

В.М. Золотарьов, О.В. Чулєєва, В.Л. Чулєєв, Т.А. Кулєшова, М.С. Суслін

## Вплив легувальної добавки на теплофізичні та реологічні властивості полімерної композиції, що не містить галогенів, для ізоляції та оболонки кабелів

Попит на вогнестійкі композиції, що не містять галогенів, для виготовлення пожежобезпечних проводів та кабелів безперервно зростає. Тому розробка цих матеріалів є актуальною проблемою. Метою статті є дослідження впливу легувальної добавки на теплофізичні та реологічні властивості композицій. Теплофізичні властивості визначено з використанням приладу TGA/DSC 1/1100 SF компанії METTLER TOLEDO. Реологічні дослідження полімерних матеріалів проведено методом капілярної віскозиметрії на приладі ИИРТ-АМ. Визначено вплив легувальної добавки на формування надмолекулярної структури наповнених полімерних композицій. Встановлено зниження ефективної в'язкості розплаву полімерної композиції в 6 разів зі зростанням швидкості зсуву в 40 разів при змінній температурі від 150 до 190 °С. Швидкість зсуву полімерної композиції з легувальною добавкою зростає в 40 разів з підвищенням напруження зсуву в 9 разів. Результати досліджень дають можливість обґрунтовано підходити до розроблення ефективних технологічних процесів виготовлення ізоляції та оболонки силових кабелів. Бібл. 29, табл. 3, рис. 8.

**Ключові слова:** кабельна продукція, легувальна добавка, реологічні властивості, температура плавлення, температура початку розкладу.

**Вступ.** В останні кілька десятиліть попит на вогнестійкі композиції, що не містять галогенів, для виготовлення пожежобезпечних проводів і кабелів безперервно зростає. Здебільшого це пов'язано з їх перевагами у скороченні димоутворення та зменшенні токсичних та корозійно-активних газів під час горіння в порівнянні з традиційно застосовуваними галогеновмісними негорючими кабельними матеріалами. Такі композиції переважно представляють собою матеріали, що мають у своєму складі полімер на основі поліолефінів і значну частку неорганічних антипіренів, зокрема гідроксиду алюмінію  $Al(OH)_3$  [1, 2]. Поліолефіни є одними з найбільш легкозаймистих матеріалів з високою теплою згорання, низьким значенням кисневого індексу та високим тепловиділенням, залишаючи мало або зовсім не залишаючи коксового залишку [3, 4].

Для того щоб пройти різні випробування на відповідність нормам пожежної безпеки можуть використовуватися композиції із вмістом відповідного наповнювача на рівні 60–80 %. Безумовно, у разі цього виникають досить складні завдання щодо технологічності та механічних показників композицій, які доводиться вирішувати і виробникам кабельних компаундів, і виробникам кабельної продукції [5].

Реологічні вимірювання полімерних розплавів широко використовуються в технологіях переробки полімерних композицій для контролю якості та оптимізації процесу. Іншою цікавою областю реології є отримання інформації про молекулярні параметри полімерів та будову структури в гетерогенних полімерних системах. У публікації [6] дається огляд впливу молекулярної маси, молекулярно-масового розподілу, ступеню розгалуження на різні реологічні характеристики. Для дисперсних полімерних систем, таких як матеріали з частинками та полімерними сумішами, реологічні вимірювання можуть застосовуватися як простий метод якісного дослідження взаємодій між різними фазами та змін геометричних структур, створених неоднорідностями [7].

Екструзія є основним методом переробки полімерів в кабельній промисловості. Майже всі операції з переробки полімерів потребують екструдера для плавлення, змішування та формування виробів [8, 9].

Щоб зрозуміти та оптимізувати процес екструзії, спочатку необхідно зрозуміти реологічні властивості [10]. Іншими словами, важко зрозуміти та оптимізувати операцію переробки полімеру, не маючи спочатку повного розуміння термореологічної поведінки полімерного матеріалу в широкому діапазоні часу. Більш того, використовуючи реологічні властивості як у зсувних, так і в поздовжніх потоках, необхідно визначити відповідне рівняння, здатне вловити правильну реологічну реакцію матеріалу, що продавлюється через капілярні та щілинні екструзійні головки [8-11].

У роботах [12-17] обговорюються деякі важливі реологічні властивості поліолефінів та їх сумішей, пов'язані з екструзією, у тому числі: вхідний тиск під час екструзії, важливий для визначення розширення розплавів полімерів; вплив температури та тиску на реологічні властивості [18, 19]; пристінне проковзування полімерів [20-25].

Водночас для дисперсних полімерних систем зв'язок між структурою і реологічними характеристиками не є однозначним, повинні застосовуватися додаткові методи досліджень, щоб оцінити внесок різних елементів структур [26]. В роботі [27] досліджено вплив модифікатора на теплофізичні властивості пожежобезпечних композиційних матеріалів.

Серед вимог до кабельних полімерних композицій, що не містять галогенів, є здатність забезпечувати високі лінійні швидкості екструзії. Таким чином, дослідження впливу легувальних добавок на реологічні та теплофізичні властивості полімерних композицій, що не містять галогенів, є актуальною проблемою.

**Мета роботи** – дослідження впливу легувальної добавки на теплофізичні та реологічні властивості полімерних композицій, що не містять галогенів, для силових кабелів на напругу до 1 кВ із визначенням температур фазових та структурних перетворень полімерних композицій.

