

PACS numbers: 06.60.Vz, 61.05.cf, 61.05.cp, 81.05.Qk, 81.07.Nb, 81.20.Vj, 81.70.Pg

Особливості наноструктурної організації, властивості та релаксаційна поведінка зварних з'єднань поліетиленів

В. Л. Демченко, М. В. Юрженко

*Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України,
вул. Казимира Малевича, 11,
03150 Київ, Україна*

В роботі проведено комплексне дослідження структури, її релаксаційної поведінки, теплофізичних і термомеханічних властивостей зварних з'єднань поліетиленів ПЕ-80/ПЕ-100, одержаних традиційною методом зварювання пластмас нагрітим інструментом у стик. Результати досліджень підтверджують, що в процесі зварювання двох різнотипних поліетиленів формується зварне з'єднання, структура якого зазнає рекристалізації кристалічної фази полімерів під час зварювання. З часом у зварному з'єднанні відбувається релаксація кристалічної структури — перехід кристалічної модифікації α -форми до змішаної $\alpha\beta$ -форми, що проявляється у їхніх властивостях.

The paper is concerned with a complex studies of structure, its relaxation behaviour, thermal and thermomechanical properties of the welded joints of the PE-80/PE-100 polyethylenes formed by conventional heated-tool butt-welding method. The results of investigations confirm that the welded joint, in which structure recrystallization of crystalline phase of polymers undergoes, is formed during the process of welding of two different polyethylene types. With time, the relaxation of the crystalline structure, namely, transition of crystalline modification from the α -form to the mixed $\alpha\beta$ -form, occurs that is manifested in their properties.

В работе проведено комплексное исследование структуры, её релаксационного поведения, теплофизических и термомеханических свойств сварных соединений полиэтиленов ПЭ-80/ПЭ-100, полученных традиционным методом сварки пластмасс нагретым инструментом встык. Результаты исследований подтверждают, что в процессе сварки двух разнотипных полиэтиленов формируется сварное соединение, структура которого подвергается рекристаллизации кристаллической фазы полимеров во время сварки. Со временем в сварном соединении происходит релаксация кристаллической структуры — переход кристаллической модификации α -формы к смешанной $\alpha\beta$ -форме, что проявляется на их

свойствах.

Ключові слова: поліетилен, ПЕ-80, ПЕ-100, зварювання нагрітим інструментом у стик, зварне з'єднання, релаксація.

Key words: polyethylene, PE-80, PE-100, heated-tool butt-welding, welded joint, relaxation.

Ключевые слова: полиэтилен, ПЭ-80, ПЭ-100, сварка нагретым инструментом встык, сварное соединение, релаксация.

(Отримано 24 вересня 2017 р.)

1. ВСТУП

Прогрес у сучасному полімерному матеріалознавстві зумовив стрімке поширення термопластичних полімерів у різних галузях промисловості: будівельній, хемічній, медичній, радіотехнічній і електронній, харчовій тощо [1–6].

Процес зварювання термопластичних полімерів полягає в активації поверхонь поєднуваних деталей. Залежно від способу зварювання ці поверхні або відразу перебувають у контакті (зварювання струмом високої частоти або надвисокими частотами), або приводяться в контакт після активації (зварювання нагрітим інструментом, газом, ІЧ-випроміненням тощо) чи одночасно з активацією (зварювання тертям, УЗ-зварювання) [7].

У процесі утворення зварних з'єднань (при охолодженні) відбувається формування надмолекулярних структур у зварному з'єднанні, а також розвиток полів власних напружень та їх релаксація [8]. Ці конкурувальні процеси визначають кінцеві властивості зварного з'єднання.

Технологічне завдання зварювання полягає в тому, щоб максимально наблизити зварне з'єднання за властивостями до вихідного — основного матеріалу.

