

В. Л. Демченко¹, к.ф.-м.н.,
М. В. Юрженко¹, к.ф.-м.н.,
В. І. Унрод², д.т.н., доцент

¹Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України
вул. Казимира Малевича, 11, м. Київ, 03680, Україна
dvaleriyl@ukr.net

²Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРНОЇ ОРГАНІЗАЦІЇ, ТЕПЛОФІЗИЧНІ ТА ТЕРМОМЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ РІЗНОТИПНИХ ПОЛІЕТИЛЕНІВ ПЕ-80 ТА ПЕ-100

Методами широко- та малокутової рентгенографії, диференціальної сканувальної калориметрії і термомеханічного аналізу досліджено комплекс структурних і теплофізичних характеристик двох типів технічних поліетиленів (ПЕ-80 та ПЕ-100) та їх зварного з'єднання ПЕ-80/ПЕ-100, отриманого традиційним методом зварювання пластмас нагрітим інструментом встик. Встановлено, що в процесі зварювання двох різнотипних поліетиленів формується зварне з'єднання з текстуризованою кристалічною структурою та областями гетерогенності більшого розміру порівняно з індивідуальними полімерами. Показано, що міцність і термічна стабільність зварного з'єднання вищі порівняно з відповідними характеристиками індивідуальних полімерів, що пояснюється більшою структурною впорядкованістю поліетиленів у зварному з'єднанні.

Ключові слова: поліетилен, зварне з'єднання, структура, термомеханічні властивості, теплофізичні властивості, експлуатаційні характеристики.

Вступ. Серед полімерів, з яких виготовляють труби, до найбільш розповсюджених матеріалів належить поліетилен [1], який за співвідношенням ціни, механічних властивостей та здатності до зварювання має переваги перед багатьма іншими полімерами.

Для будівництва трубопроводів використовують труби з різних марок технічного поліетилену високої густини, так званого трубного поліетилену [2]. Для перших технологічних поліетиленових трубопроводів в Україні використовували сировину, що мала назву «поліетилен низького тиску» і згодом була позначена як ПЕ-63. З часом були розроблені та знайшли широке застосування досконаліші типи поліетилену – ПЕ-80 і ПЕ-100 [3, 4]. Нині в Україні виготовляють і застосовують у будівництві поліетиленові труби з усіх цих типів полімерів [5].

Основним методом з'єднання поліетиленових труб при будівництві технологічних трубопроводів є зварювання. Нині з технологічного погляду достатньо добре розроблені та використовуються на практиці три способи зварювання ПЕ-труб: нагрітим інструментом встик, нагрітим інструментом врозтруб і тер-

морезисторним зварюванням [6, 7]. Два останні способи потребують спеціальних з'єднувальних деталей – розтрубних і терморезисторних муфт. Зварювання встик є найбільш простим та універсальним способом з'єднання і може застосовуватися для більшості типорозмірів труб, за винятком тонкостінних.

У процесі формування зварного з'єднання відбувається ціла низка фізико-хімічних перетворень полімерів: змінюється плинність розплаву, відбувається орієнтаційна кристалізація, перекристалізація, рекристалізація і навіть часткова деструкція, внаслідок чого формується структура зварного з'єднання. Якщо враховувати складність цих процесів, зрозуміло, що отримати з'єднання з морфологією, цілком ідентичною вихідному матеріалу, практично неможливо. Тому фізико-механічні характеристики зварних з'єднань завжди відмінні від аналогічних характеристик вихідного полімерного матеріалу [8].

Метою роботи є здійснення комплексного дослідження структури та властивостей зварних з'єднань технічних поліетиленів різних марок методами широко- та малокутової

рентгенографії, диференціальної сканувальної калориметрії та термомеханічного аналізу.

Експериментальна частина. Для виконання зварювальних робіт і дослідження структури, теплофізичних та експлуатаційних властивостей зварних з'єднань використовували поліетиленові труби, виготовлені з двох марок технічного поліетилену високої густини (ПЕВГ) з різною мінімальною довгочасною міцністю за 50 років при 20°C (МДМ), а саме ПЕ-80 ($M_{\text{біомодальна}} = 300000$ г/моль, густина – 0,953 г/см³, МДМ – 8 МПа) і ПЕ-100 ($M_{\text{біомодальна}} = 300000$ г/моль, густина – 0,960 г/см³, МДМ – 10 МПа), згідно з ДСТУ Б В.2.7-73.