**Полімерні кабельні композиції.** Досліджено пожежобезпечні полімерні композиції, що не містять галогенів: зразок 1 та зразок 2. Полімерна матриця (зразок 3) для полімерних композицій є сумішшю поліолефінів (лінійний поліетилен низької густини; поліолефіновий еластомер та модифікований малей-

новим ангідридом лінійний поліетилен низької густини). Наповнювач-антипірен – тригідрат оксиду алюмінію. Вміст наповнювача-антипірену в полімерних композиціях становить 60 %. Полімерна композиція у зразка 2 містить легувальну добавку у кількості 2 %.

В якості легувальної добавки використано парафінові вуглеводні. Технічні властивості легувальної добавки вказані в табл. 1.

Таблиця 1

Властивості легувальної добавки

Показник	Значення
В'язкість розплаву за температури 140 °С, Па·с, 10 <sup>3</sup>	180-300
Температура краплепадіння, °С, не менше ніж	103
Твердість по пенетрації, %, не більше ніж	5
Об'ємний питомий опір за температури 110 °С, та напруги не менше ніж 100 В, Ом·см, не менше ніж	1·10 <sup>14</sup>

Полімерну композицію виготовлено на лінії компаундування компанії X-Compond (Швейцарія). До складу лінії входить наступне обладнання: компаундер/змішувач 120-16 L/D, екструдер, що подає, GS 140-6 L/D з гранулюючою головкою, система дозування інгредієнтів, транспортні системи інгредієнтів і готової продукції, система охолодження гранул.

**Обладнання та методика.** Серію експериментів з вивчення фазових та структурних перетворень, процесів термоокислювальної деструкції проведено з використанням приладу термогравіметричного аналізу (TGA) та диференціальної скануючої калориметрії (DSC) TGA/DSC 1/1100 SF компанії METTLER TOLEDO за швидкості нагрівання 10 та 50 град/хв.

Робочий діапазон температур – від кімнатної до 1100 °С; швидкість нагрівання – від 0,01 град/хв до 100 град/хв.

Мікроваги – максимальна вага під час навішування становить 1 г. Роздільна здатність приладу TGA – 1 мкг у всьому діапазоні зважування.

Діапазон вимірювання DSC: 1 – ±350 мВт; роздільна здатність – 0,04 мкВт.

Визначення температур фазових та структурних перетворень проведено за характерними точками опису фізичних явищ на діаграмах DSC.

Початок ефекту плавлення або склування визначено як точку перетину базової лінії з діаграмою перед фазовим переходом. Закінчення ефектів визначено як точку перетину базової лінії з діаграмою після фазового переходу та дотичної кривої, яку проведено до точки перетину.

Визначення температур розкладу полімерних композицій проведено, використовуючи діаграми DSC, які отримано за допомогою приладу TGA/DSC 1/1100 SF (швидкість підняття температури – 10 град/хв). Температури початку та закінчення розкладу визначали як точки перетину базової лінії з діаграмою до та після розкладу полімерних композицій та дотичної до діаграми, яку проведено до точки перетину. Втрату маси визначено як відстань на осі ординат між дотичною до TGA діаграми та паралельною до осі абсцис у точці закінчення процесу.

Дослідження реологічних властивостей полімерних матеріалів проведено методом капілярної віскозиметрії на приладі ИИРТ-АМ.

Властивості полімерних композицій визначено за температури 150-190 °С та навантаженнях від 37,24 до 211,82 Н. Використовуючи отримані дані, розраховано напруження зсуву, швидкість зсуву та ефективну в'язкість.

Напруження зсуву визначено за формулою (1) [28]

$$\tau = (P - P_{in}) \frac{r}{2 \cdot L \cdot \pi \cdot R^2}, \quad (1)$$

де  $\tau$  – напруження зсуву, Па;  $P$  – зусилля, необхідне для забезпечення витрати через капіляр, Н;  $P_{in}$  – вхідні втрати, Н;  $R$  – радіус циліндру, см;  $r$  – радіус капіляру, см;  $L$  – довжина капіляру, см.

Швидкість зсуву визначено за формулою (2) [28]

$$\dot{\gamma} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot r^3}, \quad (2)$$

де  $\dot{\gamma}$  – швидкість зсуву, с<sup>-1</sup>;  $Q$  – витрата матеріалу, см<sup>3</sup>/с ( $Q = \pi \cdot R^2 \cdot h$ , де  $h$  – стаціонарна швидкість занурення поршню, см/с;  $R$  – радіус циліндру, см);  $r$  – радіус капіляру, см.

Ефективну в'язкість визначено за формулою (3) [28]

$$\eta = \tau / \dot{\gamma}, \quad (3)$$

де  $\eta$  – ефективна в'язкість, Па·с.

Побудовано графіки залежності напруження зсуву від швидкості зсуву та ефективної в'язкості від швидкості та напруження зсуву.

З метою оцінювання енергії, яка необхідна для переходу системи в так званий перехідний стан, тобто коли врівноважені руйнування та створення зв'язків, розраховано енергію активації.

