

В.В. ЗОЛОТАРЬОВ, О.В. ГОЛИК, Є.С. МОСКВІТІН, М.Б. ЗИКОВ, А.А. ШУРУПОВА, Л.А. ЩЕБЕНЮК, О.В. ВАСИЛЬЄВА

МОДЕЛЬ ДИНАМІКИ РОЗВИТКУ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ МЕХАНІЧНИХ ВИПРОБУВАННЯХ НАПОВНЕНИХ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ В УМОВАХ КАБЕЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

При впровадженні у виробництво високо наповнених безгалогенних пластмас, механічна міцність яких в експлуатації безпосередньо залежить від вмісту антипірену і технології накладання, актуальним стає контроль механічних характеристик оболонки кабелю у пожежобезпечному виконанні. Полімерні матеріали і їх композиції є в'язкопружними матеріалами, для яких механічні характеристики залежать від часу дії напруження. Представлено результати оцінки швидкості деформації видовження зразків від часу одноосного розтягування при різних швидкостях розведення затискачів в процесі процедури визначення механічних характеристик для безгалогенних кабельних пластмас при нормативних випробуваннях в умовах виробництва. Показано, що внутрішній і зовнішній шари оболонки кабелю з наповненої безгалогенної пластмаси мають суттєво різні значення нормативного параметру пластичності: свідчення відмінностей в структурі полімеру у внутрішніх і зовнішніх шарах оболонки в наслідок технологічного процесу примусового деформування при екструзії, яка є вимушеною (примусовою) орієнтацією полімерної структури. Наведені експериментальні залежності відносної деформації видовження $\delta L(t)$ зразків від часу одноосного розтягування при різних швидкостях розведення затискачів, які ілюструють підтверджену великим масивом даних відтворюваність форми залежностей $\delta L(t)$ для відмінних за структурою подібних наповнених безгалогенних полімерів. Запропоновано модель залежності швидкості деформування від часу розтягування як суми миттєво-пружної, в'язко-пружної і миттєво-пластичної (незворотної): $de/dt = \lambda_{np} \exp(-t/\lambda_{np}) + \{\lambda_1 \exp(-t/\lambda_1) \exp[-(t-\tau)/\lambda_2] d\tau\} / \Delta t$. Наведені відповідні оцінки параметрів названих складових деформування зразків, одержані при апроксимації експериментальних даних запропонованою моделлю. Запропонована модель, по-перше, дає пояснення наявності характерного максимуму ($t = t_m$) відносної деформації як суперпозиції двох взаємозалежних процесів деформування з різним часом післядії λ . По-друге, дозволяє уточнювати вимоги до проведення випробувань: із збільшенням швидкості розведення затискачів час максимуму t_m значно зменшується, відповідно чим більша швидкість розведення затискачів, тим меншим має бути відрізок часу Δt між послідовними вимірюваннями довжини контрольної ділянки зразка. Цей висновок експериментально підтверджено для конкретного матеріалу при швидкості 250 мм/хв.

Ключові слова: безгалогенні кабельні полімерні композиції, деформація, час, одноосне розтягування

В.В. ЗОЛОТАРЕВ, О.В. ГОЛИК, Е.С. МОСКВИТИН, М.Б. ЗЫКОВ, А. А. ШУРУПОВА, Л.А. ЩЕБЕНИУК, О.В. ВАСИЛЬЕВА

МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ НАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ КАБЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

При внедрении в производство высоко наполненных безгалогенных пластмасс, механическая прочность которых в эксплуатации непосредственно зависит от относительного количества антипирена и технологии наложения, актуальным становится контроль механических характеристик оболочки кабеля в пожаробезопасном исполнении. Полимерные материалы и их композиции являются вязкоупругими материалами, для которых механические характеристики зависят от времени действия напряжения. Представлены результаты оценки скорости удлинения образцов от времени одноосного растяжения при различных скоростях разведения зажимов в процессе нормативной процедуры определения механических характеристик для безгалогенных кабельных пластмасс при испытаниях в условиях производства. Показано, что внутренний и внешний слой оболочки кабеля из наполненной безгалогенной пластмассы существенно различаются по значениям нормативного параметра пластичности: свидетельство отличий в структуре полимера во внутренних и внешних слоях оболочки вследствие технологического процесса принудительного деформирования при экструзии, которая является принудительной ориентацией полимерной структуры. Приведены экспериментальные зависимости относительной деформации удлинения $\delta L(t)$ образцов от времени одноосного растяжения при различных скоростях разведения зажимов. Эти зависимости иллюстрируют подтвержденную большим массивом данных воспроизводимость формы зависимостей $\delta L(t)$ для различных по структуре подобных наполненных безгалогенных полимеров. Предложена модель зависимости скорости удлинения от времени растяжения как суммы скоростей мгновенно-упругой, вязко-упругой и мгновенно-пластичной (остаточной): $de/dt = \lambda_{np} \exp(-t/\lambda_{np}) + \{\lambda_1 \exp(-t/\lambda_1) \exp[-(t-\tau)/\lambda_2] d\tau\} / \Delta t$. Приведены оценки параметров соответствующих составляющих деформирования образцов, полученные при аппроксимации экспериментальных данных с помощью предложенной модели, которая, во-первых, объясняет наличие характерного максимума ($t = t_m$) относительной деформации как суперпозиции двух взаимозависимых процессов деформирования с различным временем последействия λ . Во-вторых, позволяет уточнить требования к проведению испытаний: при увеличении скорости разведения зажимов время соответствующее максимуму скорости деформации t_m уменьшается, соответственно чем большая скорость разведения зажимов, тем меньшим должен быть промежуток времени Δt между последовательными измерениями длины контрольного участка образца. Этот вывод экспериментально подтвержден для конкретного материала при скорости разведения зажимов 250 мм/хв.

