

*М. В. ГРИНИШИНА***ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ СИЛОВИХ ВИСОКОВОЛЬТНИХ КАБЕЛІВ З ТЕРМОПЛАСТИЧНОЮ ПОЛІМЕРНОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ**

Проблема високовольтних силових кабелів пов'язана зі складними технологічними процесами при їх виготовленні. Одним із головних процесів при виготовленні кабелів є екструзія. Існує величезна кількість параметрів (відомих як параметри процесу) на стадії процесу екструзії, які безпосередньо впливають на експлуатаційні характеристики ізоляції та кабелю в цілому. Показано, що для процесу екструзії важливими параметрами процесу є температура розплаву, швидкість, тиск, швидкість шнека, тип використовуваної матриці та середовище, яке охолоджує, в екструдері. Температура та тиск розплаву є одними з найбільших важливих параметрів в процесі екструзії, які визначають продуктивність процесу. Проаналізовано вплив температури, тиску та коливання цих параметрів на комплекс механічних та електричних характеристик кабелю. Обґрунтовано, що реологічні властивості полімерів схильні до коливань, що викликає проблеми у виробництві кабелів. Складність і велика кількість параметрів процесу, задіяних у виробництві кабелів, ускладнюють процес контролю, що обумовлює появу дефектів у вигляді тріщин, повітряних порожнин і пористості у високовольтній ізоляції. Аргументовано, що застосування силових кабелів з ізоляцією на основі шитого поліетилену, який є термореактивним ізоляційним матеріалом, обумовлює складність перероблення як на стадії виготовлення, так і в експлуатації. Розвиток технології впровадження термопластичної ізоляції забезпечує вторинну переробку для реалізації проєктів силових високовольтних кабелів змінного та постійного струму. Представлено порівняльний аналіз електричних, механічних та теплових параметрів шитого поліетилену та термопластичних полімерів в якості альтернативи термореактивної ізоляції. В статті наводяться особливості технологічного режиму екструзії полімерної ізоляції на основі термоеластопластів, зокрема, композицій поліпропілену, що обумовлено меншими значеннями коефіцієнту теплопровідності таких композицій в порівнянні з поліетиленом. Представлено моделі для опису процесу екструзії термопластичної ізоляції силових кабелів з урахуванням потоку розплавленого полімерного матеріалу як неньютонівської, нестисливої, ізотермічної рідини. Обґрунтовано необхідність визначення значень коефіцієнтів теплопровідності та теплоємності композицій на основі поліпропілену в широкому діапазоні температури для зменшення вірогідності технологічних дефектів у високовольтній термопластичній ізоляції.

Ключові слова: полімерна ізоляція, екструзія, параметри технологічного процесу, поліпропілен, ефективна в'язкість, коефіцієнт теплопровідності, кросс-логіарифмічна модель.

*М. В. ГРИНИШИНА***ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СИЛОВЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КАБЕЛЕЙ С ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКОЙ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ**

Проблема високовольтних силових кабелів пов'язана з складними технологічними процесами при їх виготовленні. Одним з головних процесів при виготовленні кабелів є екструзія. Існує величезна кількість параметрів (відомих як параметри процесу) на стадії процесу екструзії, які безпосередньо впливають на експлуатаційні характеристики ізоляції та кабелю в цілому. Показано, що для процесу екструзії важливими параметрами процесу є температура розплаву, швидкість, тиск, швидкість шнека, тип використовуваної матриці та охолоджуюча середовище в екструдері. Температура та тиск розплаву є одними з найбільш важливих параметрів в процесі екструзії, які визначають продуктивність процесу. Проаналізовано вплив температури, тиску та коливання цих параметрів на комплекс механічних та електричних характеристик кабелю. Обґрунтовано, що реологічні властивості полімерів схильні до коливань, що викликає проблеми у виробництві кабелів. Складність і велика кількість параметрів процесу, задіяних у виробництві кабелів, ускладнюють процес контролю, що обумовлює появу дефектів у вигляді тріщин, повітряних порожностей і пористості в високовольтній ізоляції. Аргументовано, що застосування силових кабелів з ізоляцією на основі шитого поліетилену, який є термореактивним ізоляційним матеріалом, обумовлює складність перероблення як на стадії виготовлення, так і в експлуатації. Розвиток технології впровадження термопластичної ізоляції забезпечує вторинну переробку для реалізації проєктів силових високовольтних кабелів змінного та постійного струму. Представлено порівняльний аналіз електричних, механічних та теплових параметрів шитого поліетилену та термопластичних полімерів в якості альтернативи термореактивної ізоляції. В статті наводяться особливості технологічного режиму екструзії полімерної ізоляції на основі термоеластопластів, зокрема, композицій поліпропілену, що обумовлено меншими значеннями коефіцієнта теплопровідності таких композицій по порівнянню з поліетиленом. Представлено моделі для опису процесу екструзії термопластичної ізоляції силових кабелів з урахуванням потоку розплавленого полімерного матеріалу як неньютонівської, нестисливої, ізотермічної рідини. Обґрунтовано необхідність визначення значень коефіцієнтів теплопровідності та теплоємності композицій на основі поліпропілену в широкому діапазоні температури для зменшення вірогідності технологічних дефектів в термоізоляційній ізоляції.