Енергію активації в'язкої течії визначено за формулою (4) [28]

$$E_{act} = \frac{R \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot \ln(MFR_2 / MFR_1)}{T_2 - T_1}, \quad (4)$$

де  $T$  – температура вимірювання, К;  $MFR_1$  та  $MFR_2$  – показники текучості розплаву за  $T_1$  и  $T_2$ , г/10 хв;  $R$  – універсальна газова постійна (8,314 Дж/(моль·К)).

Серію експериментів з визначення електричної міцності проведено з використанням апарату типу АИИ-70, питомого електричного опору – приладу типу КИСИ-1.

Статистичний аналіз виконано методом дисперсного аналізу (ANOVA) з використанням моделі асимптотичної регресії за інтегральним алгоритмом Левенберга-Марквардта із рівнем значущості  $\alpha$  0,05.

**Результати досліджень.** Для проведення процесу екструзії полімерних композицій, що не містять галогенів, для кабельної продукції важливо дослідити їх теплофізичні характеристики такі як: температури фазових та структурних перетворень, температури початку розкладу. Останні, також мають важливе значення для експлуатації кабельної продукції за підвищених температур та температур короткого замикання. Для силових кабелів на напругу до 1 кВ з ізоляцією із композиції, що не містить галогенів, температура короткого замикання становить 170 °С (тривалість не більше ніж 5 с).

На рис. 1, рис. 2 представленні DSC діаграми полімерної матриці та полімерної композиції, що не містять галогенів без та з вмістом легувальної добавки.

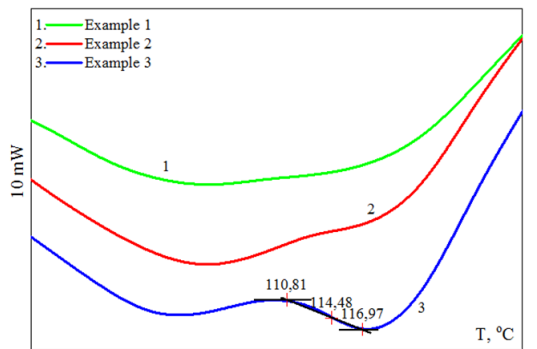


Рис. 1. DSC діаграма визначення фазових переходів

Температури початку та закінчення розкладання (рис. 2) змінюються в залежності від складу: для полімерної матриці (крива 3) в діапазоні від 229 °C до 254 °C, для полімерної композиції (крива 1) – від 258 °C до 275 °C, а для полімерної композиції з легувальною добавкою (крива 2) – від 269 – 282 °C.

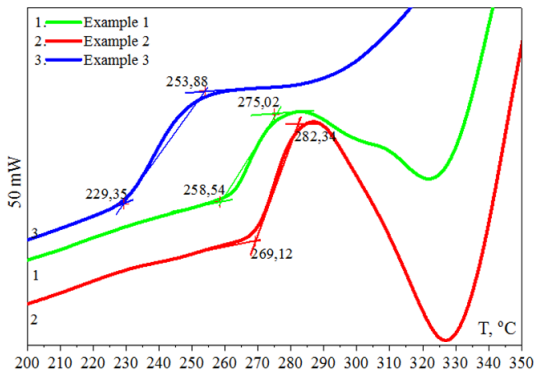


Рис. 2. DSC діаграма визначення температури початку та закінчення розкладу

На рис. 3, 4 представлені TGA діаграми полімерної матриці та полімерної композиції, що не містять галогенів, без та з вмістом легувальної добавки.

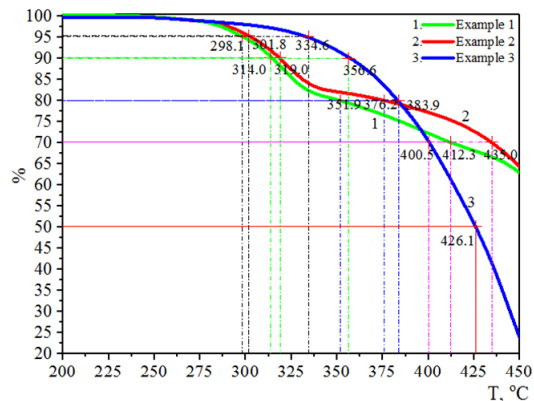


Рис. 3. TGA діаграма. Втрата маси в діапазоні від 200 до 450 °C

В табл. 2 вказані дані втрати маси, визначені з TGA діаграми (рис. 3) для полімерної матриці та полімерної композиції, що не містять галогенів без та з вмістом легувальної добавки.

Виходячи з даних табл. 2 видно, що для зразків 1, 2 за втрати маси від 5 до 20 %, значення температур нижче (від 298 – 376 °C), ніж для зразка 3 (334 – 383 °C). При досягненні температури 275 °C (рис. 3), спостерігається різка зміна втрати маси (криві 1, 2). Це

пов'язано з процесом дегідратації тригідрату оксиду алюмінію з поглинанням тепла і виділенням води. Зразок 3 втрачає 50 % маси за температури 426 °C.

Таблиця 2

Втрата маси, %	Температура, °C		
	Зразок 1 (Example 1)	Зразок 2 (Example 2)	Зразок 3 (Example 3)
5	298,1	301,8	334,6
10	314,0	319,0	356,6
20	351,9	376,2	383,9
30	412,3	435,0	400,5
50	–	–	426,1

З аналізу TGA діаграми (рис. 4) видно, що полімерна матриця втрачає 100 % маси за температури 525 °C. Для зразків 1, 2 вже за температури 560 °C втрата маси не змінюється, залишок становить 38 % від загальної маси полімерної композиції, що відповідає втраті хімічно зв'язаної води та збігається з теоретичними розрахунками, представленими в [29].