Ключевые слова: безгалогенные кабельные полимерные материалы, деформация, время, одноосное растягивание

V.V. ZOLOTAREV, O.V. GOLIK, E.S. MOSKVITIN, M.B. ZYKOV, A.A. SHURUPOVA, L.A. SHCHEBENIUK, O.V. VASILIEVA

MODEL OF DEFORMATION GROWTH DYNAMICS DURING FILLED POLYMER MATERIALS MECHANICAL TESTS UNDER CABLE PRODUCTION CONDITIONS

With the introduction into highly filled halogen-free plastics production, the mechanical strength of which in operation directly depends on the flame retardant content and application technology, it becomes important to control the cable sheath mechanical characteristics in a fireproof design. Polymeric materials and their compositions are viscoelastic materials for which the mechanical properties depend on the stress time. The results of estimating the deformation samples rate elongation from the uniaxial stretching time at different dilution rates of the clamps in the mechanical characteristics determining process for halogen-free cable plastics in regulatory tests under production conditions are presented. It is shown that the inner and outer layers of the halogen-free plastic cable sheath have significantly different values of the plasticity normative parameter: differences

© В.В. Золотарьов, О.В. Голик, Є.С. Москвітін, М.Б. Зиков, А.А. Шурупова, Л.А. Щебенюк, О.В. Васильєва, 2021

evidence in the polymer structure in the inner and outer layers of the sheath due to the forced deformation process during extrusion, which is forced polymer structure orientation. Elongation relative deformation experimental dependences $\delta L(t)$ of the samples on the uniaxial stretching time at different clamps dilution speeds are given, which illustrate confirmed by a large data array the dependencies shape reproducibility $\delta L(t)$ for different in structure similar filled halogen-free polymers. The strain rate dependence model on tensile time as the sum of instantaneous-elastic, viscoelastic and instantaneous-plastic (irreversible) is proposed: $d\varepsilon/dt = \lambda_{ep} \exp(-t/\lambda_{ep}) + \{\lambda_1 \exp(-t/\lambda_1) \exp[-(t-\tau)/\lambda_2] d\tau\}/\Delta t$. The appropriate parameter estimates of the named samples deformation components obtained by approximating the experimental data by the proposed model are given. The proposed model, firstly, explains the presence characteristic relative deformation maximum ($t = t_m$) as a two interdependent deformation processes superposition with different aftermath λ . Secondly, it allows to specify the requirements for testing: with increasing the clamps dilution speed, the maximum time t_m decreases significantly, respectively, the higher the clamps dilution speed, the smaller interval time Δt between a successive sample control section length measurements. This conclusion was experimentally confirmed for a specific material at a speed of 250 mm/min.

Keywords: halogen-free cable polymer compositions, deformation, time, uniaxial stretching

Актуальність роботи зумовлена тим, що пожежна безпека кабелів – одна з основних задач кабельного виробництва при впровадженні інноваційних безгалогених пластмас. Механічна міцність безгалогених пластмас в експлуатації безпосередньо залежить і від вмісту антипірену, і від технології накладання пластмаси в умовах виробництва. Тому організація технологічного контролю забезпечення механічної міцності елементів конструкції, виготовлених з безгалогенних пластмас в умовах конкретного виробництва – актуальна задача організації виробництва пожегобезпечних кабелів.

