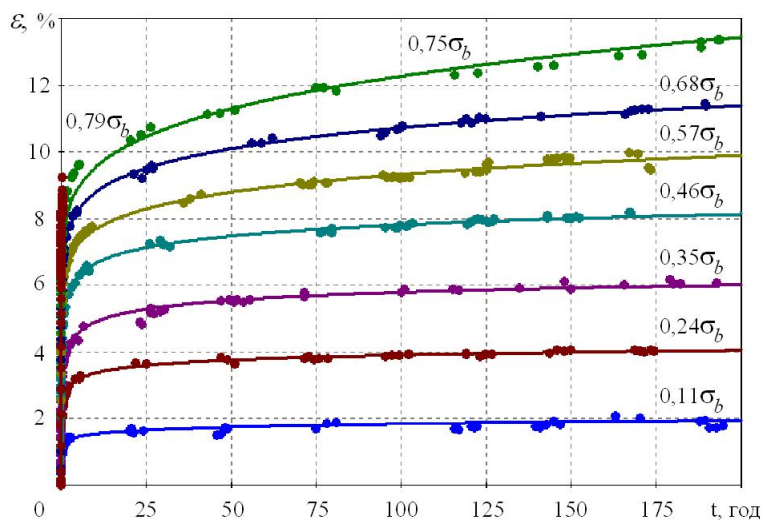


Рис. 2. Експериментальні криві повзучості поліпропіленової технічної нитки

Така діаграма властивостей визначається із серії кривих розтягу, які отримані при випробуваннях зразків з різними постійними швидкостями напруження, або обчислюється з аналізу сімейства ізохронних кривих повзучості. Методика визначення миттєвої діаграми деформування волокнистих полімерних матеріалів на основі аналізу подібності відповідних ізохронних кривих детально висвітлена в роботі [8].

Ізохронні криві повзучості технічної поліпропіленової нитки для фіксованих моментів часу, а також визначена миттєва діаграма деформування $\varphi_0(\epsilon)$ наведені на рис. 3. Штриховою лінією позначені межі довірчого інтервалу функції $\varphi_0(\epsilon)$.

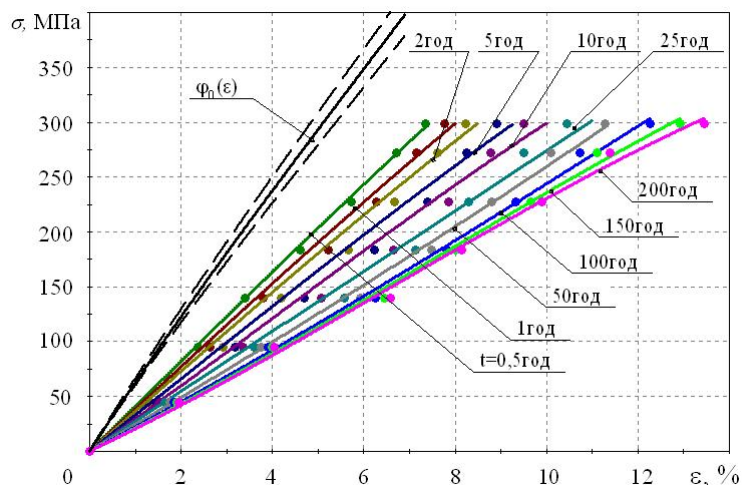


Рис. 3. Ізохронні криві повзучості та миттєва діаграма деформування

Розрахунок процесів тривалого деформування

При достатньо високих рівнях напружень процеси повзучості полімерних матеріалів можуть відбуватись не лише в лінійній, а і в нелінійній областях деформування. Тому при виборі рівнянь стану та описі реологічної поведінки таких матеріалів першочерговим завданням є визначення областей лінійності та відповідно нелінійності в'язкопружних деформацій. Встановлення чіткої межі між вказаними областями дозволяє найбільш ефективно описати процеси деформування в полімерних матеріалах і, зокрема, в волокнистих структурах на їх основі.