Експериментальне зварювання труб із зовнішнім діаметром 63 мм і товщиною стінки 6 мм здійснювали традиційним способом «встик» за допомогою нагрітого до температури 200°C інструменту за тиску осадження 0,2 МПа протягом 60 с. Технологічна пауза – 3 с. Час охолодження під тиском становив 6 хв. Використовували промислову установку для зварювання нагрітим інструментом встик САТ-1 виробництва дослідного заводу зварювального обладнання Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України. Після зварювання зварне з'єднання охолоджувалося неконтрольовано до температури навколишнього середовища. На рис. 1 наведено фотографію зварного з'єднання труб, виготовлених із ПЕ-80 та ПЕ-100.

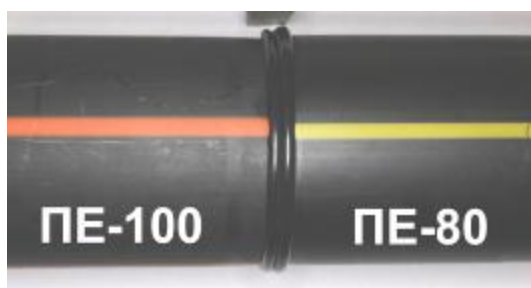


Рис. 1. Зварне з'єднання поліетиленових труб із різнотипних поліетиленів ПЕ-100 та ПЕ-80

Особливості структурної організації поліетиленів марок ПЕ-80 та ПЕ-100 і зварного з'єднання на їх основі ПЕ-80/ПЕ-100 вивчали методом ширококутового розсіювання рентгенівських променів (ШКРРП) на дифрактометрі ДРОН-4-07, рентгенооптична схема якого виконана «на проходження» первинного

пучка випромінювання крізь досліджуваний зразок.

Гетерогенну структуру (на нанорозмірному рівні) зазначених полімерних систем досліджували методом малокутового розсіювання рентгенівських променів (МКРРП) за допомогою камери КРМ-1, оснащеної щільним коліматором первинного пучка випромінювання, виконаним за методом Краткі. Геометричні параметри камери задовольняють умову нескінченної висоти первинного пучка [9]. Профілі інтенсивності нормували на величину об'єму розсіювання рентгенівських променів і фактор послаблення первинного пучка досліджуваним зразком.

Всі рентгеноструктурні дослідження проводили в CuK_α -випромінюванні, монохроматизованому Ni-фільтром, при $T = 20 \pm 2$ °C.

Зразки зі зварного з'єднання завтовшки 1 мм для дослідження структури вирізали, як показано на рис. 2.

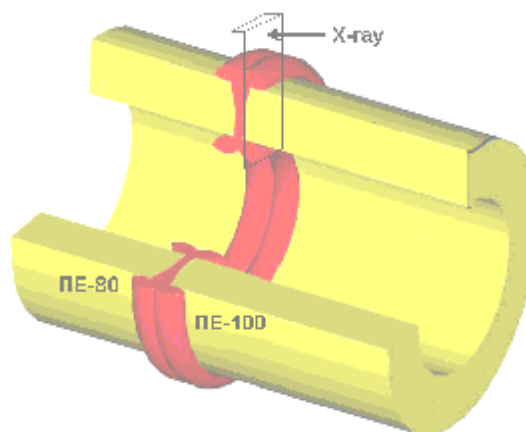


Рис. 2. Модель зварного з'єднання поліетиленових труб із різнотипних поліетиленів ПЕ-100 та ПЕ-80

Теплофізичні характеристики поліетиленів обох марок та їх зварного з'єднання досліджували з використанням диференціальної сканувальної калориметрії (ДСК) на приладі DSC Q2000 виробництва компанії TA Instruments (США), сертифікованому згідно з міжнародним стандартом ISO 9001:2000, в інертній атмосфері (азот газоподібний підвищеної чистоти ГОСТ 9293-74 за сертифікатом якості № 23 від 09.04.2012) в температурному діапазоні від 40 до 200°C з лінійною швидкістю нагрівання 20°C/хв. Використовували зразки вагою 6–10 мг. Для обчислення теплофізичних характеристик матеріалу блістерів зразки

зважували на електронних вагах ANG50C з точністю до 0,0001 г. Точність вимірювання температури становила $\pm 0,01^\circ\text{C}$, теплового потоку – $\pm 0,01$ Дж/г.