Ключевые слова: полимерная изоляция, экструзия, параметры технологического процесса, полипропилен, эффективная вязкость, коэффициент теплопроводности, кросс-логарифмическая модель.

*М. В. ГРИНИШИНА***FEATURES OF TECHNOLOGY OF MANUFACTURE OF POWER HIGH VOLTAGE CABLES WITH THERMOPLASTIC POLYMERIC INSULATION**

The problem of high-voltage power cables is associated with complex technological processes in their manufacture. One of the main processes in the manufacture of cables is extrusion. There is a huge number of parameters (known as process parameters) at the stage of extrusion process that directly affect the performance of isolation and cable as a whole. It is shown that the important parameters of the process of extrusion are the melt temperature, speed, pressure, screw speed, the type of matrix used and the cooling medium in the extruder. The temperature and pressure of the melt are among the largest important parameters in the process of extrusion that determine the productivity of the process. The influence of temperature, pressure and fluctuations of these parameters on a complex of mechanical and electrical characteristics of the cable are analyzed. It is substantiated that the rheological

© М. В. Гринышина, 2021

properties of polymers are prone to oscillations, which causes problems in the production of cables. The complexity and large number of process parameters involved in the production of cables are complicated by the process of control, which determines the appearance of defects in the form of cracks, air cavities and porosity in high-voltage isolation. It is argued that the use of power cables with a cross-linked polyethylene, which is a thermosetting insulating material, causes the complexity of processing both in the manufacturing stage and in operation. Development of technology for the introduction of thermoplastic isolation provides secondary processing to implement projects of power-high-voltage variable and direct current cables. A comparative analysis of electrical, mechanical and thermal parameters of cross-linked polyethylene and thermoplastic polymers as an alternative of thermosetting isolation is presented. The article presents the features of the technological regime of extrusion of polymer isolation based on thermoelastoplasts, in particular, polypropylene compositions, which are due to the lower values of the coefficient of thermal conductivity of such compositions in comparison with polyethylene. Models are presented to describe the process of extrusion of thermoplastic isolation of power cables, taking into account the flow of molten polymeric material as a non-Newtonian, uncompressive, isothermal fluid. The necessity of determining the values of the coefficients of thermal conductivity and heat capacity of polypropylene compositions in a wide temperature range to reduce the likelihood of technological defects in high-voltage thermoplastic isolation is substantiated.

Keywords: polymer insulation, extrusion, process parameters, polypropylene, effective viscosity, thermal conductivity, cross-logarithmic model.

Постановка проблеми. Електроізоляційні матеріали, як-от зшитий поліетилен (сілано- або пероксидозшитий), вже кілька десятиліть домінують на ринку ізоляційних матеріалів для силових кабелів в наземних мережах змінного та постійного струму високої напруги. Зшитий поліетилен залишається кращим матеріалом для виготовлення екструдованих високовольтних кабелів з високими термомеханічними і електричними властивостями. Однак його нелегко переробляти, що висуває екологічні проблеми при експлуатації силових кабелів зі зшитою поліетиленовою ізоляцією [1–3].

Альтернативою зшитій поліетиленовій ізоляції силових кабелів є застосування кабельних композицій на основі термопластичних високопродуктивних термопластичних полімерів, в тому числі на основі поліпропілену [1–3]. Кабелі з термопластичною ізоляцією мають додаткові переваги. По-перше, тривалість технологічного процесу суттєво скорочується завдяки відсутності стадій вулканізації ізоляції та дегазації кабелю. По-друге, застосування високої чистоти ізоляційних матеріалів забезпечує застосування більш тонких фільтрів для розплаву полімеру на технологічній стадії екструзії, що зменшує вірогідність утворення дефектів в товщі полімерної ізоляції на етапі передчасного розкладання хімічних сполук-ініціаторів зшивання (рис. 1) [4].

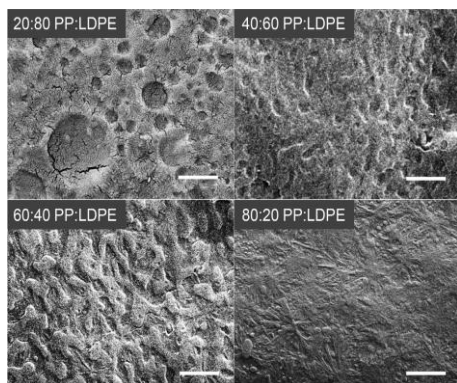


Рисунок 1 – Мікрофотографії криофрактурованих та витравлених зразків термопластичної ізоляції в залежності від масової долі поліпропілену (PP) та поліетилену низької щільності (LDPE) (масштаб: смуга відповідає 2 мкм) [4]

Аналіз публікацій. Величезна кількість параметрів процесу на стадії екструзії безпосередньо впливає на експлуатаційні характеристики ізоляції та

кабелю в цілому. Так, гідродинамічні та хімічні явища пов'язані, принаймні, із залежністю транспортних реологічних властивостей (в'язкості, коефіцієнту дифузії, коефіцієнту теплопровідності, тощо) розплаву полімеру як функція температури, тиску, швидкості обертання шнеку, типу формуючого інструменту та середовища, що охолоджує, і складу самого матеріалу.