Під час формування зварного з'єднання з термопластичних полімерів відбувається ціла низка фізико-хемічних перетворень полімерів: змінюється плинність розтопу, відбувається орієнтаційна кристалізація, перекристалізація, рекристалізація та навіть часткова деструкція, внаслідок чого формується неоднорідна структура зварного з'єднання [9].

У зв'язку з цим у даній роботі ставилося за мету здійснити комплексне дослідження релаксаційної поведінки структури та властивостей зварних з'єднань технічних поліетиленів різних марок методами широко- та малокутового розсіяння Рентгенових променів, термогравіметричної та термомеханічної аналіз.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Для виконання зварювальних робіт і дослідження структури, теплофізичних, термомеханічних та експлуатаційних властивостей зварних з'єднань використовували поліетиленові труби, виготовлені з двох марок технічного поліетилену високої густини (ПЕВГ) з різною мінімальною тривалою міцністю за 50 років при 20°C (МДМ), а саме ПЕ-80 (ММ_{бімодальна} 300000 г/моль, густина 0,953 г/см³, МДМ 8 МПа) і ПЕ-100 (ММ_{бімодальна} 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 у 63 мм та товщиною стінки у 6 мм здійснювали традиційним способом «у стик» за допомогою нагрітого до 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 у стик САТ-1 виробництва дослідного заводу зварювального обладнання Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України. На рисунку 1 наведено фотографію зварного з'єднання труб, виготовлених із ПЕ-80 та ПЕ-100.

Особливості аморфної й аморфно-кристалічної структури поліетиленів марок ПЕ-80 і ПЕ-100 та зварного з'єднання на їх основі ПЕ-80/ПЕ-100 (рис. 2) вивчали методом ширококутової рент-



Рис. 1. Зварне з'єднання поліетиленових труб із різнотипних поліетиленів ПЕ-80 та ПЕ-100.¹

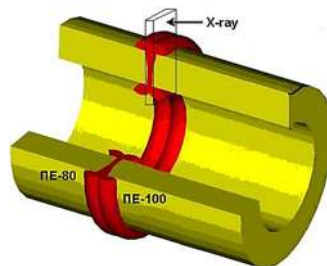


Рис. 2. Модель зварного з'єднання поліетиленових труб із різнотипних поліетиленів ПЕ-80 та ПЕ-100.²

генівської дифракції на дифрактометрі ДРОН-4-07, рентгенооптична схема якого виконана «на проходження» первинного пучка випромінення крізь досліджуваний зразок.

Гетерогенну структуру (на нанорозмірному рівні) зазначених полімерних систем досліджували методом малокутового розсіяння Рентгенових променів за допомогою камери КРМ-1, оснащеної щілинним коліматором первинного пучка випромінення, виконаним за методом Краткі. Геометричні параметри камери задовольняють умові нескінченної висоти первинного пучка [10]. Профілі інтенсивності нормували на величину об'єму розсіяння Рентгенових променів і фактор послаблення первинного пучка досліджуваним зразком.

Всі рентгеноструктурні дослідження проводили в $\text{CuK}\alpha$ -випроміненні, монохроматизованому Ni -фільтром, при $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Зразки зварного з'єднання завтовшки 1 мм для вивчення структури вирізали, як показано на рис. 2 (модельний об'єкт). Одержані таким чином матеріали досліджували у вигляді як пластин (зразок ПЕ-80/ПЕ-100), так і дрібних шматочків розміром 1×1 мм (зразок ПЕ-80/ПЕ-100 — рандомізований). Структурну організацію вихідних поліетиленів марок ПЕ-80 та ПЕ-100 вивчали в різних напрямках; при цьому були одержані ідентичні дифрактограми.

Термічну стабільність і термоокиснювальну деструкцію полімерних систем вивчали за допомогою приладу TGA Q50 виробництва компанії TA Instruments (США) в атмосфері сухого повітря в температурному діапазоні від 30 до 700°C з лінійною швидкістю нагрівання у $20^\circ\text{C}/\text{хв}$.