Термомеханічну поведінку і деформаційні характеристики поліетиленів обох марок та їх зварного з'єднання визначали за допомогою приладу TMA Q400 EM виробництва компанії TA Instruments (США), сертифікованого згідно з міжнародним стандартом ISO 9001:2000, в атмосфері сухого повітря в режимі температурної модуляції 5°C зі швидкістю нагрівання $10^\circ\text{C}/\text{хв}$ у температурному діапазоні від 30 до 250°C . Вимірювання проводили у режимі термічного розширення. Використовували індентор циліндричної форми з плавленого кварцу діаметром $2,8 \pm 0,01$ мм. Встановлене навантаження індентора на зразок (10^{-1} МПа) було сталим і підтримувалося автоматично. Точність вимірювання температури становила $\pm 0,01^\circ\text{C}$, деформації – $\pm 0,01$ мкм.

Експлуатаційні характеристики поліетиленів обох марок та їх зварного з'єднання вивчали шляхом механічних випробовувань у режимі одновісного розтягування згідно з вимогами ДБН В.2.5-41 зі швидкістю 50 мм/хв за нормальних умов на розривній машині FP-10 (Німеччина).

Результати досліджень та їх обговорення. Аналіз ширококутових рентгенівських дифрактограм зразків поліетиленів марок ПЕ-80, ПЕ-100 та зварного з'єднання ПЕ-80/ПЕ-100 показав, що всі вони мають аморфно-кристалічну структуру, на що вказує присутність дифракційних максимумів при $2\theta_{\text{max}} = 21,2, 23,6, 29,7$ і $36,7^\circ$ на фоні уявного аморфного гало з вершиною при $2\theta_{\text{max}} \approx 21,0^\circ$ (рис. 3).

Оцінювання відносного рівня кристалічності ($X_{\text{кр}}$) досліджуваних полімерних систем, виконане за методом Метьюза [10]:

$$X_{\text{кр}} = Q_{\text{кр}} \cdot (Q_{\text{кр}} + Q_{\text{ам}})^{-1} \cdot 100,$$

де $Q_{\text{кр}}$ – площа дифракційних максимумів, які характеризують кристалічну структуру полімеру; $Q_{\text{кр}} + Q_{\text{ам}}$ – площа всієї дифрактограми в інтервалі кутів розсіювання ($2\theta_1 \div 2\theta_2$), в якому проявляється аморфно-кристалічна структура полімеру, показало, що для поліетиленів ПЕ-80 та ПЕ-100 він майже однаковий і становить 56 і 57% відповідно.

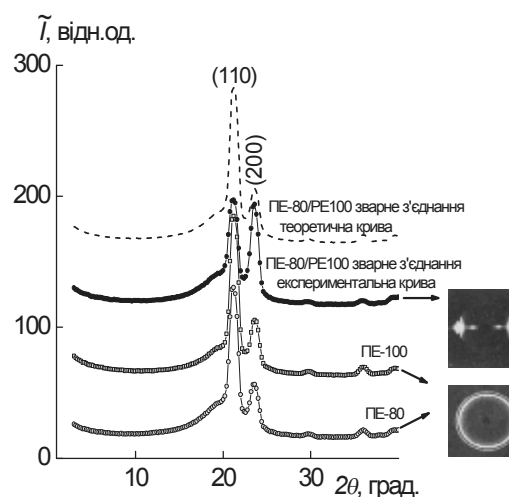


Рис. 3. Ширококутові рентгенівські дифрактограми зразків ПЕ-80, ПЕ-100 та їх зварного з'єднання ПЕ-80/ПЕ-100

Аналіз дифракційних кривих індивідуальних поліетиленів ПЕ-80 і ПЕ-100 та їх зварного з'єднання (ПЕ-80/ПЕ-100) показав, що при зварюванні різнотипних полімерів утворюється зварне з'єднання зі структурою, відмінною від структури індивідуальних поліетиленів. На нашу думку, при зварюванні відбувається плавлення кристалічної фази з її подальшою рекристалізацією та одночасною орієнтацією кристалітів у зварному з'єднанні під дією силового поля, яке прикладається в процесі зварювання. Про це свідчить збільшення інтенсивності дифракційного максимуму в площині (200), кутового положення $2\theta_m$ якого на дифрактограмах становить $23,6^\circ$, і зменшення інтенсивності дифракційного максимуму в площині (110), кутового положення $2\theta_m$ якого на дифрактограмах становить $21,2^\circ$.