Як правило, потік розплаву полімеру є ламінарним, але його важко моделювати через його тривимірність і нестационарність характеру. Крім того, розплавлені полімери не є ньютонівськими і їх властивості можуть змінюватися вздовж екструдера (просторові та тимчасові змінення) внаслідок процесу змішування та/або змінню хімічної реакції. Крім того, дифузійний процес також необхідно враховувати, оскільки він може стати важливим обмежуючим кроком на молекулярному рівні в масштабах змішування. Нарешті, необхідно враховувати теплопередачу через в'язку дисипацію та хімічні реакції в розплавленому полімері.

Більшість моделей процесу екструзії мають спрощене моделювання, нехтуючи деякими параметрами.

В даний час застосування математичних підходів для прогнозування розвитку тиску та продуктивності екструдерів є недостатніми. Більшість існуючих моделей розглядають гранули полімеру як однорідну компакту масу з насипною густиною, яка вважається відомою. Застосування методу дискретних елементів (DEM) з використанням програмного забезпечення з відкритим кодом LIGGGHTS® в поєднанні з пакетом обчислювальної гідродинаміки OpenFOAM® дозволяє включити зону плавлення при моделюванні [5].

Так, процес екструзії у зоні змішування оптимізовано завдяки включенню стінки-ковзання на поверхнях циліндру та гвинта [5]. Для моделювання використовується програмне забезпечення CFD для кінцевих елементів, розроблене ANSYS [5].

При чисельному аналізі потоку полімерів у обертаних шнеках вважається, що матеріал є рідким при виході із зони живлення (подачі) [6]. З іншого боку, експериментально доведено, що на матеріал впливають такі фактори, як швидкість подачі, швидкість шнека та швидкість зсуву, що вказує на те, що плавлення є поступовим процесом. Так, проведені експерименти [6, 7] показують, що плавлення починається раніше, коли швидкість подачі

збільшується через більш швидке формування пластифікованої маси.

В роботі [7] досліджено тривимірне математичне моделювання гідродинаміки течії полімерних розплавів у зоні дозування одношнекового екструдера. Деякі результати тривимірного моделювання тепломасообміну при ламінарному потоці для поліетилену низької щільності в одношнековому екструдері на підставі моделі Карро-Ясуда представлено в [8], яка включає п'ять параметрів для опису реологічної поведінки розплаву полімеру.

Встановлено вплив геометрії шнека в діапазоні співвідношення довжина/ діаметр (L/D) від 1 до 3 на структуру потоку та перепад тиску при швидкості обертання до 60 об/хв [9].

У [10] зазначається, що в даний час важко отримати точне аналітичне рішення навіть для спрощеної математичної моделі процесу екструзії (одновимірний неньютонівський потік). Аналітичні розв'язки задачі про ізотермічну течію неньютонівської рідини в каналі для одношnekових екструдерів, які відрізняються за способом вирішення системи диференціального рівняння, наведено в [10].

Напіваналітичним розв'язанням подібної задачі присвячено декілька робіт, де реологічна поведінка полімеру описується степеневим законом, зокрема, в [11].

Залежність в'язкості полімеру від швидкості зсуву визначається диференціальними рівняннями в частинних похідних, тобто є нелінійними, що вимагає використання чисельних методів: метод скінченних об'ємів (FVM) та метод скінченних елементів (FEM) [12].

Мета статті. Аналіз моделей для опису процесу екструзії термопластичної ізоляції силових кабелів з урахуванням потоку розплавленого полімерного матеріалу як неньютонівської рідини з обґрунтуванням необхідності визначення значень коефіцієнтів теплопровідності та теплоємності композицій на основі поліпропілену в широкому діапазоні температури для зменшення вірогідності технологічних дефектів у високовольтній термопластичній ізоляції силових кабелів.

Екструзія полімерів. Характеристики довговічності кабелів забезпечуються завдяки налаштованого процесу екструзії та адаптованого до властивостей полімерних матеріалів екструдерів. Вибір гвинта та його конструкція, а також співвідношення L/D дозволяють ефективно переробляти різні полімерні матеріали для ізоляції силових кабелів з високою продуктивністю та якістю.

При цьому вибір формуючих інструментів (дорна та матриці) також впливає на якість кабелю. Часто дефекти ізоляції виникають власне внаслідок використання інструментів. З правильною системою керування та системами комп'ютерного контролю важливо встановити правильні параметри обробки залежно від використовуваної суміші полімерів.

З огляду на вимоги високої швидкості, спеціальних застосувань і високовольтних кабельних

ліній, параметри процесу повинні контролюватися з найвищим ступенем точності. Ключові фактори, що впливають на продуктивність кабелів, пов'язані, насамперед, з параметрами процесу.

Перша машина для екструзії термопластичних матеріалів була побудована приблизно в 1935 році Паулем Троестером у Німеччині. До цього часу екструдери в основному використовувалися для екструзії гуми. Шнекові екструдери поділяються на одношnekові та багатощnekові. Одношnekовий екструдер є найважливішим типом екструдера, який використовується в кабельній промисловості. Його ключовими перевагами є відносно низька вартість, проста конструкція, міцність, надійність і сприятливе співвідношення продуктивність/вартість.