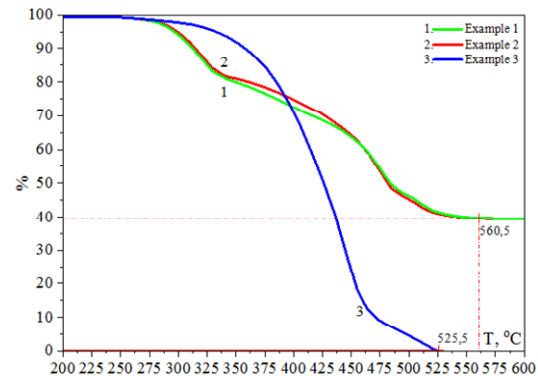


Рис. 4. TGA діаграма. Втрата маси в діапазоні від 200 до 600 °C

Аналіз кривих DSC та TGA діаграм (рис. 1 – рис. 4) показує, що полімерні композиції доцільно використовувати для виготовлення кабельної продукції, у якій максимальна тривала температура струмопровідної жили не перевищує 90 °C, а максимальна температура за умов короткого замикання становить 170 °C. Одночасно встановлено оптимальний температурний інтервал екструзії полімерних композицій. Реологічні дослідження проведено за температур 150, 170 та 190 °C.

На рис. 5 та рис. 6 представлені залежності ефективної в'язкості від швидкості зсуву та ефективної в'язкості від напруження зсуву.

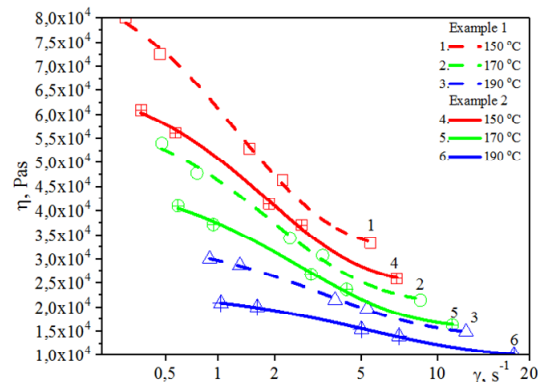


Рис. 5. Залежність за різних температур ефективної в'язкості від швидкості зсуву полімерних композицій

На рис. 5 для полімерної композиції зразка 2 спостерігається більш суттєве зниження ефективної в'язкості у всьому діапазоні температури під час підвищення швидкості зсуву в порівнянні з полімерною композицією зразка 1.

На рис. 6 спостерігається зменшення ефективної в'язкості зі зростанням напруження зсуву для зразка 1 від  $8 \cdot 10^4$  до  $1,5 \cdot 10^4$  Па·с, для зразка 2 від  $6,1 \cdot 10^4$  до  $1 \cdot 10^4$  Па·с. Легувальна добавка забезпечує ефективний розподіл наповнювача-антипірену в полімерній матриці внаслідок чого формується упорядкована надмолекулярна структура.

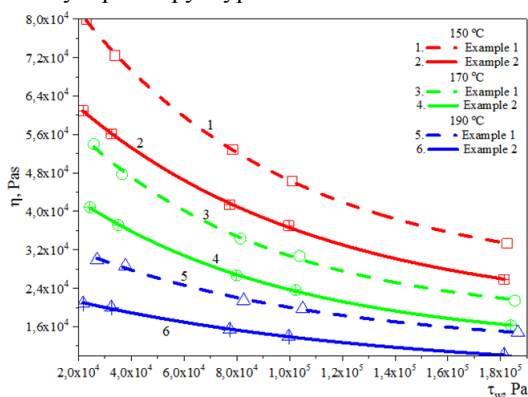


Рис. 6. Залежність ефективної в'язкості від напруження зсуву полімерних композицій за різних температур

На рис. 7 представлені графічні залежності швидкості зсуву від напруження зсуву (криві течії) для полімерних композицій зразків 1 та 2 відповідно. Характер кривих вказує на те, що для досягнення більших значень швидкості зсуву під час течії полімерних композицій потрібні більші значення напруження зсуву. Для полімерної композиції зразка 2 криві течії (4, 5, 6) за фіксованих значень напруження зсуву зміщуються у бік вищих значень швидкості зсуву у порівнянні з полімерною композицією зразка 1 (криві 1, 2, 3).

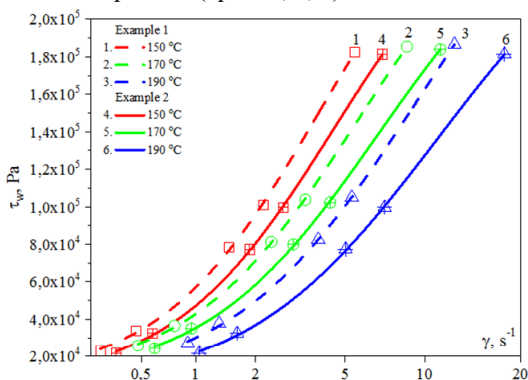


Рис. 7. Залежність за різних температур напруження зсуву від швидкості зсуву полімерних композицій

На рис. 8 представлені графічні залежності енергії активації в'язкої течії від навантаження для полімерних композицій зразка 1 та зразка 2.