Проблема полягає в тому, що нормативна процедура визначення механічних характеристик кабельних пластмас в умовах виробництва [1] визначає такі характеристики, які не включають час:

- максимальне розтягувальне зусилля P_m (maximum tensile force)
- максимальне розтягувальне зусилля P_m (maximum tensile force);
- міцність під час розтягування $\sigma_m = P_m/F$ (tensile strength);
- відносне видовження при розриві $\delta = (l - l_0)/l_0 \cdot 100\%$ (elongation at break),

де F – площа поперечного перерізу зразка до випробування, l_0 – контрольна довжина нерозтягнутого зразка, l – контрольна довжина зразка при розриванні.

Важливо те, що стійкість полімерів до механічних навантажень впродовж терміну їх експлуатації тісно пов'язана з явищем релаксації – процесом поступової зміни внутрішніх напружень в попередньо деформованому полімерному матеріалі, а технологія накладання такого матеріалу в умовах виробництва і є процесом його деформування, яке по суті своїй є вимушеною (примусовою) орієнтацією. Динаміка деформування і релаксації орієнтованих полімерів значною мірою залежить від технології їх накладання.

Без урахування динаміки (зміни в часі) залежності між деформацією і механічним напруженням впродовж процесів навантаження і релаксації, які тісно пов'язані, практично неможливо порівнювати механічні властивості в'язкопружних матеріалів [2] з точки зору їх експлуатаційних властивостей.

Аналіз літератури. Найбільш загальною теорією вирішення задач визначення механічної міцності полімерних матеріалів є теорія в'язкопружності [2], згідно з якою саме полімерні матеріали і їх композиції є в'язкопружними, для яких залежність між напруженням і деформацією включає час. В [3] основними виділено чотири види деформації полімерних матеріалів:

1) Миттєво-пружна ε_{ep} , що розповсюджується в матеріалі зі швидкістю звуку і пов'язана зі зміною

валентних зв'язків або кутів, тобто з малою зміною міжмолекулярних та міжатомних відстаней.

2) Вискоеластична (в'язко-пружна або затримана) ε_{vp} , яка є результатом конформаційних змін молекул під дією напружень і яка за абсолютною величиною може значно (в багато разів) перевищувати миттєво-пружну. Внаслідок високої в'язкості механічно міцних полімерів процеси деформування і релаксації відбуваються відносно повільно.

3) Миттєво-пластична (незворотна) ε_{pl} , яка виникає одночасно з миттєво-пружною.

4) Незворотна в'язка (типу течії) ε_t , яка має місце при значних напруженнях і тривалих навантаженнях.

Переважаючи тієї чи іншої деформації залежить від умов (температури, величини та виду навантаження, часу, швидкості деформування) та стану матеріалу (ступінь кристалічності, молекулярна орієнтація, термообробка, старіння та ін.). Деформація в'язкопружного тіла при дії напруження, що змінюється безперервно, в момент часу t визначається напруженням в цей момент $\sigma(t)$ плюс вплив деформацій, що виникли в попередній період часу від 0 до t , і вплив їх на поточну деформацію тим менший, чим більша різниця $t - s$ [2, 3]:

$$\varepsilon(t) = \sigma(t)/E + E^{-1} \int_0^t K(t-s) \sigma(s) ds, \quad (1)$$

де E – модуль пружності; $K(t)$ – функція впливу напружень $\sigma(s)$ в момент часу s на деформацію в момент часу t , $K(t)$ пропорційна швидкості деформування при напруженнях, менших за ті, які викликають помітну остаточну деформацію.

Ретроспектива досліджень деформування твердих полімерних матеріалів є послідовністю пошуку моделі, яка б давала «більш точний опис експериментальних кривих повзучості [3]»: від узагальненої моделі Максвелла для набору пружних та в'язких елементів із різним часом релаксації для останніх, через варіанти моделі Кельвіна-Фойгта (не описують незворотні деформації) та комбіновані моделі з послідовним та паралельним з'єднанням в'язких та пружних елементів (приклад модель Бюргерса), до теорії спадкової в'язко-пружності Больцмана (див. формулу (1)).

Для практичних застосувань у кабельній техніці важливо те, що для аналізу динаміки деформування безгалогенних кабельних пластмас в умовах виробництва необхідна модель залежності між деформацією і часом при нормативних випробуваннях на розтягування, за якою можуть бути оцінені параметри деформування, обмеженого пружною та в'язкопружною деформаціями.

Ретроспектива досліджень деформування твердих полімерних матеріалів є послідовністю пошуку моделі, яка б давала «більш точний опис експериментальних кривих повзучості [3]»: від узагальненої моделі

Максвелла для набору пружних та в'язких елементів із різним часом релаксації для останніх, через віранти моделі Кельвіна-Фойгта (не описують незворотні деформації) та комбіновані моделі з послідовним та паралельним з'єднанням в'язких та пружних елементів (приклад модель Бюргерса), до теорії спадкової в'язко-пружності Больцмана (див. формулу (1)).