Термомеханічну поведінку та деформаційні характеристики полімерних систем визначали за допомогою приладу TMA Q400 ЕМ виробництва компанії TA Instruments (США) в атмосфері сухого повітря в режимі температурної модуляції 5°C зі швидкістю нагрівання у $10^\circ\text{C}/\text{хв}$ у температурному діапазоні від 30 до 250°C . Вимірювання проводили у режимі термічного розширення. Використовували індентор циліндричної форми діаметром у $2,8 \pm 0,01$ мм. Встановлене навантаження на зразок (10^{-1} МПа).

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Аналіза експериментальних дифракційних кривих окремих поліетиленів ПЕ-80 та ПЕ-100 та зварного з'єднання на їх основі (ПЕ-80/ПЕ-100) показала, що при зварюванні різнотипних поліетиленів утворюється зварне з'єднання, яке характеризується текстуризацією кристалічної фази (рис. 3). На нашу думку, при цьому відбувається топлення кристалітів і їх рекристалізація з одночасною орієнтацією. На це вказує збільшення інтенсивності диф-

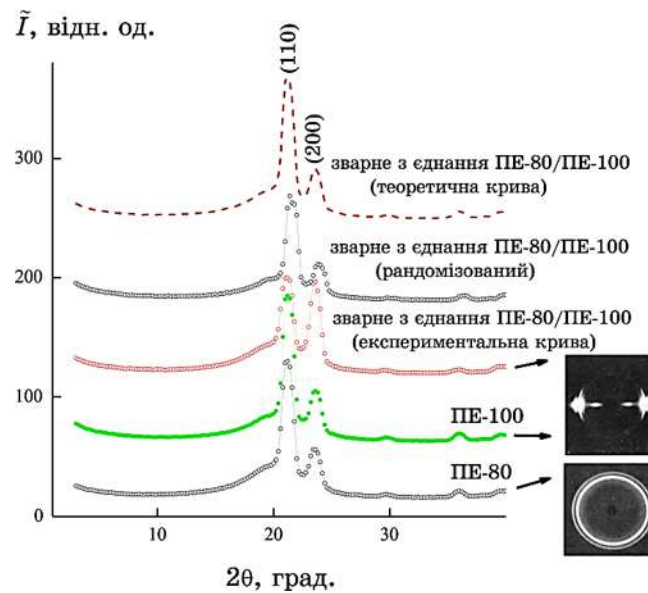


Рис. 3. Ширококутові рентгенівські дифрактограми PE-80, PE-100 та їх зварних з'єднань PE-80/PE-100 (експериментальна крива), PE-80/PE-100 (рандомізований), PE-80/PE-100 (теоретична крива).³

ракційного максимуму (200), кутове положення ($2\theta_m$) якого на дифрактограмах становить $23,6^\circ$, а також зменшення інтенсивності дифракційного максимуму (110), кутове положення якого на дифрактограмах становить $21,2^\circ$. Фоторентгенограми даних зразків наведено на рис. 3 [11].

Аналіза експериментальної ширококутової рентгенівської дифрактограми зразка зварного з'єднання PE-80/PE-100 показала, що він має аморфно-кристалічну структуру; на це вказує присутність дифракційних максимумів при $2\theta_{\max} = 21,2, 23,6, 29,7$ і $36,7^\circ$ на фоні уявного аморфного гало з вершиною при $2\theta_{\max} \approx 21,0^\circ$ (рис. 3).