Енергія активації в'язкої течії визначає енергетичні бар'єри, які долаються в елементарному акті течії та встановлює вплив температури на ефективну в'язкість: чим більше енергія активації, тим значніший вплив температури на ефективну в'язкість.

Для полімерних композицій зразка 1 та зразка 2 енергія активації зменшується з підвищенням наван-

таження, причому енергія активації полімерної композиції зразка 1 набуває менших значень у порівнянні з полімерною композицією зразка 2.

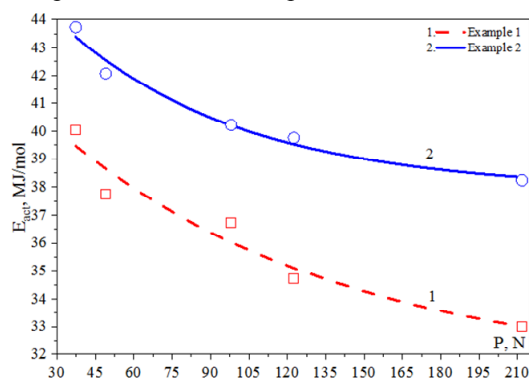


Рис. 8. Залежність енергії активації в'язкої течії від навантаження для полімерних композицій

Досліджено електрофізичні властивості полімерних композицій зразок 1, зразок 2, зразок 3. Питомий електричний опір визначається наявністю вільних зарядів (електронів та іонів) і їх рухливістю. Електрична міцність – це напруженість електричного поля, за значення якої відбувається пробій.

Результати дослідження представлено в табл. 3.

Таблиця 3

Електрофізичні показники полімерних композицій

Показник	Зразок 1 (Example 1)	Зразок 2 (Example 2)	Зразок 3 (Example 3)
Об'ємний питомий опір, Ом·см	$1,15 \cdot 10^{15}$	$1,32 \cdot 10^{15}$	$1 \cdot 10^{16}$
Електрична міцність, кВ/мм	45,0	48,5	23,5

Порівнювати доцільно пожегобезпечні полімерні композиції, що не містять галогенів: зразок 1 та зразок 2.

З даних табл. 3 видно, що із введенням легувальної добавки об'ємний питомий опір підвищується від  $1,15 \cdot 10^{15}$  до  $1,32 \cdot 10^{15}$  Ом·см, електрична міцність підвищується від 45 до 48,5 кВ/мм.

### Висновки.

1. Визначено вплив легувальної добавки на формування надмолекулярної структури наповнених полімерних композицій для кабельної продукції, за рахунок чого підвищується температура початку розкладу на  $11 \text{ }^\circ\text{C}$  та кінця розкладу на  $7 \text{ }^\circ\text{C}$ .

2. Показано доцільність використання пожегобезпечних композицій для виготовлення кабельної продукції, у якій максимальна тривала температура струмопровідної жили не перевищує  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ , а максимальна температура за умов короткого замикання становить  $170 \text{ }^\circ\text{C}$ .

3. Вперше показано вплив легувальної добавки на зниження ефективної в'язкості розплаву полімерної композиції з  $6 \cdot 10^4$  до  $1 \cdot 10^4$  Па·с зі зростанням швидкості зсуву. Швидкість зсуву полімерної композиції, що містить легувальну добавку, зростає від  $0,5$  до  $20 \text{ s}^{-1}$  з підвищенням напруження зсуву.

4. Вперше досліджено вплив легувальної добавки на електрофізичні властивості пожегобезпечних полімерних композицій, що не містять галогенів. Із введенням легувальної добавки електричний опір підвищується



від  $1,15 \cdot 10^{15}$  до  $1,32 \cdot 10^{15}$  Ом·см, та електрична міцність підвищується від 45 до 48,5 кВ/мм.

5. Результати досліджень дають можливість обгрунтовано підходити до розроблення ефективних технологічних процесів виготовлення ізоляції, оболонок силових кабелів з полімерних композицій, що не містять галогенів.