Для практичних застосувань у кабельній техніці важливо те, що для аналізу динаміки деформування безгалогенних кабельних пластмас в умовах виробництва необхідна модель залежності між деформацією і часом при нормативних випробуваннях на розтягування, за якою можуть бути оцінені параметри деформування, обмеженого пружною та в'язкопружною деформаціями.

Мета роботи. Експериментальне дослідження динаміки деформування безгалогенних кабельних пластмас за нормативної процедури визначення їх механічних характеристик залежно від рецептури (вміст антипіренів) і від технології накладання пластмаси в умовах виробництва. Розроблення моделі кількісної характеристики динаміки розвитку деформації наповнених безгалогенних пластмас для порівняння впливу технології накладання пластмаси на механічні властивості в'язкопружних матеріалів.

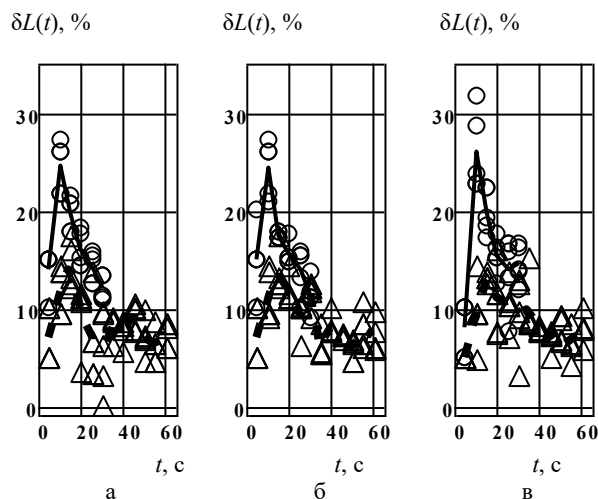
Основні результати. Виконано дослідження залежності деформації видовження зразків від часу одноосного розтягування при постійній швидкості розведення затискачів в процесі нормативної процедури визначення механічних характеристик для безгалогенних кабельних пластмас.

Експериментальну роботу проведено на базі центральної заводської лабораторії ПАТ «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ» за участі студентів з кафедри «Електроізоляційна і кабельна техніка» НТУ «ХПІ». Досліджено безгалогенні компаунди фірми Condor Compaunds GmbH.

На рис. 1 представлено характерні залежності відносної деформації видовження зразків від часу одноосного розтягування при різних швидкостях розведення затискачів в процесі нормативної процедури визначення механічних характеристик для безгалогенних кабельних пластмас.

При цьому всі зразки однакові за рецептурою, за параметрами технологічного процесу накладання оболонки в умовах виробництва, за умовами випробування. Різниця між зразками на рис. 1а, 1б, 1с лише в структурі полімеру, яка утворилась в наслідок технологічного процесу накладання оболонки в різних її шарах: внутрішнього чи зовнішнього.

Контроль технологічного процесу накладання полімеру має включати контроль динаміки деформування зразка. На наш погляд саме оцінка відносної деформації видовження зразків по відношенню до поточної довжини зразка $\delta L = \Delta L / L(t)$ (рис. 1) відповідає поставленій меті, оскільки в кожен момент часу t швидкість деформування $d\epsilon/dt$ залежить від попередніх деформацій.



а – зразки вирізані з внутрішнього шару оболонки середня товщина 1,55 мм; відносне видовження при розриві середнє 60 %; середня міцність при розтягуванні 13,7 МПа;
б – зразки вирізані з зовнішнього шару оболонки середня товщина 1,61 мм; відносне видовження при розриві середнє 48 %; середня міцність при розтягуванні 14,9 МПа;
в – зразки оболонки середня товщина 2,4 мм; відносне видовження при розриві середнє 49 %; середня міцність при розтягуванні 12,1 МПа

Рис. 1. Характерні залежності відносної деформації $\delta L(t) = \Delta L(t)/L(t)$ від часу t одноосного розтягування зразків безгалогенної кабельної пластмаси при різних швидкостях розтягування $V1(\Delta)$ і $V2 = 2 V1(\circ)$, ломана лінія: середні значення $\delta L(t)$ для 5 зразків

Відтак найбільш інформативним є розроблення моделі для кількісної характеристики складових розвитку деформацій для аналізу впливу технології накладання на механічні властивості безгалогенних кабельних пластмас.