Необхідною умовою лінійності в'язкопружних деформацій являється інваріантність функції піддатливості (функції повзучості) $J(t)$ відносно діючих напружень σ_k . В цьому випадку умова лінійності визначається співвідношенням [10, 12]

$$J(t) = \frac{\varepsilon(t, \sigma_1)}{\sigma_1} = \frac{\varepsilon(t, \sigma_2)}{\sigma_2} = \dots = \frac{\varepsilon(t, \sigma_n)}{\sigma_n}. \quad (1)$$

Однак внаслідок статистичної природи механічних властивостей матеріалів, говорити про збіг функції піддатливості можна лише з певною ймовірністю. Тому відповідно до робіт [11, 13], лінійним в'язкопружним матеріалом з похибкою $2\delta=10\%$ будемо називати матеріал, для якого всі експериментальні криві піддатливості потрапляють в інтервал, обмежений величинами $\pm\delta$ відносно їх вибіркового середнього.

Вибіркове середнє функції піддатливості $\bar{J}(t_j)$ для малих обсягів вибірки ($n < 50$) визначається співвідношенням [14]

$$\bar{J}(t_j) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n J_k(t_j), \quad (j = 1, 2, \dots, m), \quad (2)$$

де $J_k(t_j)$ – значення функції піддатливості, визначеної із експериментів, в момент часу t_j при дії напруження σ_k , n – число кривих піддатливості, m – кількість реперних точок на кожній кривій піддатливості. Тоді істинне значення функції піддатливості в момент часу t_j визначається виразом $J(t_j) = \bar{J}(t_j)$.

Використовуючи експериментально отримані криві повзучості поліпропіленових технічних ниток для фіксованих рівнів напружень, були побудовані відповідні функції піддатливості для кожного рівня, визначені їх середньоквадратичні значення та межі довірчих інтервалів. На наступному рисунку приведені криві функцій піддатливості для тих значень напружень, при яких проявляються лінійні властивості щодо деформацій.

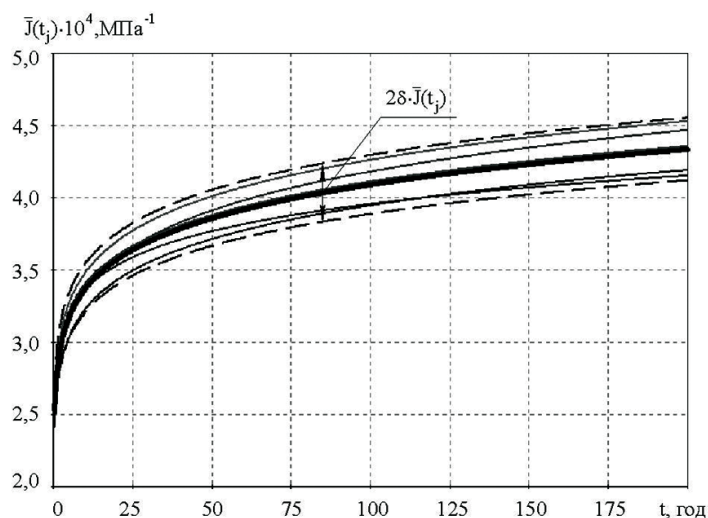


Рис. 4. Криві функцій піддатливості, їх середньоквадратичні значення і межі довірчого інтервалу

Тонкими суцільними лініями представлені результати апроксимації експериментальних даних $J_k(t)$. На основі цих апроксимацій розраховувалися середньоквадратичні значення функції піддатливості $\bar{J}(t)$, які показані на рисунку за допомогою потовщеної кривої. Штриховими лініями позначені границі інтервалу, що відповідають величині максимальної похибки $\delta = 5\%$ від значень $\bar{J}(t)$.

Аналіз отриманих функцій піддатливості дозволив встановити, що області лінійності в'язкопружних властивостей досліджуваних полімерних ниток відповідають рівням напружень, що знаходяться в діапазоні $0 \leq \sigma \leq 0,68 \cdot \sigma_b$, де σ_b – границя міцності матеріалу.

Для опису процесів тривалого деформування поліпропіленової технічної нитки були залучені співвідношення лінійної та нелінійної теорій в'язкопружності.