**Конфлікт інтересів.** Автори статті заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Beyer G. *The Global Cable Industry: Materials, Markets, Products*. Wiley Publ., 2021. doi: <https://doi.org/10.1002/9783527822263>.
2. Meinier R., Sonnier R., Zavaleta P., Suard S., Ferry L. Fire behavior of halogen-free flame retardant electrical cables with the cone calorimeter. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, vol. 342, pp. 306-316. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.08.027>.
3. Papaspyrides C.D., Kiliaris P. *Polymer Green Flame Retardants*. Elsevier, 2014. doi: <https://doi.org/10.1016/C2010-0-66406-6>.
4. Nazir R., Gooneie A., Lehner S., Jovic M., Rupper P., Ott N., Hufenus R., Gaan S. Alkyl sulfone bridged phosphorus flae-retardants for polypropylene. *Materials & Design*, 2021, vol. 200, pp. 109459. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109459>.
5. VISCOSPEED in HFFR compounds: Big impact with minimal dosage. *Compounding World*, October, 2020, pp. 48-49. Available at: <https://content.yudu.com/web/1r19/0A1r12p/CWOct20/html/print/CW%20October%202020%20pdf%20for%20download.pdf> (Accessed 19 November 2021).
6. Munstedt H. Rheological Measurements and Structural Analysis of Polymeric Materials. *Polymers*, 2021, vol. 13, no. 7, p. 1123. doi: <https://doi.org/10.3390/polym13071123>.
7. Munstedt H. *Rheological and Morphological Properties of Dispersed Polymeric Materials*. Carl Hanser Verlag Publ., 2016. 473 p. doi: <https://doi.org/10.3139/9781569906088>.
8. Dealy J.M., Wissbrun K.F. *Melt Rheology and Its Role in Plastics Processing – Theory and Applications*. Springer Science & Business Media, 1990, 680 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-94-009-2163-4>.
9. Agassant J.-F., Avenas P., Carreau P.J., Vergnes B., Vincent M. *Polymer Processing Principles and Modelling*. Carl Hanser Verlag Publ., 2017. 883 p. doi: <https://doi.org/10.3139/9781569906064>.
10. Barnes H.A. Rheology: Principles, Measurements and Applications. *Powder Technology*, 1996, vol. 86, no. 3, pp. 313. doi: [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(96\)90008-X](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(96)90008-X).
11. Brereton M.G. Dynamics of Polymeric Liquids. *Physics Bulletin*, 1978, vol. 29, no. 1, pp. 26. doi: <https://doi.org/10.1088/0031-9112/29/1/038>.
12. Mitsoulis E., Hatzikiriakos S.G. Rheological Properties Related to Extrusion of Polyolefins. *Polymers*, 2021, vol. 13, no. 4, pp. 489. doi: <https://doi.org/10.3390/polym13040489>.
13. Cogswell F.N. Measuring the Extensional Rheology of Polymer Melts. *Transactions of the Society of Rheology*, 1972, vol. 16, no. 3, pp. 383-403. doi: <https://doi.org/10.1122/1.549257>.
14. Pearson J.R.A. Polymer melt rheology: a guide for industrial practice. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 1981, vol. 8, no. 3-4, pp. 365-366. doi: [https://doi.org/10.1016/0377-0257\(81\)80033-X](https://doi.org/10.1016/0377-0257(81)80033-X).
15. Zatloukal M. Measurements and modeling of temperature-strain rate dependent uniaxial and planar extensional viscosities for branched LDPE polymer melt. *Polymer*, 2016, vol. 104, pp. 258-267. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2016.04.053>.
16. Ansari M., Alabbas A., Hatzikiriakos S.G., Mitsoulis E. Entry Flow of Polyethylene Melts in Tapered Dies. *International Polymer Processing*, 2010, vol. 25, no. 4, pp. 287-296. doi: <https://doi.org/10.3139/217.2360>.
17. Padmanabhan M., Macosko C.W., Padmanabhan M. Extensional viscosity from entrance pressure drop measurements. *Rheologica Acta*, 1997, vol. 36, no. 2, pp. 144-151. doi: <https://doi.org/10.1007/BF00366820>.