Теоретично процес матеріального потоку в екструдері можна розділити на чотири частини: подача в екструдер, транспортування маси, потік через матрицю і вихід із матриці з подальшою обробкою. Під час обробки матеріалу маса трансформується в основному силами зсуву, тиском, швидкістю охолодження, формуванням та часом перебування [13]. Подача полімерного матеріалу, як правило в гранулах, на формуючий інструмент здійснюється за допомогою шнека (гвинта Архімеда) (рис.2). Умовно екструзійний канал ділиться на три частини (рис. 2): зона подачі (1, живлення), перехідна зона (2, плавлення) і зона дозування (3). У зоні подачі матеріал під впливом температури і тиску розм'якшується і набуває пластичної форми. Матеріал нагрівається в цій зоні шляхом зовнішнього нагрівання. Рівень нагрівання залежить від типу сировини, а точніше від температури плавлення полімеру. Так, для нагрівання циліндра використовують кільцеві нагрівачі. Але близько 80 % тепла, необхідного для плавлення або розплавлення маси, подається за рахунок тепла, що виділяється завдяки тертю між гвинтом і циліндром, що призводить до зсуву прошарків полімеру. Решта тепла – від зовнішніх джерел [13].

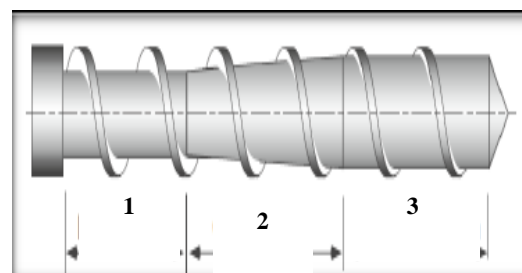


Рисунок 2 – Зони екструзійного каналу [13]

Пластифікований матеріал транспортується вперед в зону змішування – перехідну зону і, нарешті, зону дозування.

Час обробки матеріалу в екструдері, тобто час розподілу, є важливим параметром якості продукції. Шнек може мати різну довжину в залежності від матеріалу, що переробляється (рис. 2). По мірі просування по спіралі гвинта полімер прогрівається до потрібної температури і гомогенізується, з нього видаляються гази.

Основними параметрами процесу є тиск, температура, час перебування та коефіцієнт стиснення. Так, коефіцієнт стиснення (співвідношення площі в зоні дозування та зоні подачі) для зшитого поліетилену становить 3:1, а для гуми та безгалогенних матеріалів з низьким димоутворенням – 1:11. Характерним параметром для екструдера є також відношення L/D шнека. У США, стандартні розміри екструдера: 3/4, 1, 1-1/2, 2, 2-1/2, 3-1/2, 4-1/2, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20 і 24 дюйми.

У Європі стандартними розмірами екструдера є 20, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 90, 120, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 і 600 міліметрів. Більшість екструдерів представлені в розмірі від 1 до 6 дюймів або від 25 до 150 мм. У шнеку великих розмірів (80 мм, 120 мм) є спеціальний канал для циркуляції води, що служить для охолодження (термостатування). Це робиться для того, щоб уникнути перегріву розплаву через великі напруження зсуву.

Типове співвідношення L/D коливається від 20 до 30, причому 24 є найбільш поширеним.

Використовуються екструдери для вилучення легких речовин (екструдери з вентиляцією) із співвідношенням L/D до 35 або 40, а іноді навіть вище.

Типове співвідношення між L шнека та його D для зшитого поліетилену та полівілхлоридного пластикату становить 24:1, для гуми – 15:1.

Неньютонівські рідини. Моделі для визначення ефективної в'язкості розплавів полімерів. У процесі екструдювання полімерні матеріали зазнають низки змін: із твердого стану в рідкий. Переміщення шарів розплавленого (рідкого) полімеру один щодо одного зі швидкістю V відбувається під дією сил внутрішнього тертя. Сила внутрішнього тертя $F_{тр}$ пропорційна градієнту швидкості [13, 14]:

$$F_{тр} = -\eta \frac{dV}{dz} S, \quad (1)$$

$$\sigma_{\tau} = -\eta^* \cdot \dot{G}, \quad (2)$$

де $\sigma_{\tau} = \frac{F_{тр}}{S}$ – дотична напружка,

$\dot{G} = \frac{dV}{dz} = \frac{dy}{dt}$ – швидкість зсуву шарів,

η^* – коефіцієнт пропорційності, що залежить від в'язкості.