Важливо те, що внутрішній і зовнішній шари оболонки кабелю з безгалогенної пластмаси мають суттєво різні значення нормативного параметру пластичності (рис. 2), але так звана міцність при розриві суттєво не відрізняється. Це свідчить про відмінності в структурі полімеру у внутрішніх і зовнішніх шарах оболонки в наслідок технологічного процесу примусового деформування при екструзії, які впливають саме на параметри деформування.

В тому, що на рис. 2 нормативний параметр пластичності δ (elongation at break) має тенденцію до зростання при збільшенні товщини зразка, опосередковано присутній час розтягування, оскільки в будь-якому разі чим більша товщина зразка, тим більше значення максимального розтягувального зусилля P_m , а це означає збільшення часу деформування до розриву при однакових швидкостях розведення затискачів.

В тому, що на рис. 2 зразки з зовнішнього шару оболонки ($\bullet$) мають суттєво більше відносне видовження при розриві, ніж зразки з внутрішнього ($\blacktriangle$) при практично однакових значеннях максимального розтягувального зусилля P_m , є свідчення, що структура, наприклад орієнтованість макромолекул в цих шарах різна. Відомо [2], що попередньо орієнтовані полімери в цілому менш крихкі, тобто більш пластичні.

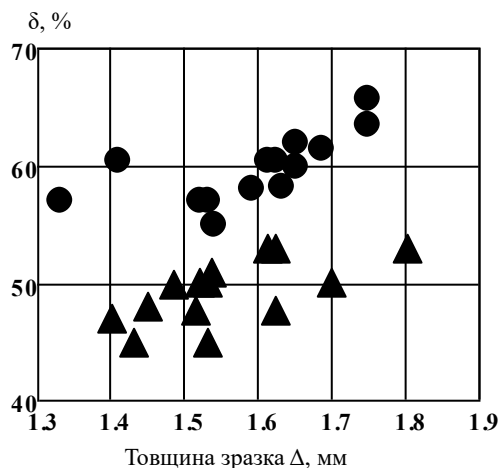


Рис. 2. Залежності відносного видовження при розриві δ від товщини Δ зразка безгалогенної кабельної пластмаси, вирізаного відповідно до напрямку екструзії з внутрішнього ($\blacktriangle$) і зовнішнього ($\bullet$) шарів оболонки, при однакових швидкостях розведення затискачів

Процес деформування в'язкопружних матеріалів є одночасним розвитком пружних, в'язкопружних, пластичних і релаксацийних складових, співвідношення яких впродовж випробування на розтягування змінюються, що ілюструє рис. 1.

Технологічний процес накладання полімеру є примусовим деформуванням (примусовою орієнтацією) при підвищених температурах з подальшим охолодженням в деформованому стані, що ілюструє рис. 2.

Відома модель (1) [2] деформації в'язкопружного тіла при дії напруження, що змінюється безперервно, $t \rightarrow 0$; $d\varepsilon/dt \rightarrow \infty$; $K \rightarrow \infty$, де $K(t)$ – функція впливу пропорційна швидкості повзучості має бути сингулярною, тобто $K(0) \rightarrow \infty$ і швидкість процесів деформування в момент прикладення навантаження має бути нескінченною [3].

Ця умова виключає використання експоненційної функції для моделювання функції впливу [3] і тим самим значно ускладнює застосування моделі в умовах виробництва, не додаючи інформації для аналізу результатів.

Відомі традиційні моделі (Максвелла, Кельвіна-Фойгта та ін.), в яких для моделювання динаміки деформування використовують експоненційні функції. При моделюванні експериментальних результатів, приклад яких наведений на рис. 1, для кількісного опису швидкості деформування зразків при розтягуванні, нами використані саме експоненційні функції, в яких параметр експоненти λ названо відповідно до [3] час пружної післядії деформації $\varepsilon(t)$:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 [1 - \exp(-t/\lambda)]. \quad (2)$$

Диференціювання співвідношення (2) дає можливість визначити функцію впливу в (1) як пропорційну швидкості деформування при заданому значенні напруження σ :

$$K(t) = (E/\sigma) \cdot d\varepsilon/dt \quad [3].$$

Оскільки нормативні випробування на розтягування в умовах виробництва передбачають неперервне зростання напруження, експериментальною кількісною оцінкою швидкості деформування $(d\varepsilon/dt)^*$ в мо-

мент t є відносне видовження зразка впродовж наступного достатньо короткого відрізка часу Δt , зміною напруження σ в якому можна знехтувати:

$$(d\varepsilon/dt)^* = \delta L / \Delta t = [L(t + \Delta t) - L(t)] / L(t) \Delta t, \quad (3)$$

де Δt в принципі може бути як завгодно малим, обмеженим конкретними умовами експерименту; L – довжина контрольної ділянки зразка.