18. Laun H.M. Pressure dependent viscosity and dissipative heating in capillary rheometry of polymer melts. *Rheologica Acta*, 2003, vol. 42, no. 4, pp. 295-308. doi: <https://doi.org/10.1007/s00397-002-0291-6>.
  19. Laun H.M. Capillary rheometry for polymer melts revisited. *Rheologica Acta*, 2004, vol. 43, no. 5, pp. 509-528. doi: <https://doi.org/10.1007/s00397-004-0387-2>.
  20. Brochard F., De Gennes P.G. Shear-dependent slippage at a polymer/solid interface. *Langmuir*, 1992, vol. 8, no. 12, pp. 3033-3037. doi: <https://doi.org/10.1021/la00048a030>.
  21. Hatzikiriakos S.G., Dealy J.M. Wall slip of molten high density polyethylenes. II. Capillary rheometer studies. *Journal of Rheology*, 1992, vol. 36, no. 4, pp. 703-741. doi: <https://doi.org/10.1122/1.550313>.
  22. Brochard-Wyart F., Gay C., de Gennes P.-G. Slippage of Polymer Melts on Grafted Surfaces. *Macromolecules*, 1996, vol. 29, no. 1, pp. 377-382. doi: <https://doi.org/10.1021/ma950753j>.
  23. Hatzikiriakos S. G. Appropriate Boundary Conditions in the Flow of Molten Polymers. *International Polymer Processing*, 2010, vol. 25, no. 1, pp. 55-62. doi: <https://doi.org/10.3139/217.2304>.
  24. Hatzikiriakos S.G. Wall slip of molten polymers. *Progress in Polymer Science*, 2012, vol. 37, no. 4, pp. 624-643. doi: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.09.004>.
  25. Hatzikiriakos S.G. Slip mechanisms in complex fluid flows. *Soft Matter*, 2015, vol. 11, no. 40, pp. 7851-7856. doi: <https://doi.org/10.1039/C5SM01711D>.
  26. Соколов А.В., Roedolf D. Введение в практическую реологию полимеров. *Пластические массы*, 2018, № 5-6, С. 31-34. doi: <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2018-5-6-31-34>.
  27. Chulieva O., Zolotaryov V. Effect of the modifier on the thermophysical properties of fireproof ethylene-vinyl acetate copolymer composition materials. *Technology Audit and Production Reserves*, 2018, vol. 6, no. 1(44), pp. 23-28. doi: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.150294>.
  28. Садова А.Н., Бортников В.Г., Заикин А.Е. Практикум по технологии переработки и испытаниям полимеров и композиционных материалов. – М.: КолосС, 2011. – 191 с.
  29. Weil E.D., Levchik S.V. *Flame Retardants for Plastics and Textiles*. Carl Hanser Verlag Publ., 2015. doi: <https://doi.org/10.3139/9781569905791.fm>.
- #### REFERENCES
1. Beyer G. *The Global Cable Industry: Materials, Markets, Products*. Wiley Publ., 2021. doi: <https://doi.org/10.1002/9783527822263>.
  2. Meinier R., Sonnier R., Zavaleta P., Suard S., Ferry L. Fire behavior of halogen-free flame retardant electrical cables with the cone calorimeter. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, vol. 342, pp. 306-316. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.08.027>.
  3. Papaspyrides C.D., Kiliaris P. *Polymer Green Flame Retardants*. Elsevier, 2014. doi: <https://doi.org/10.1016/C2010-0-66406-6>.
  4. Nazir R., Gooneie A., Lehner S., Jovic M., Rupper P., Ott N., Hufenus R., Gaan S. Alkyl sulfone bridged phosphorus flae-retardants for polypropylene. *Materials & Design*, 2021, vol. 200, pp. 109459. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109459>.
  5. VISCOSPEED in HFFR compounds: Big impact with minimal dosage. *Compounding World*, October, 2020, pp. 48-49. Available at: <https://content.yudu.com/web/1r19/0A1r12p/CWOct20/html/print/CW%20October%202020%20pdf%20for%20download.pdf> (Accessed 19 November 2021).
  6. Munstedt H. Rheological Measurements and Structural Analysis of Polymeric Materials. *Polymers*, 2021, vol. 13, no. 7, p. 1123. doi: <https://doi.org/10.3390/polym13071123>.
  7. Munstedt H. *Rheological and Morphological Properties of Dispersed Polymeric Materials*. Carl Hanser Verlag Publ., 2016. 473 p. doi: <https://doi.org/10.3139/9781569906088>.

8. Dealy J.M., Wissbrun K.F. *Melt Rheology and Its Role in Plastics Processing – Theory and Applications*. Springer Science & Business Media, 1990, 680 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-94-009-2163-4>.
9. Agassant J.-F., Avenas P., Carreau P.J., Vergnes B., Vincent M. *Polymer Processing Principles and Modelling*. Carl Hanser Verlag Publ., 2017. 883 p. doi: <https://doi.org/10.3139/9781569906064>.
10. Barnes H.A. Rheology: Principles, Measurements and Applications. *Powder Technology*, 1996, vol. 86, no. 3, pp. 313. doi: [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(96\)90008-X](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(96)90008-X).
11. Brereton M.G. Dynamics of Polymeric Liquids. *Physics Bulletin*, 1978, vol. 29, no. 1, pp. 26. doi: <https://doi.org/10.1088/0031-9112/29/1/038>.
12. Mitsoulis E., Hatzikiriakos S.G. Rheological Properties Related to Extrusion of Polyolefins. *Polymers*, 2021, vol. 13, no. 4, pp. 489. doi: <https://doi.org/10.3390/polym13040489>.
13. Cogswell F.N. Measuring the Extensional Rheology of Polymer Melts. *Transactions of the Society of Rheology*, 1972, vol. 16, no. 3, pp. 383-403. doi: <https://doi.org/10.1122/1.549257>.
14. Pearson J.R.A. Polymer melt rheology: a guide for industrial practice. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 1981, vol. 8, no. 3-4, pp. 365-366. doi: [https://doi.org/10.1016/0377-0257\(81\)80033-X](https://doi.org/10.1016/0377-0257(81)80033-X).
15. Zatloukal M. Measurements and modeling of temperature-strain rate dependent uniaxial and planar extensional viscosities for branched LDPE polymer melt. *Polymer*, 2016, vol. 104, pp. 258-267. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2016.04.053>.
16. Ansari M., Alabbas A., Hatzikiriakos S.G., Mitsoulis E. Entry Flow of Polyethylene Melts in Tapered Dies. *International Polymer Processing*, 2010, vol. 25, no. 4, pp. 287-296. doi: <https://doi.org/10.3139/217.2360>.
17. Padmanabhan M., Macosko C.W., Padmanabhan M. Extensional viscosity from entrance pressure drop measurements. *Rheologica Acta*, 1997, vol. 36, no. 2, pp. 144-151. doi: <https://doi.org/10.1007/BF00366820>.
18. Laun H.M. Pressure dependent viscosity and dissipative heating in capillary rheometry of polymer melts. *Rheologica Acta*, 2003, vol. 42, no. 4, pp. 295-308. doi: <https://doi.org/10.1007/s00397-002-0291-6>.
19. Laun H.M. Capillary rheometry for polymer melts revisited. *Rheologica Acta*, 2004, vol. 43, no. 5, pp. 509-528. doi: <https://doi.org/10.1007/s00397-004-0387-2>.
20. Brochard F., De Gennes P.G. Shear-dependent slippage at a polymer/solid interface. *Langmuir*, 1992, vol. 8, no. 12, pp. 3033-3037. doi: <https://doi.org/10.1021/la00048a030>.
21. Hatzikiriakos S.G., Dealy J.M. Wall slip of molten high density polyethylenes. II. Capillary rheometer studies. *Journal of Rheology*, 1992, vol. 36, no. 4, pp. 703-741. doi: <https://doi.org/10.1122/1.550313>.
22. Brochard-Wyart F., Gay C., de Gennes P.-G. Slippage of Polymer Melts on Grafted Surfaces. *Macromolecules*, 1996, vol. 29, no. 1, pp. 377-382. doi: <https://doi.org/10.1021/ma950753j>.
23. Hatzikiriakos S. G. Appropriate Boundary Conditions in the Flow of Molten Polymers. *International Polymer Processing*, 2010, vol. 25, no. 1, pp. 55-62. doi: <https://doi.org/10.3139/217.2304>.
24. Hatzikiriakos S.G. Wall slip of molten polymers. *Progress in Polymer Science*, 2012, vol. 37, no. 4, pp. 624-643. doi: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.09.004>.
25. Hatzikiriakos S.G. Slip mechanisms in complex fluid flows. *Soft Matter*, 2015, vol. 11, no. 40, pp. 7851-7856. doi: <https://doi.org/10.1039/C5SM01711D>.
26. Sokolov A.V., Roedolf D. Introduction to practical rheology of polymers. *Plasticheskie massy*, 2018, no. 5-6, pp 31-34. doi: <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2018-5-6-31-34>.
27. Chulieieva O., Zolotaryov V. Effect of the modifier on the thermophysical properties of fireproof ethylene-vinyl acetate copolymer composition materials. *Technology Audit and Production Reserves*, 2018, vol. 6, no. 1(44), pp. 23-28. doi: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.150294>.
28. Sadova A.N., Bortnikov V.G., Zaikin A.E. *Praktikum po tekhnologii pererabotki i ispytaniam polimerov i kompozitsionnykh materialov* [Workshop on processing technology and testing of polymers and composite materials]. 2011, Moscow, KolosS Publ., 191 p. (Rus).
29. Weil E.D., Levchik S.V. *Flame Retardants for Plastics and Textiles*. Carl Hanser Verlag Publ., 2015. doi: [https://doi.org/10.3139/9781569905791\\_fm](https://doi.org/10.3139/9781569905791_fm).