Для більш детальної аналізи структурної організації зварного з'єднання (PE-80/PE-100) порівнювали його експериментальну рентгенівську дифрактограму з теоретичною (розрахунковою) дифрактограмою механічних сумішей зразків PE-80 і PE-100 (за відсутності між ними взаємодії). Обчислення виконували в припущенні адитивних внесків компонентів (обох марок поліетиленів) у дифракційну картину:

$$I_{\text{ад}} = w_1 I_1 + w_2 I_2,$$

де I_1, I_2 — інтенсивність ширококутового розсіяння Рентгенових

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 зварних з'єднань видно, що спостерігається прояв неадитивної зміни експериментальної дифракційної кривої порівняно з теоретичною (рис. 3). Цей результат є важливим, оскільки свідчить про наявність у зварному з'єднанні ПЕ-80/ПЕ-100 взаємодії між макромолекулами поліетиленів обох марок.

Аналіза ширококутових рентгенівських дифрактограм зварного з'єднання, одержаного відразу після зварювання та через один рік, показала, що з часом відбувається релаксація кристалічної структури матеріалу (рис. 4). При цьому кристалічна модифікація α -форми переходить у змішану $\alpha\beta$ -форму. На це вказує прояв на дифрактограмі останнього трьох дифракційних максимумів при $2\theta_m = 21,50^\circ, 23,17^\circ, 23,90^\circ$, які характеризують орторомбічну та моноклінну кристалічні системи поліетиленів (криві 1, 2) [12].

Оцінка відносного рівня кристалічності ($X_{кр}$) досліджуваних полімерних систем за Метьюзовою методою [13]:

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

де $Q_{кр}$ — площа дифракційних максимумів, які характеризують

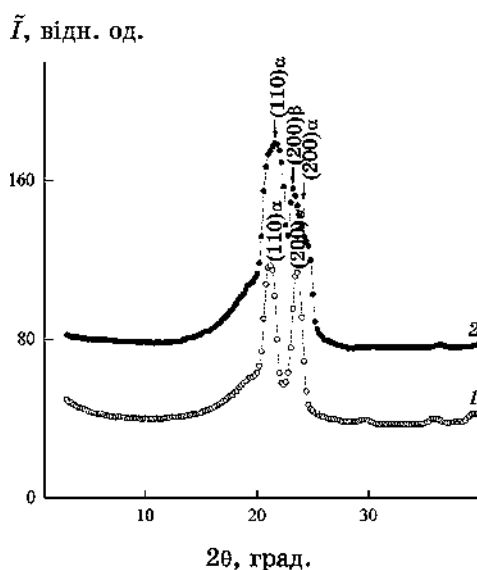


Рис. 4. Ширококутові рентгенівські дифрактограми зварних з'єднань ПЕ-80/ПЕ-100, одержаних після зварювання (1) та через 1 рік після зварювання (2).⁴

кристалічну структуру полімеру; $Q_{кр} + Q_{ам}$ — площа всієї дифрактограми в інтервалі кутів розсіяння ($2\theta_1 - 2\theta_2$), в якому проявляється аморфно-кристалічна структура полімеру, показала, що для рандомізованого зразка зварного з'єднання кристалічність протягом року практично не змінюється (табл. 1).

Оцінка ефективного розміру кристалітів (L) полімерних систем, проведена за Шерреровою методом [14]:

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

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, показала, що середнє значення $L \approx 7,2$ нм для ПЕ-80 і ПЕ-100 та 7,1 та 7,6 нм для зразків зварних з'єднань (ПЕ-80/ПЕ-100 — рандомізований) та (ПЕ-80/ПЕ-100) відповідно. Для зварних з'єднань (ПЕ-80/ПЕ-100 — рандомізований), досліджених через рік, L становить 7,1 нм (для обчислень використовували дифракційні максимуми при $2\theta_{\max} = 21,2$ і $23,6^\circ$). Встановлені значення розмірів кристалітів за окремими дифракційними максимумами для кожного зразка наведено в табл. 1.