У випадку одновісного розтягу співвідношення лінійної теорії в'язкопружності приймають наступну форму [12]:

$$\begin{cases} \varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E_0} + \frac{1}{E_0} \int_0^t K(t-\tau)\sigma(\tau)d\tau, \\ \sigma(t) = E_0 \cdot \varepsilon(t) - E_0 \cdot \int_0^t R(t-\tau)\varepsilon(\tau)d\tau, \end{cases} \quad (3)$$

де $\sigma(t)$ і $\varepsilon(t)$ – напруження і деформації в момент спостереження t , τ – час, який передує моменту t , E_0 – миттєвий модуль пружності, $K(t)$, $R(t)$ – функції повзучості і релаксації, які характеризують ступінь “забування” матеріалом попередніх історій напружень і деформацій.

В теорії інтегральних рівнянь функція $K(t)$ називається ядром першого рівняння (3), а функція $R(t)$ – його резольвентою. Такі ядра спадковості повинні бути [15, 16] додатними, монотонними і такими, що інтегруються на інтервалі $[0, \infty)$. Конкретизація співвідношення (3) зводиться до вибору ядер спадковості і визначення їх параметрів.

В якості ядер повзучості $K(t)$ було розглянуто декілька варіантів ядер.

Ядро Абеля [15, 17]:

$$K(t) = \frac{C}{t^\alpha}, \quad (C > 0, 0 < \alpha < 1). \quad (4)$$

Експонентне ядро [15, 18]:

$$K(t) = Ae^{-pt}, \quad (A > 0, p > 0). \quad (5)$$

Ядро у вигляді суми експоненціальних функцій:

$$K(t) = \sum_{k=1}^n A_k e^{-p_k t}, \quad (A > 0, p > 0, n = 4). \quad (6)$$

При використанні співвідношень лінійної теорії в'язкопружності із зазначеними ядрами повзучості задовільна відповідність розрахункових і експериментальних даних отримана лише для низьких рівнів напружень (до $0,35 \sigma_b$ для ядра Абеля).

Очевидно, для більш точного опису процесів тривалого деформування матеріалів даного типу необхідне залучення нелінійної теорії в'язкопружності. Структура визначальних нелінійних рівнянь повзучості вибирається найчастіше в залежності від виконання умов подібності. В теорії матеріалів розрізняють подібність первинних кривих повзучості та подібність ізохронних діаграм повзучості. Однак область застосування рівнянь першого типу доволі обмежена у зв'язку з тим, що подібність первинних кривих повзучості для більшості матеріалів виконується в досить вузькому діапазоні напружень [10, 19].

Виконані дослідження показали, що для даних волокнистих полімерних матеріалів виконується другий принцип подібності (подібності ізохрон) і для опису таких процесів ми можемо скористатися рівняннями стану нелінійної теорії в'язкопружності Работнова [10, 15]

$$\varphi_0(\varepsilon) = \sigma(t) + \int_0^t K(t-\tau)\sigma(\tau)d\tau, \quad (7)$$

де $\varphi_0(\varepsilon) = \sigma(\varepsilon)$ – нульова ізохрона, тобто ізохронна крива, яка відповідає часу $t = 0$ (рис. 3). Варто відмітити, що відповідно до гіпотези про існування єдиної ізохронної діаграми, нульова ізохрона відповідає миттєвій діаграмі деформування.

При дії постійного напруження $\sigma(t) = \sigma_k = const$ за умов повзучості рівняння (7) приймає наступний вигляд

$$\varphi_0(\varepsilon) = \sigma_k \cdot \left[1 + \int_0^t K(t-\tau)d\tau \right]. \quad (8)$$

Ядро повзучості $K(t)$ ідентифікується по результатам випробувань на повзучість виходячи з умови подібності ізохронних діаграм. В даному випадку параметри ядра $K(t)$ визначалися за результатами диференціювання функції подібності ізохронних діаграм повзучості $G_0(t)$.

Методика визначення даної функції подібності $G_0(t)$ детально розглянута в роботі [8]. Позначимо через $G_j(\varphi_j; t)$ функції подібності j -ої ізохрони до всіх інших ізохрон, та представимо їх графічно (рис. 5).