Оцінювання ефективного розміру кристалітів (L) полімерних матеріалів, проведене за методом Шеррера [11]:

$$L = K\lambda(\beta \cos \theta_{\text{макс}})^{-1},$$

де K – стала, пов'язана з формою кристалітів (при невідомій їх формі $K = 0,9$), а β – кутова напівширина (ширина на половині висоти) дифракційного максимуму, показало, що середні значення $L \approx 7,2$ нм для ПЕ-80 і ПЕ-100 та $7,6$ нм для зварного з'єднання ПЕ-80/ПЕ-100 (для обчислень використовували дифракційні максимуми при $2\theta_{\text{max}} = 21,2$ і $23,6^\circ$).

Обчислені значення розмірів кристалітів за окремими дифракційними максимумами для кожного зразка наведено в табл. 1. Видно, що для зварного з'єднання характерне зростання розмірів кристалітів. Для виявлення відмінностей експериментальної рентгенівської дифрактограми зразка зварного з'єднання ПЕ-80/ПЕ-100 від дифрактограми механічної суміші зразків ПЕ-80 і ПЕ-100 (при відсутності між ними взаємодії) обчислення виконували в припущенні адитивних внесків компонентів – обох марок поліетиленів – у дифракційну картину:

$$I_{ad} = w_1 I_1 + w_2 I_2,$$

де I_1, I_2 – інтенсивність ширококутового розсіювання рентгенівських променів зразків ПЕ-80 і ПЕ-100; w_1, w_2 – масові частки компонентів у системі ($w_1 + w_2 = 1$). З порівняння експериментальної та розрахункової рентгенівських дифрактограм видно, що спостерігається прояв неадитивної зміни експериментальної дифракційної кривої порівняно з теоретичною. Це свідчить про існування у зварному з'єднанні ПЕ-80/ПЕ-100 взаємодії між макромолекулами поліетиленів обох марок. Фоторентгенограми цих поліетиленів були отримані в роботі [12] (рис. 3).

Таблиця 1

Структурні та експлуатаційні характеристики індивідуальних поліетиленів ПЕ-80 і ПЕ-100 та їх зварного з'єднання ПЕ-80/ПЕ-100

Зразок	Ступінь кристалічності (ДСК), %	Ступінь кристалічності (ШКРРП), %	Розмір кристалітів L , нм ($2\theta_{max}=21,2^\circ$)	Розмір кристалітів L , нм ($2\theta_{max}=23,6^\circ$)	Міцність при розриві, МПа	Міцність при розриві, %
ПЕ-80	42	56	7,2	7,2	19,6	100
ПЕ-100	51	57	7,2	7,2	23,1	100
Зварне з'єднання ПЕ-80/ПЕ-100	53	–	7,2	8,0	Розрив по основному матеріалу	>100

* – розмір кристалітів зварного з'єднання, структуру якого досліджували у напрямку, вказаному на модельному об'єкті (рис. 2), за даними ШКРРП

При проведенні аналізу профілів малокутового розсіювання рентгенівських променів зразків поліетиленів марок ПЕ-80, ПЕ-100 та їх зварного з'єднання ПЕ-80/ПЕ-100, представлених у вигляді графіків як залежності I від q (рис. 4), так і $s^3 \tilde{I}$ від s^3 , згідно з роботами [13, 14], де \tilde{I} – інтенсивність розсіювання без внесення колімаційної поправки, а $q=(4\pi/\lambda)\sin\theta=2\pi s$, встановлено, що всі зразки характеризуються гетерогенною структурою, тобто існуванням в їхньому об'ємі контрасту електронної густини $\Delta\rho$ ($\Delta\rho=\rho-\langle\rho\rangle$, де $\rho, \langle\rho\rangle$ – локальне і середнє значення електронної густини).

Це означає, що в об'ємі матеріалів присутні щонайменше два типи областей гетерогенності з різною величиною локальної електронної густини ρ . Водночас прояв інтерференційного максимуму у вигляді «плеча», який характеризує періодичність розміщення в просторі (в об'ємі полімеру) однотипних за густиною областей гетерогенності (кристалітів і аморфних областей), спостерігається на

всіх профілях інтенсивності досліджуваних полімерних систем (рис. 4).