Виявлені особливості аморфно-кристалічної структури окремих

ТАБЛИЦЯ 1. Структурні характеристики індивідуальних поліетиленів ПЕ-80 та ПЕ-100 та їх зварного з'єднання ПЕ-80/ПЕ-100.⁵

Зразок	Ступінь кристалічності (ДСК), %	Ступінь кристалічності (ШКРРП), %	Розмір кристалітів L ($2\theta_{\max} = 21,2^\circ$), нм	Розмір кристалітів L ($2\theta_{\max} = 23,6^\circ$), нм
ПЕ-80	42	56	7,2	7,2
ПЕ-100	51	57	7,2	7,2
Зварне з'єднання ПЕ-80/ПЕ-100	53	—	7,2*	8,0*
Зварне з'єднання ПЕ-80/ПЕ-100 (рандомізований)	—	56	7,1	7,1
Зварне з'єднання ПЕ-80/ПЕ-100 (через 1 рік)	—	—	—	—
Зварне з'єднання ПЕ-80/ПЕ-100 (через 1 рік, рандомізований)	—	56	7,1	7,1

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

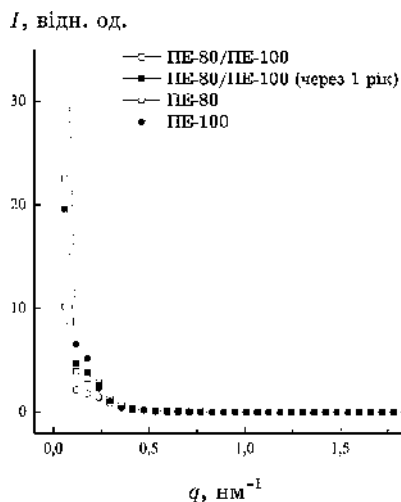


Рис. 5. Профілі інтенсивності малокутового розсіяння зразків ПЕ-80, ПЕ-100 та їх зварного з'єднання ПЕ-80/ПЕ-100, одержаного після зварювання та через 1 рік після зварювання.⁶

поліетиленів ПЕ-80 та ПЕ-100 та зварного з'єднання на їх основі ПЕ-80/ПЕ-100 були підставою для дослідження гетерогенного стану їх структури.

При аналізі профілів малокутового розсіяння Рентгенових променів зразками поліетиленів марок ПЕ-80, ПЕ-100 та їх зварного з'єднання ПЕ-80/ПЕ-100, представлених у вигляді графіків як залежності \tilde{I} від q (рис. 5), так і $s^3\tilde{I}$ від s^3 , згідно з роботами [15, 16], де \tilde{I} — інтенсивність розсіяння без внесення колімаційної поправки, а $q = (4\pi/\lambda)\sin\theta = 2\pi s$, встановлено, що всі вони характеризуються гетерогенною структурою, тобто наявністю в їхньому об'ємі контрасту електронної густини $\Delta\rho$ ($\Delta\rho = \rho - \langle\rho\rangle$, де ρ , $\langle\rho\rangle$ — локальне та середнє значення електронної густини). Це означає, що в їхньому об'ємі присутні не менше двох типів областей гетерогенності з різною величиною локальної електронної густини ρ .

Інтерференційний максимум у вигляді «плеча», який характеризує періодичність розміщення в просторі (в об'ємі полімеру) однотипних за густиною областей гетерогенності (кристалітів і аморфних областей), зафіксовано на профілях інтенсивності зразків ПЕ-80, ПЕ-100 та зварного з'єднання ПЕ-80/ПЕ-100 (рис. 5). Середня величина періоду D чергування в об'ємі полімеру однотипних за величиною густини областей гетерогенності (відстань між найближчими центрами однотипних областей гетерогенності), згідно з Брегг'овим рівнянням з урахуванням «закоу синуса» для малих кутів ($2\sin\theta = \sin 2\theta = 2\theta$) [13]:

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

для зварного з'єднання становить $\cong 27$ нм.