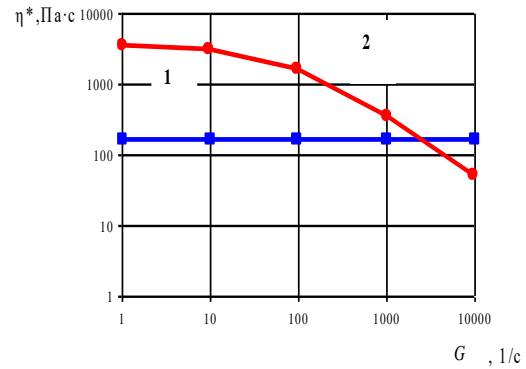
Для ньютонівських низькомолекулярних рідин σ_{τ} прямо пропорційна швидкості зсуву G , а η^* є динамічною в'язкістю та залежить лише від температури T і не залежить від умов перебігу рідини (рис. 3 а, крива1) [14]:

$$\eta = \eta_0 e^{E_a/kT}, \quad (3)$$

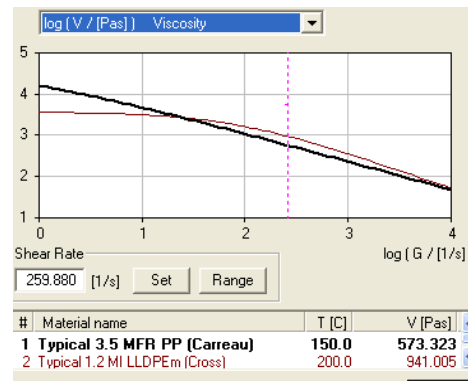
де E_a – енергія активації процесу перескоку молекул у нове положення під дією дотичних напружок у рідині, k – постійна Больцмана.

Розплави полімерів відносяться до неньютонівських високомолекулярних рідин, для яких

характерне прискорене зростання швидкості зсуву при певних напружках зсуву $\sigma_{кр}$, обумовленого руйнуванням міжмолекулярних зв'язків та орієнтацією макромолекул у напрямку течії. У цьому випадку в (2) коефіцієнт пропорційності η^* – ефективна в'язкість, яка залежить від умов течії розплаву (рис. 3 а, крива 2, рис. 3 б) та температури.



а



б

Рисунок 3 – Розрахункові залежності ефективної в'язкості неньютонівської високомолекулярної рідини для лінійного поліетилену низької щільності (PE) при температурі 200 °C від швидкості зсуву (а); поліпропілену (PP) та PE (б)

Як доводять результати експериментальної перевірки впливу швидкості обертання шнеку на неізотермічну поведінку потоку розплавів полімерів в зоні вимірювання [8] в діапазоні швидкості шнека від 25 об/хв до 200 об/хв, процес екструзії можна вважати ізотермічним для поліпропілену та поліетилену низької густини. Неізотермічна поведінка спостерігається у випадку поліетилену високої густини завдяки високій молекулярній ваги: матеріал демонструє виражене в'язке нагрівання при великих обертах шнека.

Значення η^* визначають експериментально за даними полімерної віскозиметрії [16] та на підставі розрахунків за умови визначених теплових властивостей полімерів (табл. 1) [14, 15].

При дослідженні процесів течії розплаву полімерів в екструдері найбільше розповсюдження отримали експоненційна модель (модель Карр'є), степенева та кросс-логарифмічна [13, 14].

Таблиця 1 – Теплофізичні характеристики матеріалу ізоляції

Матеріал	Щільність ρ , кг/м ³		Теплоємність C , Дж/кг·°C		Коефіцієнт тепло-провідності λ , Вт/м·°C		Температура плавлення T , °C
	Твердого	Розплаву	Твердого	Розплаву	Твердого	Розплаву	
Поліетилен низької щільності	920	750	2300	2300	0,28	0,24	110
Поліетилен високої щільності	954	770	2500	2250	0,4	0,25	133
Поліпропілен	907	735	1700	2100	0,22	0,22	163

Так, відповідно до кросс- та логарифмічно-експоненційної моделі ефективна в'язкість визначається на підставі:

$$\eta^* = \frac{Af(T)}{1 + [rf(T)\dot{G}]^{1-n}} \quad (4)$$

$$\ln(\eta^*) = a_1 + a_2 \ln(\dot{G}) + a_3 \ln^2(\dot{G}) + a_4(T - T_r) + a_4(T - T_r)^2 + a_4(T - T_r) \ln(\dot{G}), \quad (5)$$

де A , n , r , a – постійні моделі,
 T_r – температура розплаву,
 $f(T)$ – температурна функція, яка визначається із залежності

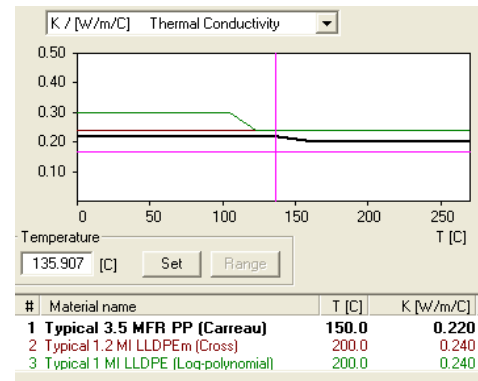
$$f(T) = e^{-b(T-T_r)}, \quad (6)$$

де b – постійна, яка визначається з рівняння Арреніуса:

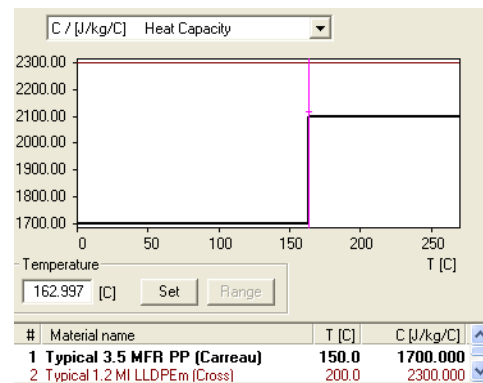
$$b = \frac{A}{(T_r + 273,15)^2}$$

На рис. 4 представлені чисельні розрахунки коефіцієнту теплопровідності (рис. 4 а) та коефіцієнту теплоємності (рис. 4 б) для поліпропілену на підставі моделі Карр'є, лінійного поліетилену низької густини на підставі кросс- та логарифмічно-експоненційної моделі в широкому діапазоні температури. При температурі 150 °C коефіцієнт теплопровідності становить 0,22 Вт/м·К. При температурі 170 °C спостерігається фазовий перехід, обумовлений плавленням поліпропілену, що призводить до

зростання коефіцієнту теплоємності з 1700 до 2100 Дж/кг·К. В той же час, напруга зсуву S для розплавів поліпропілену та лінійного поліетилену низької густини несуттєво відрізняється при змінній швидкості зсуву G шарів в діапазоні від 10 до 10⁴ 1/с (рис. 5).



а



б

Рисунок 4 – Порівняльний аналіз розрахункових значень коефіцієнтів теплопровідності (а) та теплоємності (б) кабельних композицій на основі поліпропілену та поліетилену

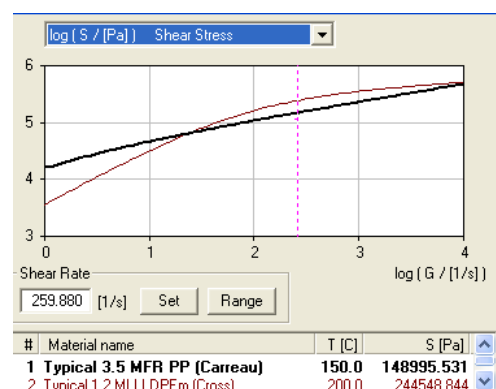


Рисунок 5 – Лістинг порівняльного аналізу розрахункових значень напруги зсуву в залежності від швидкості зсуву поліпропілену та поліетилену

Менші значення коефіцієнтів теплопровідності та теплоємності обумовлюють, по-перше, більшого часу знаходження розплаву полімеру в зоні подачі та зоні плавлення для досягнення гомогенізації, а, по-друге, більший вірогідності окиснення полімеру (рис. 6), і, по-

третє, більший тепловий опір ізоляції кабелю за однакової товщини з поліетиленовою (табл. 1, рис. 4).

Інтенсивна смуга поглинання при значенні хвильового числа 1720 1/см обумовлена валентними коливаннями карбонільної групи $>C=O$, що утворилася в результаті окиснення поліетилену в екструдері [16].

Наявність метильної групи (CH_3) в структурі поліпропілену $[-CH_2-CH(CH_3)-]_n$ забезпечує високі електричні, механічні та теплові характеристики. Ізотактичний поліпропілен (іРР), який має високу температуру плавлення 160 °С, але є занадто жорстким, і, як наслідок, нижчу електричну міцність, ніж у зшитого поліетилену. Цей факт унеможливило безпосереднє застосування ізотактичного поліпропілену в системі ізоляції високовольтних кабелів. На рис. 7 наведені результати моделювання в'язкості при подовженні поліпропілену та поліетилену, що опосередковано підтверджує більшу жорсткість поліпропілену.

Відносне пропускання

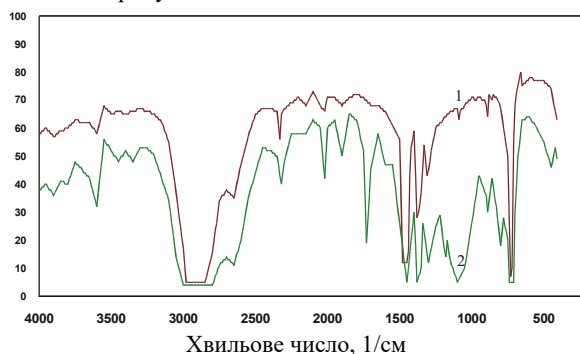


Рисунок 6 – Інфрачервоні спектри поліетилену до (крива 1) та після (крива 2) екструзії [16]

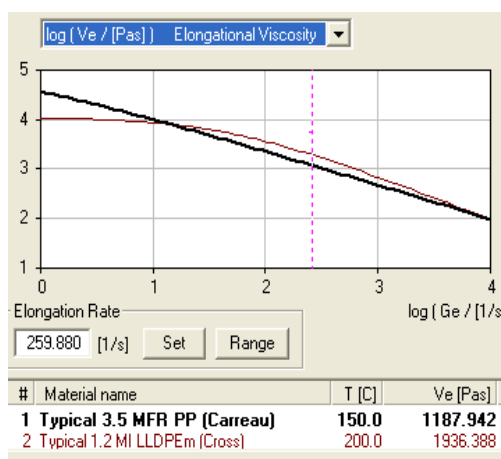


Рисунок 7 – Лістинг результатів чисельного моделювання в'язкості при подовженні кабельних композицій на основі поліпропілену та поліетилену

Змішування ізотактичного поліпропілену (іРР) з поліетиленом низької густини забезпечує компроміс між механічними та електричними характеристиками (рис. 8), що уможливило застосування таких термопластичних композицій для ізоляції високовольтних кабелів.