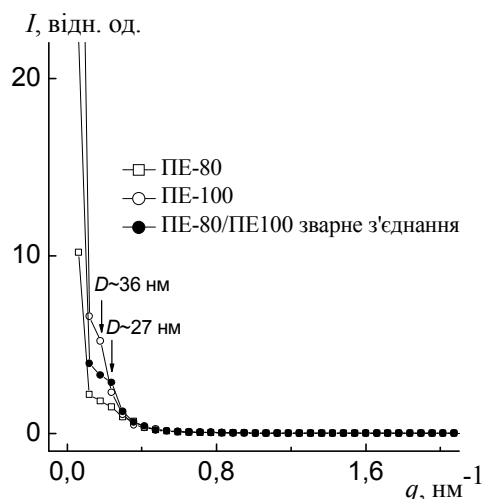


Рис. 4. Профілі інтенсивності малокутового розсіювання зразків ПЕ-80, ПЕ-100 та їх зварного з'єднання ПЕ-80/ПЕ-100

Середня величина періоду D чергування в просторі (в об'ємі полімеру) однотипних за величиною густини областей гетерогенності (відстань між найближчими центрами однотипних областей гетерогенності) згідно з рівнянням Брегга з урахуванням «закона» синуса для малих кутів ($2\sin\theta = \sin 2\theta = 2\theta$) [10]:

$$D = \lambda / 2\theta_m,$$

для систем ПЕ-80 та ПЕ-80/ПЕ-100 становить ~ 27 нм, а для ПЕ-100 $D \sim 36$ нм.

Оцінювання ефективного розміру існуючих областей гетерогенності в об'ємі зразків окремих поліетиленів ПЕ-80, ПЕ-100 та їх зварного з'єднання виконували шляхом визначення такого структурного параметра, як діапазон гетерогенності l_p [13, 14]. Цей параметр безпосередньо пов'язаний із середнім діаметром областей гетерогенності в двофазовій системі ($\langle l_1 \rangle$ і $\langle l_2 \rangle$):

$$l_p = \varphi_2 \langle l_1 \rangle + \varphi_1 \langle l_2 \rangle,$$

де φ_1, φ_2 – об'ємні частки областей ($\varphi_1 + \varphi_2 = 1$). Виявлено, що величина l_p для досліджуваних полімерних систем має найбільше значення для зварного з'єднання ПЕ-80/ПЕ-100 порівняно з індивідуальними поліетиленами (табл. 2).

Таблиця 2

Деякі структурні параметри досліджуваних полімерних систем

Зразок	l_p , нм	Q' , відн. од.
ПЕ-80	16	5,6
ПЕ-100	18	7,3
ПЕ-80/ПЕ-100	20	6,6

Для напівкількісного оцінювання відносного рівня гетерогенності структури досліджуваних полімерних систем порівнювали значення їх інваріанта Порода Q' [15]:

$$Q' = \int_0^{\infty} q \tilde{I}(q) dq,$$

величина якого незалежна (інваріантна) відносно форми областей гетерогенності та безпосередньо пов'язана з середньоквадратичним значенням флуктуації електронної густини ($\langle \Delta\rho^2 \rangle$) в об'ємі двофазової системи:

$$Q' \propto \langle \Delta\rho^2 \rangle,$$

де $\langle \Delta\rho^2 \rangle = \varphi_1 \varphi_2 (\rho_1 - \rho_2)^2$, при цьому φ_1, φ_2 і ρ_1, ρ_2 – об'ємна частка і електронна густина областей гетерогенності ($\varphi_1 + \varphi_2 = 1$) у двофазовій си-

стемі. З порівняння значень інваріанта Q' для досліджуваних полімерних систем (табл. 2) видно, що відносний рівень гетерогенності структури у зварному з'єднанні займає проміжне значення між окремими полімерами ПЕ-80 та ПЕ-100.

Аналіз термомеханічних кривих досліджуваних полімерних систем (рис. 5) показав, що область кривої відносної деформації зварного з'єднання ПЕ-80/ПЕ-100 за температури, вищої температури початку плавлення $T_n \approx 115^\circ\text{C}$, лежить між відповідними областями кривих індивідуальних полімерів ПЕ-80 та ПЕ-100.