Ефективний розмір існуючих областей гетерогенності в об'ємі зразків окремих поліетиленів ПЕ-80, ПЕ-100 та їх зварного з'єднання оцінювали шляхом визначення такого структурного параметра як діапазон гетерогенності l_p [15, 16]. Цей параметер 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 гетерогенності ($\varphi_1 + \varphi_2 = 1$). Виявлено, що величина l_p у зварному з'єднанні ПЕ-80/ПЕ-100 більша порівняно з окремими поліетиленами (табл. 2).

Для напівкількісної оцінки відносного рівня гетерогенності структури досліджуваних полімерних систем порівнювали значення їхнього інваріанту Порода Q' [17]:

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

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

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

де $\langle \Delta\rho^2 \rangle = \varphi_1 \varphi_2 (\varphi_1 - \varphi_2)^2$; при цьому φ_1, φ_2 і ρ_1, ρ_2 — об'ємні частки і електронні густини областей гетерогенності ($\varphi_1 + \varphi_2 = 1$) у двофазовій системі відповідно. З порівняння значень інваріанту Q' для досліджуваних полімерних систем (табл. 2), видно, що відносний рівень гетерогенності структури у зварному з'єднанні має проміжне значення між окремими полімерами ПЕ-80 та ПЕ-100.

Проведеними дослідженнями було встановлено, що гетерогенна структура зварного з'єднання ПЕ-80/ПЕ-100 через рік не зазнала

ТАБЛИЦЯ 2. Деякі структурні параметри досліджуваних полімерних систем.⁷

Зразок	l_p , нм	Q' , відн. од.	D , нм
ПЕ-80	16	5,6	27
ПЕ-100	18	7,3	36
ПЕ-80/ПЕ-100	20	6,6	27

змін (рис. 5).

Релаксаційні зміни, що відбувалися протягом року у зварному з'єднанні ПЕ-80/ПЕ-100, виявлено за результатами термогравіметричної (рис. 6) та термомеханічної (рис. 7) аналіз.

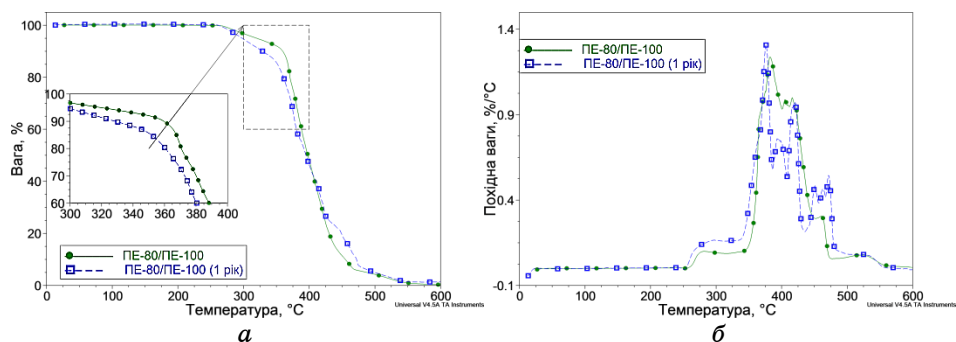


Рис. 6. Криві залежності ваги (а) та її першої похідної (б) від температури зварних з'єднань ПЕ-80/ПЕ-100.⁸