Для апроксимації функцій подібності $G_0(t)$ поліпропіленових ниток технічного призначення був використаний дробово-раціональний вираз

$$G_0(t) = \frac{u \cdot v + w \cdot t^q}{v + t^q}, \quad (9)$$

де $u = 0,9935$; $v = 3,1173$; $w = 3,1678$; $q = 0,3869$ – відповідні параметри апроксимації.

Параметри ядра спадковості $K(t)$ в даному випадку мають наступний вигляд

$$K(t) = \frac{d(G_0(t))}{dt} = \frac{\alpha \cdot t^{\beta-1}}{(\gamma + t^\beta)^2}, \quad (10)$$

де $\alpha = v \cdot q \cdot (w - u)$, $\beta = q$, $\gamma = v$.

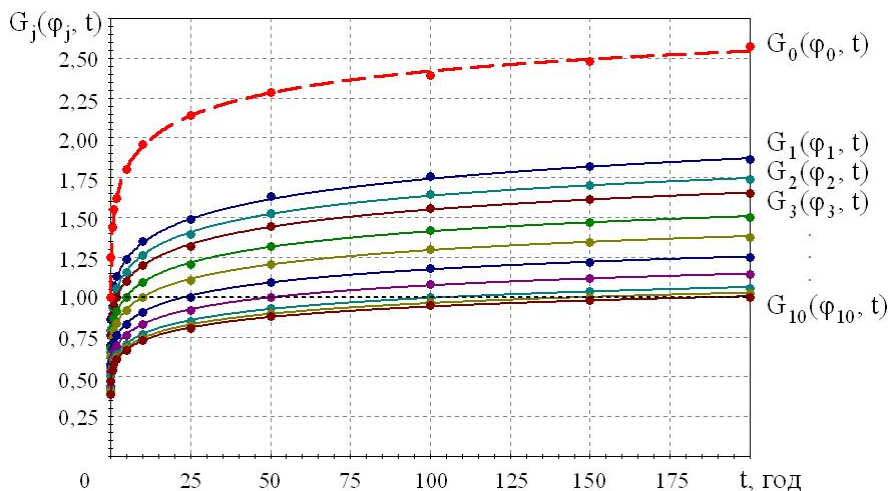


Рис. 5. Функції подібності ізохронних діаграм повзучості поліпропіленової технічної нитки

Миттєва діаграма деформування досліджуваних ниток (рис. 3) добре описується наступним виразом

$$\varphi_0(\varepsilon) = \frac{a \cdot \varepsilon}{1 + b \cdot \varepsilon + c \cdot \varepsilon^2}, \quad (11)$$

де $a = 6402,4392$ МПа; $b = 2,4390$; $c = -12,1951$.

Для визначення розподілу деформацій при повзучості необхідно підставити (10) і (11) у (8) та розв'язати дане рівняння.

На наступному рисунку показані прогнозовані залежності деформації ε від часу t для поліпропіленових ниток технічного призначення, які обчислені за допомогою співвідношень нелінійної теорії в'язкопружності Работнова для різних фіксованих рівнів напружень σ_k .

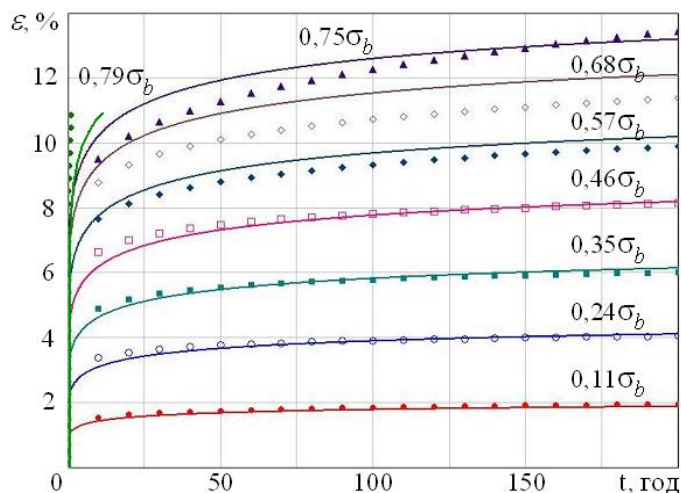


Рис. 6. Співставлення експериментальних (крапки) і розрахункових (суцільні лінії) деформацій технічної поліпропіленової нитки, обчислених на основі нелінійної теорії в'язкопружності Работнова