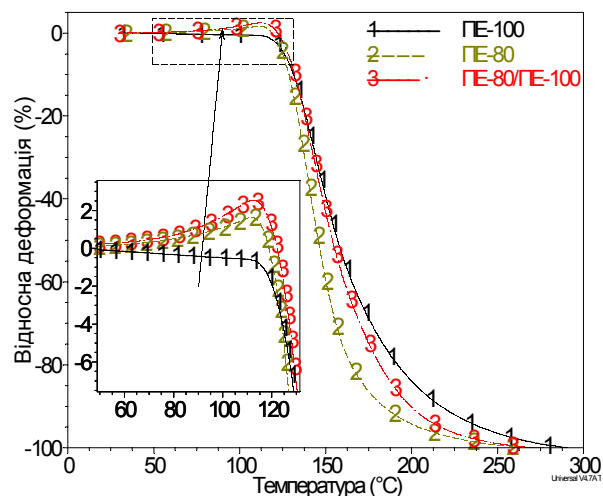


Рис. 5. Термомеханічні криві зразків ПЕ-80, ПЕ-100 та їх зварного з'єднання ПЕ-80/ПЕ-100

При цьому в інтервалі температур 25–115°C (до температури початку плавлення) зварне з'єднання ПЕ-80/ПЕ-100 має більше значення термічного розширення (вставка на рис. 5) порівняно з індивідуальними ПЕ-80 і ПЕ-100. На нашу думку, це пов'язано з тим, що в процесі нагрівання зварного з'єднання його об'єм зростає за рахунок релаксації внутрішніх напружень, які утворюються при зварюванні.

Поряд із дослідженнями термомеханічної поведінки полімерних систем було вивчено їх теплофізичні властивості. Для всіх зразків на кривих ДСК (рис. 6) зафіксовано два мінімуми, які відповідають процесам плавлення кристалічної фази в об'ємі поліетиленів, при цьому наявність двох значень температури плавлення свідчить про полікристалічність матеріалу.

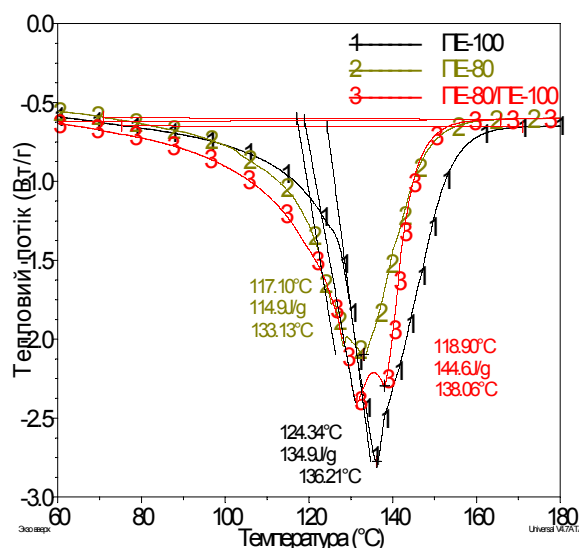


Рис. 6. Термограми зразків ПЕ-80, ПЕ-100 та їх зварного з'єднання ПЕ-80/ПЕ-100

Перший мінімум відповідає плавленню кристалітів із температурою плавлення в межах 117–125°C. Другий мінімум – плавленню більш термостійких кристалітів із температурою плавлення в інтервалі 133–138°C. Температуру плавлення обох типів кристалітів для всіх зразків наведено в табл. 3. Як видно з табл. 3, температура плавлення кристалічної фази зварного з'єднання вища порівняно з індивідуальними поліетиленами. Подібну тенденцію виявлено і для сумарних значень ентальпії плавлення, які обчислювали для кожного зразка згідно з класичними рівняннями [16]. Так, у зварного з'єднання ПЕ-80/ПЕ-100 сумарна ентальпія плавлення більша порівняно з індивідуальними поліетиленами. Величини ступеня кристалічності, розраховані з сумарних значень ентальпії плавлення для кожного зразка за класичними рівняннями [16], наведені у табл. 1. Видно, що ступінь кристалічності зварного з'єднання – найвищий.