З чотирьох основних названих видів деформації полімерних матеріалів в моделі деформування при короткочасних нормативних випробуваннях на розрив мають бути враховані щонайменше три, а саме: миттєво-пружна, високоеластична (в'язко-пружна або затримана), миттєво-пластична (незворотна).

Миттєво-пружна відповідно до моделі (1) [3] деформації в'язкопружного тіла при $t \rightarrow 0$; $d\varepsilon/dt \rightarrow \infty$, тобто в часі швидкість пружної деформації швидко спадає як і її вплив на подальше деформування експоненційно спадає тобто параметр експоненти $\lambda_{\text{пр}}$ (час пружної післядії) малий (умовно кілька секунд при нормативних випробуваннях):

$$d\varepsilon_{\text{пр}}/dt = \lambda_{\text{пр}} \exp(-t/\lambda_{\text{пр}}). \quad (4)$$

В'язко-пружна (затримана) і миттєво-пластична (незворотна) відбуваються одночасно, впливають одна на одну, тому виходячи із принципу суперпозиції, деформацію зразка можна виразити математично як сумарну реакцію в момент часу на елементарні деформації, одна з яких є імпульсною функцією, діючою в момент τ ($0 \leq \tau \leq t$), інша перехідною, а сумарна реакція є інтегралом згортки цих складових [5], що на малому відрізку часу від t до $t + \Delta t$ виражено як відношення:

$$d\varepsilon_{\text{з}}/dt = \{ \int \lambda_1 \exp(-\tau/\lambda_1) \exp[-(t-\tau)/\lambda_2] d\tau \} / \Delta t, \quad (5)$$

де параметри експонент λ_1 і λ_2 відповідно час пружної післядії миттєво-пластичної (незворотної) і в'язко-пружної (затриманої) деформацій, оцінки яких визначено за даними експерименту наступним чином.

Миттєво-пластична незворотня деформація, яка в запропонованій моделі (5) виражена імпульсною функцією, діючою в момент τ ($0 \leq \tau \leq t$), практично непомітна в перші кілька секунд коли основною є миттєво-пружна деформація. В цей період час післядії λ_1 дуже великий, але потім швидко зменшується і коли він стає рівним або меншим Δt , це означає, що у відповідний проміжок часу Δt пластична деформація швидко зростає, а зусилля досягає максимуму в даному конкретному експерименті: ознаки розриву зразка.

Кількісні характеристики розриву: час до розриву, максимальне зусилля перед розривом, відносне видовження при розриві є результатами нормативних випробувань. Відповідно оцінки параметрів складових деформації при розтягуванні можуть бути орієнтовно визначені емпірично за цими результатами.

Параметр миттєво-пружної деформації $\lambda_{\text{пр}}$ в перші секунди випробування є визначальним, але швидкість миттєво-пружної деформації (4) експоненційно спадає і вже за кілька секунд проявляється в'язко-пружна (затримана, час післядії λ_2), що зумовлює зростання швидкості деформування розтягуванням (рис. 1). Орієнтовною оцінкою значення $\lambda_{\text{пр}}$ прийнято середній

час значення швидкості деформування в перші секунди випробування.

Параметр в'язко-пружної деформації λ_2 оцінений нами лінеаризацією експериментальних даних в період нелінійного спадання відносної деформації $\delta L(t) = \Delta L(t)/L(t)$ від максимального значення швидкості деформування (рис. 1). Параметр миттєво-пластичної (незворотної, час післядії λ_1) (формула (5)) оцінений нами з таких припущень: в момент максимального значення швидкості деформування незворотна пластична деформація практично не впливає на швидкість деформування розтягуванням, але її вплив лінійно зростає з часом так, що становить не більше кількох секунд в момент розриву зразка.

Таким чином, залежність швидкості деформування від часу розтягування як суми миттєво-пружної ($\lambda_{\text{пр}}$ – час післядії, формула (4)) та в'язко-пружної (затриманої, час післядії λ_2) і миттєво-пластичної (незворотної, час післядії λ_1) (формула (5)) виражено сумою:

$$d\epsilon/dt = \lambda_{\text{пр}} \exp(-t/\lambda_{\text{пр}}) + \{ \int \lambda_1 \exp(-\tau/\lambda_1) \exp[-(t-\tau)/\lambda_2] d\tau \} / \Delta t. \quad (6)$$

Відповідні оцінки названих параметрів, одержані в процесі нормативних випробувань зразків безгалогенної кабельної пластмаси при різних швидкостях розтягування в умовах виробництва наведені в таблиці. Такі оцінки є суто емпіричними, а криві, розраховані за формулою (6) є апроксимацією експериментальних даних, яка дає можливість, по-перше, одержання додаткових кількісних характеристик динаміки розвитку деформації розтягування наповненого полімеру для порівняння впливу рецептурних та технологічних змін в умовах виробництва.