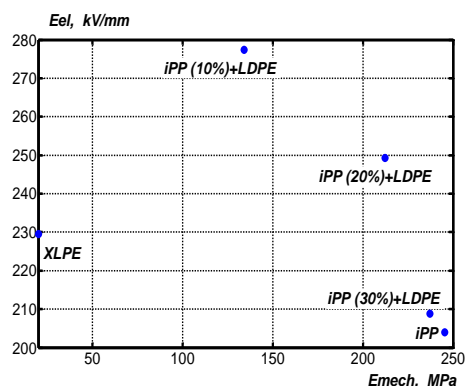


Рисунок 8 – Кореляційна залежність між модулем пружності та електричної міцності в залежності від вмісту поліетилену низької густини композицій на основі ізотактичного поліпропілену

Висновки. Виконано аналіз сучасних математичних підходів для опису процесу екструзії, який визначає експлуатаційні характеристики ізоляції та силових високовольтних кабелів.

Дослідження процесів течії в каналах екструдерів відіграють суттєву роль щодо вибору та обґрунтуванню раціонального технологічного обладнання та потребують визначення реологічних властивостей сучасних термопластичних полімерних матеріалів на основі поліпропілену.

Представлено моделі для опису процесу екструзії термопластичної ізоляції силових кабелів з урахуванням потоку розплавленого полімерного матеріалу як неньютонівської рідини.

Виконані чисельні розрахунки доводять, що коефіцієнт теплопровідності поліпропілену має менші значення в порівнянні з лінійним поліетиленом низької густини, при цьому спостерігається несуттєве його зміння в широкому діапазоні температури.

Список літератури

- Huang X., Zhang J., Jiang P., Tanaka T. Material progress toward recyclable insulation of power cables part 2: Polypropylene-based thermoplastic materials. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2020. Vol. 36, no. 1. P. 8–18. doi: 10.1109/MEI.2020.8932973.
- Du B. *Polymer Insulation Applied for HVDC Transmission*. Handbook. Singapore, Springer, 2021. 674 p.
- Mazzanti G., Marzinotto M. *Extruded Cables for High-Voltage Direct-Current Transmission*. New Jersey, Wiley, 2013. 384 p.
- Ouyang Y. et al. High-temperature creep resistant ternary blends based on polyethylene and polypropylene for thermoplastic power cable insulation. *Journal of Polymer Science*. 2021. Vol. 59, no. 11. P. 1084–1094. doi: 10.1002/pol.20210147.
- Celik O., Bonten C. Three-dimensional simulation of a single screw extruder's grooved feed section. *AIP Conference Proceedings*. 2016. Vol. 1779. P. 050004. doi: 10.1063/1.4965509.
- Lewandowski A., Wilczyński K. J., Nastaj A., Wilczyński K. A composite model for an intermeshing counter-rotating twin-screw extruder and its experimental verification. *Polymer Engineering & Science*. 2015. Vol. 55, no. 12. P. 2838–2848. doi: 10.1002/pen.24175.
- Kim N., Kim H., Lee J. Numerical analysis of internal flow and mixing performance in polymer extruder I: single screw element. *Korea-Australia Rheology Journal*. 2006. Vol. 18, no. 3. P. 143–151.
- Marschik C., Roland W., Löw-Baselli B., Miethlinger J. A heuristic method for modeling three-dimensional non-Newtonian flows of polymer melts in single-screw extruders. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2017. Vol. 248. P. 27–39. doi: 10.1016/j.jnnfm.2017.08.007.