Таблиця 3

Температура та ентальпія плавлення обох типів поліетиленів та їх зварного з'єднання

Зразок	Температура плавлення T_{n1} , °C	Температура плавлення T_{n2} , °C	Ентальпія плавлення, Дж/г
ПЕ-80	117,10	133,13	114,9
ПЕ-100	124,34	136,21	134,9
Зварний шов ПЕ-80/ПЕ-100	118,90	138,06	144,6

Висновки. В роботі проведено комплексне дослідження структурних, термомеханічних та теплофізичних характеристик двох типів поліетиленів ПЕ-80 і ПЕ-100 та їх зварного з'єднання ПЕ-80/ПЕ-100, отриманого традиційним методом зварювання пластмас нагрітим інструментом «встик». Виявлено, що в процесі зварювання двох різнотипних поліетиленів формується зварне з'єднання з текстуризованою кристалічною структурою та областями гетерогенності більшого розміру (20 нм) порівняно з індивідуальними поліетиленами ПЕ-80 (16 нм) і ПЕ-100 (18 нм). Показано, що міцність і термічна стабільність зварного з'єднання кращі порівняно з відповідними характеристиками індивідуальних полімерів, що пояснюється підвищеною структурною упорядкованістю поліетиленів у зварному з'єднанні.

Список літератури

1. Dusan J. Polyethylene. Standard article / J. Dusan // Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. – 2014. – 487 p.
2. Альперн В. Д. Что следует знать о трубном полиэтилене / В. Д. Альперн // Инженерные сети из полимерных материалов. – 2002. – № 2. – С. 5–9.
3. Полиэтилены трубных марок. Структура и свойства / Рыжов В., Калугина Е., Бисерова Н., Казаков Ю. // Полимерные трубы. – 2011. – Т. 34, № 4. – С. 56–60.
4. Горилковский М. Трубная марка полиэтилена ПЭ 100 / М. Горилковский, И. Гвоздев // Полимерные трубы. – 2008. – Т. 22, № 4. – С. 47–50.
5. Рынок импорта трубного полиэтилена в Украину в 2013 году // Полимерные трубы – Украина. – 2013. – Т. 29, № 4. – С. 18–22.

6. Vijay K. Joining methods for plastics and plastic composites: an overview / K. Vijay // *Polymer Engineering & Science*. – 1989. – Т. 29, № 19. – P. 1310–1324.
7. Комаров Г. В. Соединения деталей из полимерных материалов: учеб. пособ. / Г. В. Комаров. – С.Пб. : Профессия, 2006. – 592 с.
8. Nanostructurization and thermal properties of polyethylenes' welds / A. Galchun, N. Korab, V. Kondratenko [et. al.] // *Nanoscale Research Letters*. – 2015. – Vol. 10. – P. 138–149.
9. Kratky O. Absolute intensity measurement of small-angle x-ray scattering by means of a standard sample / O. Kratky, I. Pilz, P. J. Schmitz // *J. Colloid Interface Sci.* – 1966. – Vol. 21, No 1. – P. 24–34.
10. Штомпель В. И. Структура линейных полиуретанов / В. И. Штомпель, Ю. Ю. Керча. – К. : Наук. думка, 2008. – 248 с.
11. Гинье А. Рентгенография кристаллов. Теория и практика / А. Гинье. – М. : Физматгиз, 1961. – 604 с.
12. Рентгенографические методы исследования полимеров / Ю. С. Липатов, В. В. Шилов, Ю. П. Гомза, Н. Е. Кругляк. – К. : Наукова думка, 1982. – 296 с.
13. Ruland W. Small-angle scattering of two-phase systems: Determination and significance of systematic deviations from Porod's law / W. Ruland // *J. Appl. Cryst.* – 1971. – Vol. 4, No 1. – P. 70–73.
14. Perret R. Eine verbesserte Auswertungsmethode fur die Röntgenkleinwinkelstreuung von Hochpolymeren / R. Perret, W. Ruland // *Kolloid Z. – Z. Polymere.* – 1971. – B. 247. – S. 835–843.
15. Porod G. General theory / G. Porod // *Small-angle x-ray scattering* / Ed. by O. Glatter, O. Kratky. – London : Acad. Press, 1982. – P. 17–51.
16. Thermal analysis of polymers: fundamentals and applications / Ed. by J. D. Menczel, B. R. Prime. – New Jersey, USA: John Wiley & Sons Inc., 2009. – 698 p.
17. *iz polimernykh materialov*, (2), pp. 5–9 [in Russian].
3. Ryzhov, V., Kalugina, Ye., Biserova, N. and Kazakov, Yu. (2011) Polyethylene of pipe types. Structure and properties. *Polimernyye trubyy*, 34 (4), pp. 56–60 [in Russian].
4. Gorilovskiy, M. and Gvozdev, I. (2008). Pipe type of polyethylene PE 100. *Polimernyye trubyy*, 22 (4), pp. 47–50 [in Russian].
5. The market of pipe polyethylene import to Ukraine in 2013. (2013) *Polimernyye trubyy – Ukrayina*, 29 (4), pp. 18–22 [in Russian].
6. Vijay, K. (1989) Joining methods for plastics and plastic composites: an overview. *Polymer Engineering & Science*, 29 (19), pp. 1310–1324.
7. Komarov, G. V. (2006). Joinings of details made of polymeric materials. St. Petersburg: *Professiya*, 592 p [in Russian].
8. Galchun, A., Korab, N., Kondratenko, V. et al. (2015). Nanostructurization and thermal properties of polyethylenes' welds. *Nanoscale Research Letters*, (10), pp. 138–149.
9. Kratky, O., Pilz, I. and Schmitz, P. J. (1966) Absolute intensity measurement of small-angle x-ray scattering by means of a standard sample. *J. Coll. Interface Sci.*, 21 (1), pp. 24–34.
10. Shtompel, V. I. and Kercha, Yu. Yu. (2008). The structure of linear polyurethanes. Kiev: *Nauk. dumka*, 248 p [in Russian].
11. Gin'e, A. (1961) X-ray diffraction of crystals. Theory and practice. Moscow: *Fizmatgiz*, 604 p [in Russian].
12. Lipatov, Yu. S., Shilov, V. V., Gomza, Yu. P. and Kruglyak, N. Ye. (1982) X-ray methods of polymers investigation. Kiev: *Nauk. dumka*, 296 p. [in Russian].
13. Ruland, W. (1971). Small-angle scattering of two-phase systems: Determination and significance of systematic deviations from Porod's law. *J. Appl. Cryst.*, 4 (1), pp.70–73.
14. Perret, R., Ruland W. (1971) Eine verbesserte Auswertungsmethode fur die Rontgenkleinwinkelstreuung von Hochpolymeren. *Kolloid Z. – Z. Polymere*, B. 247, s. 835–843.
15. Porod, G. (1982) General theory. In: O. Glatter, O. Kratky (eds.) *Small-angle x-ray scattering*. London: Acad. Press, pp. 17–51.
16. Menczel, J. D., Prime, B. R. (eds.) (2009). *Thermal analysis of polymers: fundamentals and applications*. New Jersey, USA: John Wiley & Sons Inc., 698 p.