Як видно, запропонована нелінійна модель деформування задовільно описує процеси повзучості поліпропіленових ниток в широкому діапазоні діючих напружень, як на початкових стадіях в'язкопружного деформування, так і на ділянках з усталеною швидкістю деформації, в тому числі при значеннях деформацій,

які досягають 13%. Однак кореляція розрахункових і експериментальних даних погіршується при рівнях напружень близьких до границі міцності.

Оцінка тривалої міцності

Для оцінки тривалої міцності експерименти на повзучість ниток проводили до повного руйнування зразків. На рис. 7 в логарифмічній системі координат наведена отримана залежність діючих напружень від часу до руйнування.

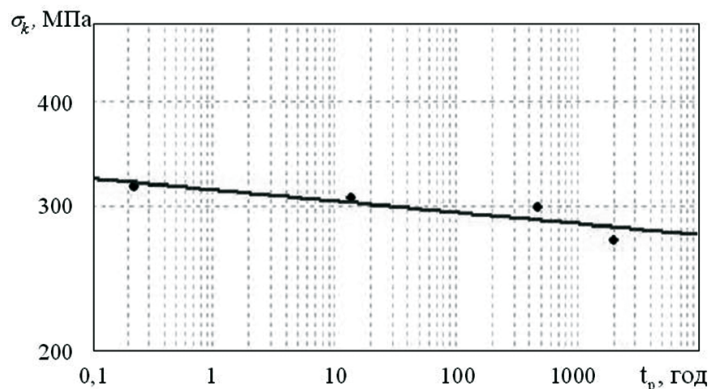


Рис. 7. Діаграма тривалої міцності технічної поліпропіленової нитки

Дану діаграму тривалої міцності можна описати наступним співвідношенням

$$\lg(\sigma_k) = \frac{1}{m} \cdot \lg(t_p) + \lg n, \quad (12)$$

де t_p – час до руйнування, $m = -73,807$; $n = 313,442 \text{ МПа}$ – параметри апроксимації. Із (12) легко розраховується час до руйнування досліджуваної полімерної нитки за наявності процесів повзучості

$$t_p = 10^{m \lg(\sigma_k/n)}. \quad (13)$$

Висновки

На основі проведених експериментальних досліджень встановлені закономірності статичного короткочасного та тривалого деформування технічних високоміцних поліпропіленових ниток. Зокрема, визначені області лінійності в'язкопружних властивостей даних матеріалів, доведено виконання умови подібності ізохронних кривих повзучості та визначені діаграми миттєвого деформування. Для досить широкого діапазону напружень побудована діаграма тривалої міцності.

Проаналізовані можливості застосування лінійної та нелінійної теорій в'язкопружності для опису процесів повзучості досліджуваних матеріалів. Показано, що застосування співвідношень лінійної теорії можливе лише для низьких рівнів напружень (до $0,35 \sigma_b$). Використання рівнянь стану нелінійної теорії в'язкопружності Работнова дозволило задовільно описати процеси повзучості поліпропіленових ниток в широкому діапазоні діючих напружень.

Отримані результати досліджень процесів тривалого деформування технічних поліпропіленових ниток будуть використані при моделюванні механічної поведінки більш складних тканих конструктивних елементів.

Анотація. Исследуется ползучесть и прочность технических высокопрочных полипропиленовых нитей линейной плотностью 1000 текс, которые используются в тканых лентах транспортного и складского назначения. В работе определены области линейности вязкоупругих свойств исследуемых полимерных нитей, доказано выполнение условия подобия изохронных кривых ползучести и построена диаграмма мгновенного деформирования. Для достаточно широкого диапазона напряжений определена диаграмма длительной прочности. Проанализированы возможности применения линейных и нелинейных моделей вязкоупругого деформирования.