9. Kadyirov A., Gataullin R., Karaeva J. Numerical Simulation of Polymer Solutions in a Single-Screw Extruder. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9, no. 24. P. 5423. doi: 10.3390/app9245423.
10. Bessonova M., Ponomareva M., Yakutenok V. Numerical solution of polymer melt flow problem in a single screw extruder. *Himičeskaâ fizika i mezoskopîâ*. 2019. Vol. 21, no. 2. P. 198–217. doi: 10.15350/17270529.2019.2.22.
11. Krueger H. Extruder for non-Newtonian melt analysis and performance prediction. *Plastics*. 1963. No. 53. P. 711–722.
12. Rauwendaal C. Finite element studies of flow and temperature evolution in single screw extruders. *Plastics, Rubber and Composites*. 2004. Vol. 33, no. 9–10. P. 390–396. doi: 10.1179/174328904x24880.
13. Rauwendaal C. *Polymer Extrusion*. Munich, Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2014. 925 p.
14. Беспрозванных А. В., Морозов И. А. Эффективная вязкость полимерных материалов оптического модуля. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»: зб. наук. пр. Темат. вип.: Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2005. № 42. С. 55–58.
15. Rao N. S., Schott N. R. *Understanding plastics engineering calculations*. Munich, Hanser, 2012. 196 p.
16. Набока Б. Г., Беспрозванных А. В., Гладченко В. Я. *Физические основы измерений вязкости жидких диэлектриков и показателей текучести расплавов полимеров. Учебно-методическое пособие для студентов специализации «Электроизоляционная и кабельная техника»*. Харьков: «ХДПУ», 2000. 71 с.
17. Беспрозванных А. В., Васильева О. В., Гладченко В. Я., Набока Б. Г. Сравнительный анализ экструдированной высоковольтной полиэтиленовой изоляции. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»: зб. наук. пр. Темат. вип.: Енергетика: надійність та енергоефективність*. 1999. Вып. 69.
6. Lewandowski A., Wilczyński K. J., Nastaj A., Wilczyński K. A composite model for an intermeshing counter-rotating twin-screw extruder and its experimental verification. *Polymer Engineering & Science*. 2015, vol. 55, no. 12, pp. 2838–2848. doi: 10.1002/pen.24175.
7. Kim N., Kim H., Lee J. Numerical analysis of internal flow and mixing performance in polymer extruder I: single screw element. *Korea-Australia Rheology Journal*. 2006, vol. 18, no. 3, pp. 143–151.
8. Marschik C., Roland W., Löw-Baselli B., Miethlinger J. A heuristic method for modeling three-dimensional non-Newtonian flows of polymer melts in single-screw extruders. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2017, vol. 248, pp. 27–39. doi: 10.1016/j.jnnfm.2017.08.007.
9. Kadyirov A., Gataullin R., Karaeva J. Numerical Simulation of Polymer Solutions in a Single-Screw Extruder. *Applied Sciences*. 2019, vol. 9, no. 24, pp. 5423. doi: 10.3390/app9245423.
10. Bessonova M., Ponomareva M., Yakutenok V. Numerical solution of polymer melt flow problem in a single screw extruder. *Himičeskaâ fizika i mezoskopîâ*. 2019, vol. 21, no. 2, pp. 198–217. doi: 10.15350/17270529.2019.2.22.
11. Krueger H. Extruder for non-Newtonian melt analysis and performance prediction. *Plastics*. 1963, no. 53, pp. 711–722.
12. Rauwendaal C. Finite element studies of flow and temperature evolution in single screw extruders. *Plastics, Rubber and Composites*. 2004, vol. 33, no. 9–10, pp. 390–396. doi: 10.1179/174328904x24880.
13. Rauwendaal C. *Polymer Extrusion*. Munich, Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2014. 925 p.
14. Besprozvannykh A. V., Morozov I. A. Effektivnaya vyazkost' polimernykh materialov opticheskogo modulya [Effective viscosity of polymer materials optical module]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*. 2005, no. 42, pp. 55–58.
15. Rao N. S., Schott N. R. *Understanding plastics engineering calculations*. Munich, Hanser, 2012. 196 p.
16. Naboka B. G., Besprozvannykh A. V., Gladchenko V. Ya. *Fizicheskie osnovy izmereniy vyazkosti zhidkikh dielektrikov i pokazateley tekuchesti rasplavov polimerov. Uchebno-metodicheskoe posobie dlya studentov spetsializatsii «Elektroizolyatsionnaya i kabel'naya tekhnika»* [Physical basis for measurements of liquid dielectric viscosity and flow properties of polymer melts. Textbook for students of specialisation «Electrical insulation and cable engineering»]. Kharkiv, «KhDPU» Publ., 2000. 71 p.
17. Besprozvannykh A. V., Vasil'eva O. V., Gladchenko V. Ya., Naboka B. G. Sravnitel'nyy analiz ekstrudirovannoy vysokovol'tnoy polietilenovoy izolyatsii [Comparative analysis of extruded high voltage polyethylene insulation]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*. 1999, no. 69.

References (transliterated)

1. Huang X., Zhang J., Jiang P., Tanaka T. Material progress toward recyclable insulation of power cables part 2: Polypropylene-based thermoplastic materials. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2020, vol. 36, no. 1, pp. 8–18. doi: 10.1109/MEI.2020.8932973.
2. Du B. *Polymer Insulation Applied for HVDC Transmission Handbook*. Singapore, Springer, 2021. 674 p.
3. Mazzanti G., Marzintotto M. *Extruded Cables for High-Voltage Direct-Current Transmission*. New Jersey, Wiley, 2013. 384 p.
4. Ouyang Y. et al. High-temperature creep resistant ternary blends based on polyethylene and polypropylene for thermoplastic power cable insulation. *Journal of Polymer Science*. 2021, vol. 59, no. 11, pp. 1084–1094. doi: 10.1002/pol.20210147.
5. Celik O., Bonten C. Three-dimensional simulation of a single screw extruder's grooved feed section. *AIP Conference Proceedings*. 2016, vol. 1779, pp. 050004. doi: 10.1063/1.4965509.

Надійшла (received) 17.12.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гринишина Маргарита Володимирівна (Гринишина Маргарита Владимировна, Margaryta Volodymyrivna Grynyshyna) – технічний директор ТОВ «Інтеркабель Київ», аспірантка кафедри електроізоляційної та кабельної техніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: m.grynyshyna@interkabel.ua.