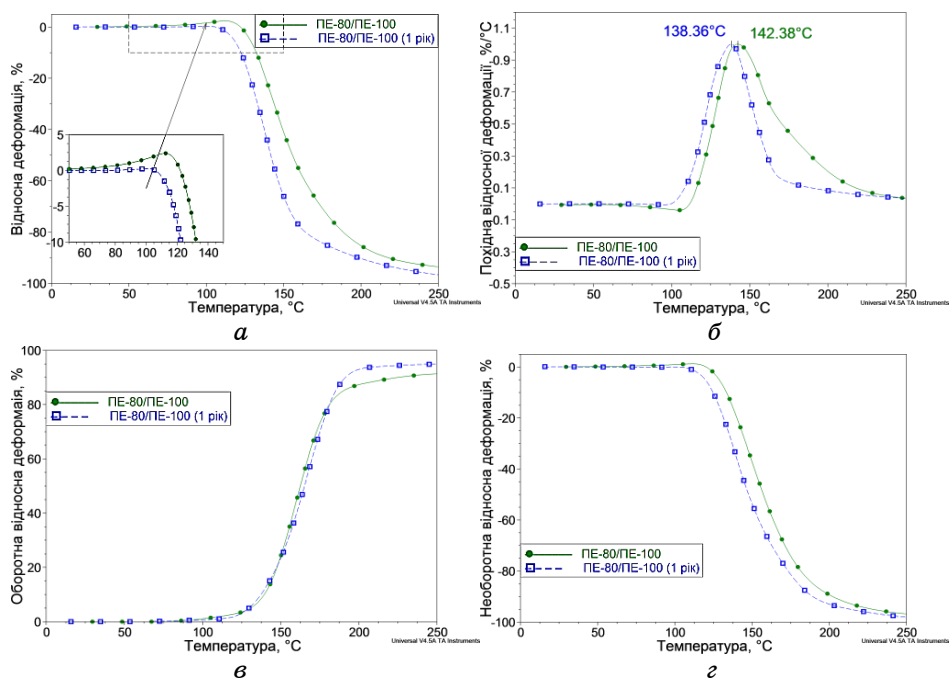


Рис. 7. Криві залежності відносної деформації (а) та її першої похідної (б) від температури, оборотної відносної деформації (в) та необоротної відносної деформації (г) зварних з'єднань ПЕ-80/ПЕ-100.⁹

ТАБЛИЦЯ 3. Термічні характеристики зварних з'єднань PE-80/PE-100.¹⁰

Зразок	T_d , °C	$T_{d \text{ макс.}}$, °C	$T_{пл}$, °C	$T_{пл \text{ макс.}}$, °C
Зварне з'єднання PE-80/PE-100	265	383	115	142
Зварне з'єднання PE-80/PE-100 через 1 рік	257	376	108	138

З термогравіметричних кривих розраховано температуру термоокиснювальної деструкції (T_d) та максимуму інтенсивності термоокиснювальної деструкції ($T_{d \text{ макс.}}$) зварного з'єднання PE-80/PE-100 вихідного та через рік (табл. 3). Видно, що з часом термостійкість матеріалу зменшується, ймовірно, за рахунок релаксації внутрішніх напружень, які утворюються при зварюванні (рис. 6).

Подібною є ситуація і з термомеханічною поведінкою зварних з'єднань. З рисунку 7 видно, що з часом температура початку інтенсивної деформації ($T_{пл}$) і максимуму інтенсивної деформації ($T_{пл \text{ макс.}}$) зварного з'єднання PE-80/PE-100 знижується (табл. 3), що спричинено релаксацією структури полімеру.

4. ВИСНОВКИ

В роботі проведено комплексне дослідження релаксації структури, теплофізичних і термомеханічних властивостей зварних з'єднань поліетиленів PE-80/PE-100, одержаних традиційним методом зварювання пластмас нагрітим інструментом у стик. Встановлено, що в процесі зварювання двох різнотипних поліетиленів формується зварне з'єднання, структура якого зазнає рекристалізації кристалічної фази. Показано, що з часом у зварному з'єднанні відбувається релаксація кристалічної структури (перехід кристалічної модифікації α -форми до змішаної $\alpha\beta$ -форми). Це проявляється у зміні теплофізичних та термомеханічних властивостей. Виявлено зниження протягом року температури початку та максимуму інтенсивності термоокиснювальної деструкції і деформації зразків зварного з'єднання.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА—REFERENCES

1. P. I. Yukhnevsky and G. T. Shirokii, *Building Materials and Products: Textbook* (Minsk: UP «Tekhnoprint»: 2004) (in Russian).
2. A. Galchun, N. Korab, V. Kondratenko, V. Demchenko, A. Shadrin, V. Anistratenko, and M. Iurzhenko, *Polimernyi Zhurnal*, **37**: 242 (2015) (in Ukrainian).

3. V. D. Alpern, *Engineering Networks Made of Polymeric Materials*, **2**: 5 (2002) (in Russian).
4. V. Ryzhov, Ye. Kalugina, N. Biserova, and Yu. Kazakov, *Polimernyye Truby*, **34**: 56 (2011) (in Russian).
5. M. Gorilovskiy and I. Gvozdev, *Polimernyye Truby*, **22**: 47 (2008) (in Russian).
6. *Polymeric Pipes—Ukraine*, **29**: 18 (2013) (in Russian).
7. V. N. Volchenko, *Welding and Weldable Materials* (Moscow: Metallurgiya: 1991) (in Russian).
8. S. S. Volkov and B.Ya. Chernyak, *Welding of Plastics* (Moscow: Khimiya: 1987) (in Russian).
9. A. Galchun, N. Korab, V. Kondratenko, V. Demchenko, A. Shadrin, V. Anistratenko, and M. Iurzhenko, *Nanoscale Research Letters*, **10**: 138 (2015).
10. O. Kratky, I. Pilz, and P. J. Schmitz, *J. Colloid Interface Sci.*, **21**, No. 1: 24 (1966).
11. Yu. S. Lipatov, V. V. Shilov, Yu. P. Gomza, and N. E. Kruglyak, *Radiographic Methods of Investigations of Polymers* (Kiev: Naukova Dumka: 1982) (in Russian).
12. K. E. Russell, B. K. Hunter, and R. D. Heyding, *Polymer*, **38**: 1409 (1997).
13. V. I. Shtompel' and Yu. Yu. Kercha, *Structure of Linear Polyurethanes* (Kiev: Naukova Dumka: 2008) (in Russian).
14. A. Guinier, *Roentgenography of Crystals. Theory and Practice* (Moscow: Fizmatgiz: 1961) (Russian translation).
15. W. Ruland, *J. Appl. Cryst.*, **4**, No. 1: 70 (1971).
16. R. Perret and W. Ruland, *Kolloid Z.—Z. Polymere*, **247**: 835 (1971).
17. G. Porod, *Small-Angle X-Ray Scattering* (London: Academic Press: 1982).

*E. O. Paton Electric Welding Institute, N.A.S. of Ukraine,
11 Kazimir Malevich Str.,
03150 Kyiv, Ukraine*

¹ Fig. 1. Welded joint of polyethylene pipes types PE-80 and PE-100.

² Fig. 2. Model of polyethylene pipes types PE-80 and PE-100 welded joint.

³ Fig. 3. Wide-angle x-ray diffractograms patterns of PE-80, PE-100, and of PE-80/PE-100 welded joint (experimental curve), PE-80/PE-100 (randomized), PE-80/PE-100 (theoretical curve).

⁴ Fig. 4. Wide-angle x-ray diffractograms patterns of PE-80/PE-100 welds, received immediately after the welding process (1), and in one year after the welding (2).

⁵ TABLE 1. Structural characteristics of PE-80 and PE-100 polyethylene and of PE-80/PE-100 welded joint.

⁶ Fig. 5. SAXS intensity profiles for PE-80, PE-100 and PE-80/PE-100 welded specimens, received immediately after the welding process and in one year after the welding.

⁷ TABLE 2. Some structural parameters of the investigated polymer systems.

⁸ Fig. 6. Weight (a) and derivate weight on temperature (σ) curves of PE-80/PE-100 welded joints.

⁹ Fig. 7. Related deformation (a) and derivate related deformation (σ) on temperature, reversible related deformation (ϵ) and non-reversible related deformation (ϵ) of PE-80/PE-100 welded joints.

¹⁰ TABLE 3. Thermal characteristics of the PE-80/PE-100 welded joint.