Ключевые слова: полимерные нити, диаграмма деформирования, ползучесть, длительная прочность, нелинейная теория вязкоупругости.

Abstract. Purpose and the object of research. The creep and strength of a technical high-strength polypropylene threads with a titer of 1000 tex are investigated. This threads are used in woven tapes for transport and warehouse.

Findings. The new results of experimental studies of polymer threads for short-term static tests and creep tests are received. The linearity areas of the viscoelastic properties for the investigated polymer threads are determined, an accomplishment of similarity of isochronal creep curves condition is proved and instantaneous deformation diagram is obtained. The long-term strength diagram is determined for a fairly wide range of stress.

The possibility of applying linear and nonlinear theories of viscoelasticity is analyzed. It is shown that the application of Rabotnov's nonlinear viscoelastic theory is the most effective for the description of creep processes of these materials.

Application area. The research results can be used for calculating the deformation processes of woven materials made from these threads.

Keywords: polymer threads, stress-strain curve, creep, long-term strength, nonlinear theory of viscoelasticity.

Бібліографічний список використаної літератури

1. *Перепелкин К. Е.* Структура и свойства волокон. – М. : Химия, 1985. – 208 с.
2. *Перепелкин К. Е.* Современные химические волокна и перспективы их применения в текстильной промышленности // Российский химический журнал. – 2002. – Т. XLVI, №1. – С. 31–48.
3. *Глубиш П. А.* Високотехнологічні, конкурентоспроможні і екологічноорієнтовані волокнисті матеріали та вироби з них / П. А. Глубиш, В. М. Ірклей, Ю. Я. Клейнер та ін. – К. : Арістей, 2007. – 263 с.
4. *Изделия крученые и плетеные. Методы испытаний* : ГОСТ 25552-82. – [Действителен от 1984-01-01]. – М. : ИПК Издательство стандартов, 1997. – 27 с.
5. *Textiles – Standard atmospheres for conditioning and testing* : ISO 139:2005. – [Valid from 2005-01-15]. – Geneva : International Organization for Standardization copyright office, 2005. – 6 p.
6. *Нити текстильные. Методы определения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве* : ГОСТ 6611.2-73. – [Действителен от 1976-01-01]. – М. : ИПК Издательство стандартов, 1997. – 36 с.
7. *Textile fibres – Determination of breaking force and elongation at break of individual fibres* : ISO 5079:1995. – [Valid from 1995-12-05]. – Geneva : International Organization for Standardization copyright office, 1996. – 6 p.
8. *Кучер М. К., Земцов М. П., Данильчук Є. Л.* Дослідження процесів статичного короткочасного деформування мультифіламентних полімерних матеріалів // Вісник НТУУ «КПІ» Машинобудування. – 2010. – Том 58. – С. 247–253.
9. *Гудрамович В. С.* Теория ползучести и ее приложения к расчету элементов тонкостенных конструкций. – К. : Наукова думка, 2005. – 221 с.
10. *Работнов Ю. Н.* Ползучесть элементов конструкций. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. л-ры, 1966. – 752 с.
11. *Голуб В. П., Кобзарь Ю. М., Рагулина В. С.* К задаче идентификации ядер наследственности в нелинейной теории вязкоупругости // Теоретическая и прикладная механика. - 2009. - Вып. 45. - С. 39-49.
12. *Колтунов М. А.* Ползучесть и релаксация. – М. : Высшая школа, 1976. – 277 с.
13. *Работнов Ю. Н.* Механика деформируемого твердого тела. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. л-ры, 1979. – 744 с.
14. *Степнов М. Н.* Статистические методы обработки результатов механических испытаний. – М. : Машиностроение, 1985. – 232 с.
15. *Работнов Ю. Н.* Элементы наследственной механики твердых тел. – М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. л-ры, 1977. – 384 с.
16. *Кристensen Р.* Введение в теорию вязкоупругости. – М. : Мир, 1974. – 338 с.
17. *Москвитин В. В.* Сопrotивление вязкоупругих материалов. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. л-ры, 1972. – 328 с.
18. *Бленд Д. Р.* Теория линейной вязкоупругости. – М. : Мир, 1965. – 200 с.
19. *Малинин Н. Н.* Прикладная теория пластичности и ползучести. – М. : Машиностроение, 1975. – 400 с.