References

1. Dusan, J. (2014). Polyethylene. Standard Article. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 487 p.
2. Alpern, V. D. (2002). What should be known about pipes' polyethylene. *Inzhenernyye seti*

V. L. Demchenko¹, *Ph.D.*,

M. V. Iurzhenko¹, *Ph.D.*,

V. I. Unrod², *D.Sc., associate professor*

¹E. O. Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine

Kazimir Malevych str., 11, Kyiv, 03680, Ukraine

dvaleriyl@ukr.net

²Cherkasy State Technological University

Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

PECULIARITIES OF STRUCTURAL ORGANIZATION, PHYSICAL AND THERMAL PROPERTIES OF PE-80 AND PE-100 WELDS

Pipes made of high-density polyethylene (HDPE) of PE-80 and PE-100 types have been used for welding experiments and further investigations of welded joints' structure, thermal and performance properties. Pipes with 63 mm diameter and 6 mm wall thickness have been welded by means of butt welding at 200°C hot tool temperature and 0,2 MPa upset pressure applied for 60 sec. Change over time was 3 sec. Cooling time under pressure was 6 minutes. After that the joint has been cooled down to the room temperature without applied pressure.

Using WAXS and SAXS methods, differential scanning calorimetry and methods of thermo-mechanical analysis some structural and thermal properties of PE-80 and PE-100 polyethylene samples and of PE-80/PE-100 hot tool butt welds have been investigated. It is defined that the welded joint of two dissimilar types of polyethylene has more ordered microstructure featured with textured crystalline structure and bigger areas of heterogeneity comparing to the individual polyethylene samples. It is shown that the strength and thermal stability of the welded joint material are higher comparing to these properties of the initial materials; this can be explained with higher order of polyethylene microstructure in the welded joint.

Key words: *polyethylene, weld, structural organization, thermomechanical properties, thermo-physical properties, performance.*

Стаття надійшла до редакції 24.12.2015.

Рецензенти: В. І. Штомпель, д.х.н., професор,

В. А. Ващенко, д.т.н., професор