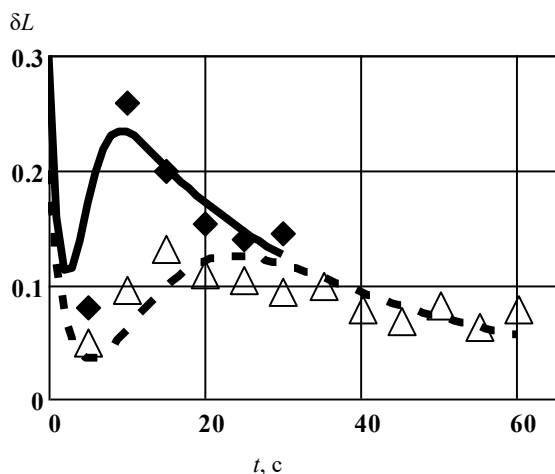


Рис. 3. Залежності середніх значень відносної деформації від часу t одноосного розтягування зразків безгалогенної кабельної пластмаси при різних швидкостях розведення затискачів і результати моделювання відповідних залежностей як суми трьох видів деформування за формулою (6): /хв. ($\delta L_{\text{ср}}$: Δ) і /2 = 100 мм/хв. ($\delta L_{\text{ср}}$: $\blacklozenge$)

Наприклад, визначення похідних формули (6) дає можливість оцінити вплив швидкості розтягування на час мінімуму і максимуму швидкості деформування, аналізувати внесок складових процесу деформування, тим самим встановлюючи вимоги до

випробування розтягуванням в умовах виробництва і підвищуючи інформаційну цінність цих випробувань.

По-друге, для аналізу впливу технологічних і рецептурних змін на механічні властивості полімерних матеріалів інформаційний пріоритет має саме аналітична модель динаміки деформування зразка.

На рис. 3 видно, що запропонована модель (6) не тільки пропонує пояснення наявності максимуму відносної деформації як суперпозиції двох взаємозалежних процесів деформування з різним часом післядії λ , але й дозволяє уточнювати вимоги до проведення експерименту: із збільшенням швидкості розведення затискачів час максимуму t_m значно зменшується. В такому разі максимум може бути зафіксований експериментально лише при суттєвому зменшенні відрізка часу від t до $t + \Delta t$ в (5), що експериментально підтверджено для конкретного матеріалу при швидкості 250 мм/хв.

Таблиця – Емпіричні оцінки параметру інтенсивності в'язко-пружної деформації $1/\lambda_2$ (формула 5) безгалогенної кабельної пластмаси при розтягуванні зразків з технологічними відмінностями, характерними для умов виробництва

Швидкість розтягування	Внутрішній шар оболонки $\Delta_{\text{ср}}=1,55$ мм	Зовнішній шар оболонки $\Delta_{\text{ср}}=1,61$ мм	Оболонка $\Delta_{\text{ср}}=2,40$ мм
	Інтенсивність деформації $1/\lambda_2, \text{с}^{-1}$		
50 мм/хв.	0,022	0,023	0,019
100 мм/хв.	0,048	0,051	0,037

Висновки. 1. Результати оцінки швидкості деформації видовження зразків від часу одноосного розтягування при різних швидкостях розведення затискачів в процесі процедури визначення механічних характеристик для безгалогенних кабельних пластмас при нормативних випробуваннях в умовах виробництва свідчать, що залежність відносного видовження $\delta L(t)$ зразків від часу одноосного розтягування має відтворювану характерну форму з мінімумом і максимумом для відмінних за структурою подібних наповнених безгалогенних полімерів. При цьому внутрішній і зовнішній шари оболонки кабелю з безгалогенної пластмаси мають суттєво різні значення нормативного параметру пластичності. Це свідчить про відмінності в структурі полімеру у внутрішніх і зовнішніх шарах оболонки в наслідок технологічного процесу примусового деформування при екструзії.

2. Запропоновано модель залежності швидкості деформування від часу розтягування як суми миттєво-пружної, в'язко-пружної і миттєво-пластичної (незворотної) деформацій: $d\epsilon/dt = \lambda_{\text{пр}} \exp(-t/\lambda_{\text{пр}}) + \{ \int \lambda_1 \exp(-\tau/\lambda_1) \exp[-(t-\tau)/\lambda_2] d\tau \} / \Delta t$. Наведені відповідні оцінки параметрів названих складових, одержані при апроксимації експериментальних даних запропонованою моделлю.