Надійшла (Received) 08.12.2021  
 Прийнята (Accepted) 15.01.2022  
 Опублікована (Published) 20.04.2022

Золотарьов Володимир Михайлович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
 Чулєєва Олена Володимирівна<sup>1</sup>, д.т.н.,  
 Чулєєв Володимир Леонідович<sup>1</sup>, к.т.н.,  
 Кулєшова Тетяна Анатоліївна<sup>1</sup>,  
 Суслін Микола Сергійович<sup>1</sup>,  
<sup>1</sup> ПАТ «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ»,  
 61099, Харків, вул. Автогенна, 7,  
 e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua;  
 echuleeva@ukr.net (Corresponding author);  
 vchuleev@ukr.net; kuleshova.tanushka@gmail.com;  
 suslin.nikolay@gmail.com

V.M. Zolotaryov<sup>1</sup>, O.V. Chulieieva<sup>1</sup>, V.L. Chulieiev<sup>1</sup>,  
 T.A. Kuleshova<sup>1</sup>, M.S. Suslin<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> PJSC «YUZHicable WORKS»,  
 7, Avtogenaya Str., Khakiv, 61099, Ukraine.

#### Influence of doping additive on thermophysical and rheological properties of halogen-free polymer composition for cable insulation and sheaths.

**Introduction.** The demand for halogen-free fire-resistant compositions for the manufacture of fire-retardant wires and cables is constantly growing. **Problem.** Therefore, the creation and further processing of these materials is an urgent problem. **Goal.** The aim of the article is to study the effect of the doping additive on the thermophysical and rheological properties of halogen-free compositions for power cables with voltage 1 kV with the determination of both the temperatures of phase and structural transformations of polymer compositions. **Methodology.** Experiments investigating the phase transformations were carried out with the help device of thermogravimetric analysis and differential scanning calorimetry TGA/DSC 1/1100 SF of METTLER TOLEDO company. Rheological studies of polymeric materials were conducted by using the method of capillary viscosimetry in the device IIRT-AM. **Results.** The influence of the doping additive on the formation of the supramolecular structure of the filled polymer compositions for cable products was determined, that resulted in the temperature increase of the decomposition beginning by 11 °C and the end of decomposition by 7 °C. **Originality.** The effect of a doping additive on reducing the effective melt viscosity of a polymer composition from 6·10<sup>4</sup> to 1·10<sup>4</sup> Pa·s with increasing shear rate has been shown for the first time. The shear rate of the polymer composition containing the doping additive increases from 0.5 to 20 s<sup>-1</sup> with increasing shear stress. **Practical value.** The research results provide an opportunity to reasonably approach the development of effective technological processes for the manufacture of the insulation and sheaths of power cables from halogen-free polymer compositions. References 29, tables 3, figures 8.

**Key words:** cable production, doping additive, rheological properties, melting temperature, decomposition onset temperature.