References

1. *Perepelkin K.E.* Struktura i svojstva volokon (Structure and properties of the fibers). Moscow: Himija, 1985. 208 p.
2. *Perepelkin K.E.* Rossijskij himicheskij zhurnal [Russian Chemical Journal]. 2002. XLVI, №1. pp. 31–48.
3. *Glubish P.A., Irklej V.M., Klejner Ju.Ja.* Visokotekhnologichni, konkurentospromozhni i ekologichnoorijentovani voloknistii materialii ta virobi z nih (High-tech, competitive and ecologically based fibrous materials and products of them). Kyiv: Aristej, 2007. 263 p.
4. *Изделия крученые и плетеные. Методы испытаний* (Products twisted and braided. Test methods): GOST 25552-82. [Valid from 1984-01-01]. Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov, 1997. 27 p.
5. *Textiles. Standard atmospheres for conditioning and testing*: ISO 139:2005. [Valid from 2005-01-15]. Geneva: International Organization for Standardization copyright office, 2005. 6 p.
6. *Нити текстильные. Методы определения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве* (Textile threads. Methods for determination of breaking strength and elongation at break): GOST 6611.2-73. [Valid from 1976-01-01]. Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov, 1997. 36 p.
7. *Textile fibres. Determination of breaking force and elongation at break of individual fibres*: ISO 5079:1995. [Valid from 1995-12-05]. Geneva: International Organization for Standardization copyright office, 1996. 6 p.
8. *Kucher M.K., Zemcov M.P., Danil'chuk E.L.* Visnik NTUU "KPI" Mashinobuduvannja [Journal of Mechanical Engineering the NTUU "KPI"]. 2010. Vol. 58. pp. 247–253.
9. *Gudramovich V.S.* Teorija polzuchesti i ee prilozhenija k raschetu jelementov tonkostennykh konstrukcij (Creep theory and its application to the calculation of elements of thin-walled structures). Kyiv: Naukova dumka, 2005. 221 p.
10. *Rabotnov Ju.N.* Polzuchest' jelementov konstrukcij (Creep in structural elements). Moscow: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. l-ry, 1966. 752 p.
11. *Golub V.P., Kobzar' Ju.M., Ragulina V.S.* Teoreticheskaja i prikladnaja mehanika [Theoretical and Applied Mechanics]. 2009. No. 45. pp. 39-49.
12. *Koltunov M.A.* Polzuchest' i relaksacija (Creep and relaxation). Moscow: Vysshaja shkola, 1976. 277 p.
13. *Rabotnov Ju.N.* Mehanika deformiruemogo tverdogo tela (Mechanics of deformable solids). Moscow: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. l-ry, 1979. 744 p.
14. *Stepnov M.N.* Statisticheskie metody obrabotki rezul'tatov mehanicheskikh ispytanij (Statistical methods for processing the results of mechanical tests). Moscow: Mashinostroenie, 1985. 232 p.
15. *Rabotnov Ju.N.* Jelementy nasledstvennoj mehaniki tverdyh tel (Elements of hereditary mechanics of solids). Moscow: Nauka, Gl. red. fiz.-mat. l-ry, 1977. 384 p.
16. *Kristensen R.* Vvedenie v teoriju vjzkouprugosti (Introduction to the theory of viscoelasticity). Moscow: Mir, 1974. 338 p.
17. *Moskvitin V.V.* Soprotivlenie vjzkouprugih materialov (Resistance of viscoelastic materials). Moscow: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. l-ry, 1972. 328 p.
18. *Blend D.R.* Teorija linejnoy vjzkouprugosti (The theory of linear viscoelasticity). Moscow: Mir, 1965. 200 p.
19. *Malinin N.N.* Prikladnaja teorija plastichnosti i polzuchesti (Applied theory of plasticity and creep). Moscow: Mashinostroenie, 1975. 400 p.

Подана до редакції 05.12.2013