3. Запропонована модель, по-перше, дає пояснення наявності характерного максимуму ($t = t_m$) відносної деформації як суперпозиції двох взаємозалежних процесів деформування з різним часом післядії λ . По-друге, дозволяє уточнювати вимоги до проведення випробувань: із збільшенням швидкості розведення

затискачів час максимуму t_m суттєво зменшується, відповідно чим більша швидкість розведення затискачів, тим меншим має бути відрізок часу Δt між послідовними вимірюваннями довжини контрольної ділянки зразка.

4. Аналітична модель динаміки деформування зразка дає можливість оцінити вплив швидкості розтягування на час мінімуму і максимуму швидкості деформування, аналізувати внесок складових процесу деформування, тим самим встановлюючи вимоги до випробування розтягуванням в умовах виробництва і підвищуючи інформаційну цінність цих випробувань.

Список літератури

- 1 IEC 60811-501:2012. *Electric and optical fibre cables – Test methods for non-metallic materials – Part 501: Mechanical tests – Test for determining the mechanical properties of insulating and sheathing compounds*.
- 2 Шидловський М.С.. *Нові матеріали: частина 1. Структура і механічні властивості конструкційних полімерів*. Навчальний посібник для вузів. Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Скоропадського.

2017. 192 с.

- 3 Л.А. Щебенюк, С.А. Рябинин, А.И. Стурченко. К анализу зависимости механического напряжения от времени одноосного растяжения для образцов высоконаполненных антипиренами ПВХ-пластиков // *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2014. № 24. с. 19 – 21.
- 4 Сигорский В.П. *Математический аппарат инженера*. Киев: Техніка. 1975. 768 с.

References (transliterated)

- 1 IEC 60811-501:2012. *Electric and optical fibre cables – Test methods for non-metallic materials – Part 501: Mechanical tests – Test for determining the mechanical properties of insulating and sheathing compounds*.
- 2 Shchidlovskij M.S. *Novi materialy: chastyna 1. Struktura i mekhanichni vlastyivosti konstruktivnykh polimeriv* [New materials: part 1. Structure and mechanical properties polymer]. Kyiv: Polytechnic Institute Publ., 2017. 192 p.
- 3 Shchebeniuk L.A., Rjabinin S.A., Sturchenko A.I. The analysis of dependence mechanical tensile stress of filled PVC-polymers with time elongation. *Bulletin NTU “KhPI”*. 2014. no 24/ p. 19 – 21.
- 4 Sigorsky V.P. *Matematicheskij aparat inzhenera* [Mathematical device of engineer]. Kyiv: Technique. 1975. 768 p.

Nadiiшла (received) 28.10.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Золотарьов Володимир Володимирович (Золотарев Владимир Владимирович, Zolotarev Vladimir Vladimirovich) – кандидат технічних наук, директор департаменту ПАТ «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків; тел.: 728-12-48; e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua

Голик Оксана Вячеславівна (Голик Оксана Вячеславовна, Golik Oksana Vjacheslavovna) – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Електроізоляційна та кабельна техніка» Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", м. Харків; тел.: 707-65-44; e-mail: agurin@kpi.kharkov.ua.

Москвітін Євген Сергійович (Москвитин Евгений Сергеевич, Moskvitin Eugene Sergiyovich) – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри «Електроізоляційна та кабельна техніка» Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", м. Харків; тел.: 707-60-10; e-mail: moskvitin@kpi.kharkov.ua

Зиков Микола Борисович (Зыков Николай Борисович, Zykov Mykola Borysovych) – начальник ЦЗЛ ПАТ «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків; тел.: 754-52-04; e-mail: lab@yuzhcable.com.ua

Шурупова Аліна Альбертівна (Шурупова Алина Альбертовна, Shurupova Alina Albertovna) – начальник лабораторії випробувань пластмас ПАТ «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків; тел.: 754-52-04; e-mail: lab@yuzhcable.com.ua

Щебенюк Леся Артемівна (Щебенюк Леся Артемовна, Shchebeniuk Lesia Artemovna) – кандидат технічних наук, професор кафедри «Електроізоляційна та кабельна техніка» Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", м. Харків; тел.: 707-65-44; e-mail: agurin@kpi.kharkov.ua.

Васильєва Оксана Володимирівна (Васильева Оксана Владимировна, Vasylieva Oksana Volodymyrivna) – начальник лабораторії, ПАТ «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків; e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua