

В.М. ЗОЛОТАРЬОВ, Ю.П. АНТОНЕЦЬ, Л.А. ЩЕБЕНЮК, А.А. ШУРУПОВА

ПРО НЕОБХІДНІСТЬ ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІКИ РОЗВИТКУ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ МЕХАНІЧНИХ ВИПРОБУВАННЯХ НАПОВНЕНИХ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ В УМОВАХ КАБЕЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

Виконано аналіз результатів порівняння механічних властивостей поліолефіну наповненого антипіренами. Наведено експериментальні дані оцінювання динаміки розвитку деформації одноосного розтягування при нормативних випробуваннях кабельних полімерних композицій в умовах виробництва. Організація технологічного контролю забезпечення механічної міцності елементів конструкції, виготовлених із безгалогенних пластмас в умовах конкретного виробництва, є однією з актуальних задач при виготовленні пожежебезпечних кабелів. Для аналізу динаміки розвитку деформації безгалогенних кабельних пластмас і визначення практично важливої кількісної характеристики, необхідно дослідити початковий ділянку залежності між деформацією і часом, за якого деформація полімеру обмежена пружною та в'язкопружною деформацією. Представлено характерні залежності деформації видовження зразків від часу одноосного розтягування при постійній швидкості розведення затискачів в процесі нормативної процедури визначення механічних характеристик для безгалогенних кабельних пластмас. Для всіх зразків спостерігається початковий (до 10 – 15 секунд) лінійний ділянку з різною швидкістю зростання загальної деформації розтягування.

Ключові слова: безгалогенні кабельні полімерні композиції, деформація, час, навантаження

В.М. ЗОЛОТАРЬОВ, Ю.А. АНТОНЕЦЬ, Л.А. ЩЕБЕНЮК, А.А. ШУРУПОВА

О НЕОБХОДИМОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ В УСЛОВИЯХ КАБЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Выполнен анализ результатов сравнения механических свойств полиолефина наполненного антипиренами. Приведены экспериментальные данные оценки динамики развития деформации одноосного растяжения при нормативных испытаниях кабельных полимерных композиций в условиях производства. Организация технологического контроля обеспечения механической прочности элементов конструкции, изготовленных из безгалогенных пластмасс в условиях конкретного производства, является одной из актуальных задач при изготовлении пожаробезопасных кабелей. Для анализа динамики развития деформации безгалогенных кабельных пластмасс и определения практически важной количественной характеристики, необходимо исследовать начальный участок зависимости между деформацией и временем, при котором деформация полимера ограничена упругой и вязкоупругой деформацией. Представлены характерные зависимости деформации удлинения образцов от времени одноосного растяжения при постоянной скорости разведения зажимов в процессе нормативной процедуры определения механических характеристик для безгалогенных кабельных пластмасс. Для всех образцов наблюдается начальный (до 10 – 15 секунд) линейный участок с разной скоростью роста общей деформации растяжения.

Ключевые слова: безгалогенные кабельные полимерные композиции, деформация, время, нагрузка

V.M. ZOLOTAREV, Y.A. ANTONETS, L.A. SHCHEBENIUK, A.A. SHURUPOVA

ON THE NECESSITY OF DETERMINING THE DYNAMICS OF DEVELOPMENT OF DEFORMATION DURING MECHANICAL TESTS UNDER CONDITIONS OF CABLE PRODUCTION

The analysis of results of comparison of mechanical properties of polyolefin filled with fire retardants is carried out. Experimental data for evaluating the dynamics of the development of uniaxial tensile deformation during standard tests of cable polymer compositions under production conditions are presented. The organization of technological control of ensuring the mechanical strength of structural elements made of halogen-free plastics in a specific production environment is one of the urgent tasks in the manufacture of fire-safe cables. To analyze the dynamics of the development of deformation of halogen-free cable plastics and to determine a practically important quantitative characteristic, it is necessary to study the initial section of the relationship between deformation and time, at which the deformation of the polymer is limited by elastic and viscoelastic deformation. The characteristic dependences of the elongation deformation of the samples on the time of uniaxial tension at a constant rate of separation of the clamps are presented in the process of the standard procedure for determining the mechanical characteristics for halogen-free cable plastics. For all samples, an initial (up to 10 – 15 seconds) linear section is observed with a different growth rate of the total tensile strain.

Key words: halogen-free cable polymer compositions, deformation, time, load

Актуальність роботи зумовлена тим, що забезпечення пожежної безпеки кабелів і відповідно кабельних матеріалів – одна з основних задач кабельної техніки при впровадженні інноваційної продукції. Такими є сучасні конструкції кабелів з використанням безгалогенних пластмас. Особливістю безгалогенних пластмас є те, що механічна міцність в експлуатації цих

полімерних матеріалів для елементів конструкції безпосередньо залежить і від вмісту антипірену, і від технології накладання пластмаси. Тому організація технологічного контролю забезпечення механічної міцності елементів конструкції, виготовлених із безгалогенних пластмас в умовах конкретного виробництва, є однією з актуальних задач при виготовленні поже-

жебезпечних 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); – розтягувальне напруження $\sigma = P/F$ (tensile stress); – міцність під час розтягування $\sigma_m = P_m/F$ (tensile strength); – відносного видовження під час розривання $\delta = (l - l_0) \cdot 100/l_0$, % (elongation at break), де F – площа поперечного перерізу зразка до випробування, l_0 – контрольна довжина нерозтягнутого зразка, l – контрольна довжина зразка під час розривання.

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.

Важливо те, що загально відомим є явище релаксації напруження в полімерах – процес поступової зміни напруження в попередньо деформованому полімерному матеріалі. Саме це явище тісно пов'язане зі стійкістю полімерів до механічних навантажень впродовж терміну їх експлуатації.

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

Аналіз літератури. Деформація в'язкопружного тіла в момент часу t визначається напруженням в цей момент $\sigma(t)$ плюс деформація, що виникла в попередній малий період часу $\Delta\varepsilon$ [2]:

$$\varepsilon(t) = [\sigma(t)/E] + \Delta\varepsilon, \quad (1)$$

де E – модуль пружності; $\Delta\varepsilon$ – сума попередніх деформацій в моменти часу s на проміжку часу від 0 до t , вплив яких на поточну деформацію тим менший, чим більша різниця $t - s$:

$$\varepsilon(t) = [\sigma(t)/E] + E^{-1} \int K(t-s) \sigma(s) ds, \quad (2)$$

де $K(t)$ – 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.

Важливо те, що для аналізу динаміки розвитку деформації безгалогенних кабельних пластмас і визначення практично важливої кількісної характеристики, необхідно дослідити початковий часток залежності між деформацією і часом, за якого деформація полімеру обмежена пружною та в'язкопружною деформацією.

В [3] наведено залежності механічної напруженості від часу при одноосному розтягуванні для наповнених ПВХ-пластикатів і зразків високонаповнених антипіренами.

Для зразків наповнених антипіренами (мегалон) зафіксоване явище, назване умовно «текучість», за якого деформація зростає (пропорційно часу), а опір деформації різко зменшується: за час до 20 с становить 2,5 МПа/с, а за час з 20 с до 40 с становить 0,005 МПа/с. Різниця настільки значна, що нехтувати нею не слід. Запропоновану в [3] модель для кількісної характеристики участку «текучість», представлено на рис.1 і на її основі орієнтовно визначена оцінка коефіцієнту внутрішнього тертя η , який в СІ визначається в паскалях, помножених на секунду, і для зразків мегалону оцінений в діапазоні (140 – 160) Па·с.

Рис. 1. Схема участку «текучості» в залежності зусилля розтягування σ від часу розтягування t для зразків високонаповнених антипіренами [3]

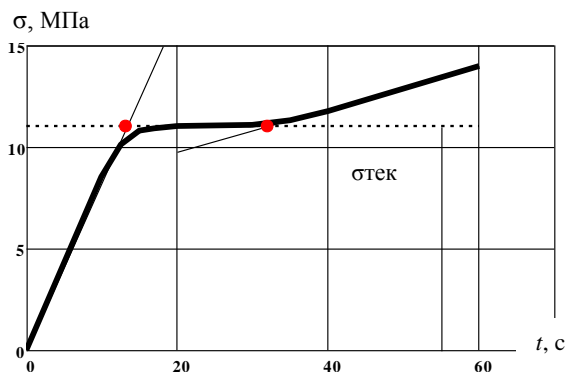


Рис. 1. Схема участку «текучості» в залежності зусилля розтягування σ від часу розтягування t для зразків високонаповнених антипіренами [3]

Важливо те, що при $\sigma < \sigma_{тек}$ спостерігається лінійний часток збільшення механічної напруженості від часу, що за постійної нормованої швидкості розведення затискачів розривної машини означає лінійне збільшення загальної деформації зразка при розтягуванні. Таким чином для високонаповнених антипіренами ПВХ-пластикатів за [3] спостерігається початковий часток залежності між деформацією і часом, за якого деформація полімеру обмежена пружною та в'язкопружною деформацією, оскільки «текучість» означає розвиток пластичної деформації.

Для практичних застосувань у кабельній техніці важливим є режим навантаження, за якого механічне напруження є постійна величина, оскільки відомо, що після виготовлення ізоляції чи оболонки із пластмаси в них завжди є внутрішні механічні напруження. Якщо $\sigma(t) = \sigma(s) = \sigma_{тек}$ (див. рис. 1), то диференціювання співвідношення (2) дає можливість визначити функцію впливу як пропорційну швидкості деформування і тим самим кількісно характеризувати механічну стійкість матеріалу за $\sigma(t) < \sigma_{тек}$, тобто для режимів навантаження притаманних умовам експлуатації:

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

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 кількісної характеристики динаміки розвитку деформації 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 ПІВ-ДЕНКАБЕЛЬ» за участі студентів з кафедри «Електроізоляційна і кабельна техніка» НТУ «ХПІ». Досліджено безгалогенні компаунди фірми Condor Compaunds GmbH.

На рис. 2 представлено характерні залежності відносної деформації видовження зразків від часу одноосного розтягування при постійній швидкості розведення затискачів в процесі нормативної процедури визначення механічних характеристик для безгалогенних кабельних пластмас.

Для всіх зразків спостерігається три участки залежності відносної деформації видовження зразків від часу одноосного розтягування: початковий (до 10 – 15 секунд) δL зменшується; середній (тривалість 20 – 25 секунд) δL практично не змінюється; третій (тривалість орієнтовно 20 секунд) δL поступово зменшується або зростає залежно від того, по відношенню до початкової $L(0)$ чи поточної $L(t)$ довжини обчислено δL .

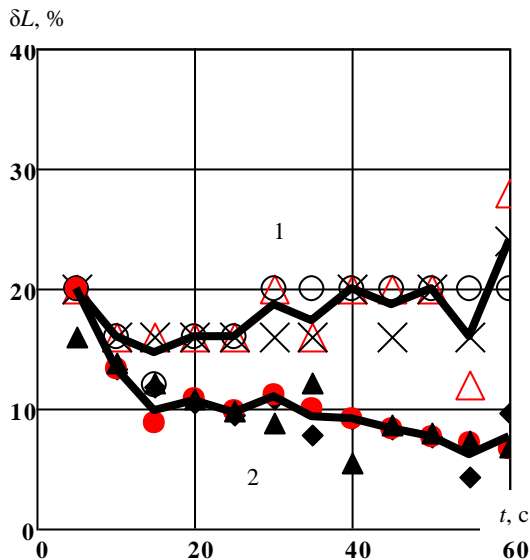


Рис. 2. Характерні залежності відносної деформації видовження зразків від часу одноосного розтягування для зразків безгалогенних кабельних пластмас: 1 – по відношенню до початкової довжини зразка $\delta L = \Delta L / L(0)$; 2 – по відношенню до поточної довжини зразка $\delta L = \Delta L / L(t)$

На наш погляд саме оцінка відносної деформації видовження зразків по відношенню до поточної довжини зразка $\delta L = \Delta L / L(t)$ (2 на рис. 2) відповідає поставленій меті: дослідженню динаміки деформування безгалогенних кабельних пластмас оскільки в кожен момент часу t швидкість деформування $d\epsilon/dt$ залежить від попередніх деформацій. Відтак найбільш інформативним є початковий участок залежності відносної деформації видовження зразків від часу одноосного розтягування.

В подальшому швидкість розтягування контрольної ділянки зменшується і суттєво відрізняється для різних зразків, що свідчить про нестабільність норма-

тивної характеристики відносного видовження при розриві $\delta = (l - l_0) \cdot 100 / l_0$ на відміну від лінійного збільшення загальної деформації зразка на початковому участку (до 15 секунд).

Процес деформування в'язкопружних матеріалів є одночасним розвитком пружних, в'язкопружних, пластичних і релаксаційних складових, співвідношення яких з часом змінюються.

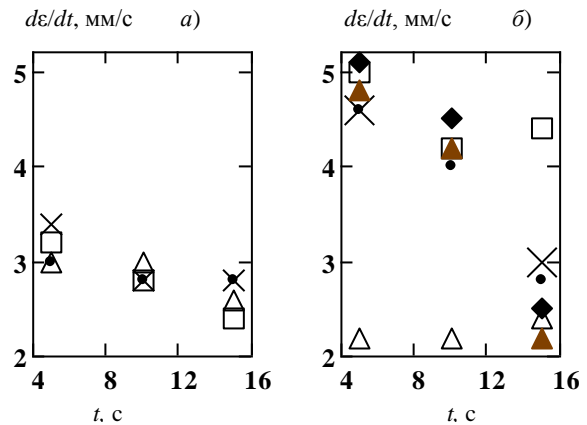


Рис. 3. Початкові участки (до 15 секунд) практично лінійного збільшення загальної деформації зразка при розтягуванні зразків безгалогенних кабельних пластмас характеризуються зменшенням швидкості деформування, однак суттєво різним її розсіюванням для різного вмісту антипіренів: а) – питома маса 1,5 г/см³; б) – питома маса 1,25 г/см³

Важливо те, що існує зв'язок між швидкістю деформації $d\epsilon/dt$ і міцністю під час одноосного розтягування σ_m (коефіцієнт лінійної кореляції 0,8, рис. 4, а). Тому при аналізі впливу технологічних і рецептурних змінних на механічні властивості полімерних матеріалів інформаційний пріоритет має саме динаміка деформації $d\epsilon/dt$ на початковому участку.

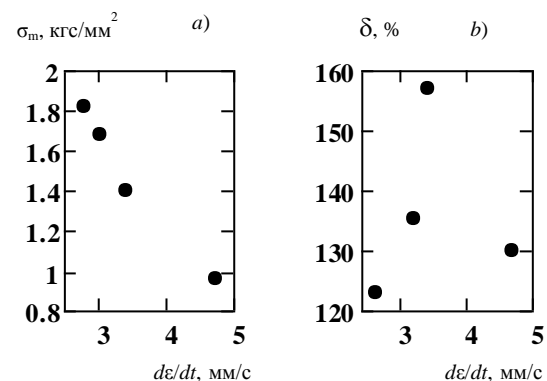


Рис. 4. Ілюстрація зв'язку між швидкістю деформації $d\epsilon/dt$ і а) міцністю під час одноосного розтягування σ_m (коефіцієнт лінійної кореляції 0,8; б) відносним видовженням в момент розривання зразка $\delta = (l - l_0) \cdot 100 / l_0$ (коефіцієнт лінійної кореляції 0,6)

Дані на рис. 4 свідчать про те, що у проміжок часу перед розривом зразка динаміка деформування принципово відрізняється від тієї, що була до моменту досягнення максимального розтягувального зусилля P_m (maximum tensile force).

Тому оцінювання показників динаміки деформації

має бути саме по відношенню до поточної довжини зразка $\delta L = \Delta L / L(t)$ (див. залежність 2 на рис. 2). Відповідні дані наведені в табл. 1 і проілюстровані на рис. 5.

Таблиця 1

№ п/п	Проміжок часу розтягування с	Оцінка змінювання швидкості розтягування мм/с	Оцінка прискорення мм/с ²
1	0 ... 10	1 ... 0,75	-0,025
2	10 ... 30	0,75 ... 0,75	0
3	30 ... 50	0,75 ... 1	+ 0,012
4	50 ... 55	1 ... 1,4	+ 0,25

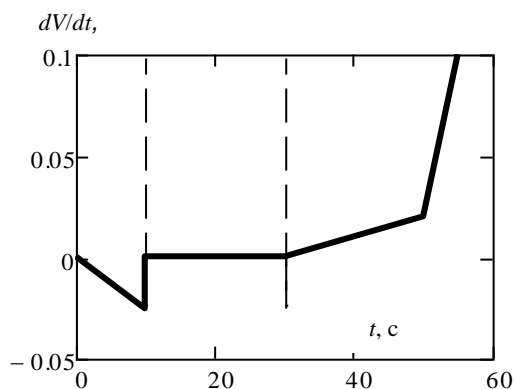


Рис. 5. До порівняння оцінки змінювання швидкості деформації dV/dt , мм/с², впродовж послідовних проміжків часу при одноосному розтягуванні для зразків безгалогенних кабельних пластмас

Дані рис. 5 кількісно підтверджують висновок щодо значної різниці динаміки деформування зразка до і після досягнення максимального розтягуювального зусилля P_m (maximum tensile force). Тому для визначення параметрів пластичності наповненої пластмаси слід кількісно характеризувати перші три ділянки на схемі рис. 5.

Відомо [2], що процес деформування в'язкопружних матеріалів є одночасним розвитком пружних, в'язкопружних, пластичних і релаксаційних складових, співвідношення яких з часом змінюються. Для експлуатації важливою є динаміка процесу деформування на перших двох ділянках, для яких релаксаційна складова найбільш виражена і відповідно в процесі експлуатації внутрішні напруження в матеріалі поступово зменшуються.

Для першої ділянки можливе орієнтовне оцінювання модуля пружності E^* за (1) якщо знехтувати в перші кілька секунд впливом попередніх деформацій $\Delta \varepsilon$:

$$E^* = \sigma(t) / \varepsilon(t). \quad (4)$$

Для другої ділянки можливе орієнтовне оцінювання коефіцієнту динамічної в'язкості η (коефіцієнту внутрішнього тертя [4]) як добуток середнього для цієї ділянки напруження σ_{2cp} на тривалість другої ділянки τ_2 , визначену експериментально:

$$\eta = \sigma_{2cp} \cdot \tau_2. \quad (5)$$

Відповідні оцінки для подібних матеріалів з питомою масою 1,5 г/см³ і 1,25 г/см³ наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Питома маса, г/см ³	Традиційні параметри		Додаткові параметри	
	Міцність при розтягуванні $\sigma_m = P_m/F$ МПа	Відносне видовження $\delta = (l - l_0) \cdot 100/l_0$, %	Модуль пружності E^* , МПа	Динамічна в'язкість η , МПа·с
1,50	13,65	316	16,5	1030
1,25	21,23	321	25,7	680

Параметри, які відображають динаміку деформування наповненого полімеру до досягнення максимального розтягуювального зусилля і тому є важливими саме для умов експлуатації, надають суттєву додаткову інформацію про пластичність матеріалу в цих умовах. Динамічна в'язкість η значно чутливіша до кількості наповнювача, ніж традиційний параметр відносне видовження при розриві.

Оцінки модуля пружності E^* на початку навантаження зразка, по перше, корелюють із традиційним параметром міцності σ_m , але його помітно більші значення свідчать про можливість визначення граничних навантажень, за яких переважають пружні і в'язкопружні деформації, а отже і процеси релаксації внутрішніх напружень в готовому виробі.

Тому при аналізі впливу технологічних і рецептурних змінних на механічні властивості полімерних матеріалів інформаційний пріоритет має саме динаміка деформації $d\varepsilon/dt$ на початкових ділянках навантаження зразка, які є важливими саме для умов експлуатації і надають суттєву додаткову інформацію про пластичність матеріалу в цих умовах.

Висновки. 1. Оцінки швидкості деформації видовження впродовж малих (3 с ... 5 с) послідовних проміжків часу розтягування (математично похідної деформації видовження $d\varepsilon/dt$) свідчать про те, що динаміка деформації видовження $d\varepsilon/dt$ поступово зменшується. При цьому чутливість динаміки деформації видовження $d\varepsilon/dt$ до зміни рецептури чи технології подібних матеріалів впродовж перших 15 с розтягування суттєва (рис. 2): для матеріалу з питомою масою 1,5 г/см³ $d\varepsilon/dt$ в діапазоні (2,5 ... 3,5) мм/с; для матеріалу з питомою масою 1,25 г/см³ $d\varepsilon/dt$ в діапазоні (2,0 ... 5,0) мм/с.

2. Існує зв'язок між $d\varepsilon/dt$ і міцністю під час одноосного розтягування σ_m (коефіцієнт лінійної кореляції 0,8, рис. 4a) і практично відсутній зв'язок між швидкістю деформації $d\varepsilon/dt$ і відносним видовженням при розриві δ (коефіцієнт лінійної кореляції 0,6, рис. 4b). Тому при аналізі впливу технологічних і рецептурних змін на механічні властивості матеріалу інформаційний пріоритет має саме динаміка деформації $d\varepsilon/dt$ на початкових ділянках навантаження зразка, які є важливими саме для умов експлуатації.

3. Параметри, які відображають динаміку деформування наповненого полімеру до досягнення максимального розтягуювального зусилля і тому є важливими саме для умов експлуатації, надають суттєву додаткову інформацію про пластичність матеріалу в цих умовах. Динамічна в'язкість значно чутливіша до кількості наповнювача, ніж відносне видовження при розриві.

4. Запропоновані додаткові кількісні характеристики динаміки розвитку деформації розтягування наповненого полімеру для порівняння впливу рецептур-

них та технологічних змін в умовах виробництва. накладання пластмаси на механічні властивості в'язко-пружних матеріалів. Визначення модуля пружності та коефіцієнту динамічної в'язкості для начальних ділянках навантаження зразка є важливим саме для умов експлуатації, за яких механічні навантаження мають бути суттєво меншими за так звану «міцність при розриві», а допустимі деформації на порядок менші за відносне видовження при розриві.

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 М.С. Шидловський. 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 высоконаполнен-

ных антипиренами ПВХ-пластикатов / Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – №24/- с. 19 – 21.

- 4 Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев. Электротехнические материалы. – Учебник для вузов. – Л.: Энергоатомиздат. – 1985. – 304 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 M.S. Shchidlovskij. New materials: part 1. Structure and mechanical properties polymer. Kyiv: Polytechnic Institute Publ., 2017. 192 p. (Ukr).
- 3 L.A. Shchebeniuk, S.A. Rjabinin, A.I. Sturchenko. The analysis of dependence mechanical tensile stress of filled PVC-polymers with time elongation. Kharkiv: Kharkiv Polytechnic Institute Publ., 2014. – №24 - p. 19 – 21.(Rus).
- 4 N.P. Bogoroditsky, V. V. Pasyнков, B. M. Tareev. Electrical engineering materials. Moscow. – 1979. – 361p.

Надійшла (received) 13.04.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Золотарьов Володимир Михайлович (Золотарев Владимир Михайлович, Zolotarev Vladimir Mihailovich) – доктор технічних наук, професор, генеральний директор ПАТ «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків; тел.: 728-12-48; e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua

Антонець Юрій Панасович (Антонец Юрий Афанасьевич, Antonets Yuri Afanasievich) – кандидат технічних наук, технічний директор ПАТ «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків; тел.: 728-12-64; e-mail: zavod@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.

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