

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ПОЛІМЕРІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕФЕКТУ РЕБІНДЕРА

М.Г. Кораб, М.В. Юрженко, М.О. Ковальчук, Л.С. Паршутіна, О.М. Чукашкін

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: 4chewip@gmail.com

Шви полімерних матеріалів, зварені нагрітим інструментом встик, відзначаються різноманітністю структурних складових. Дослідження таких швів дозволяє вивчати загальні фундаментальні процеси структуроутворення при формуванні зварних з'єднань полімерів. У даній роботі було проведено механічні випробування зварних з'єднань полімерних труб з локальним навантаженням у середовищі поверхнево активних речовин та використанням ефекту Ребіндера. Експериментальні зразки з'єднань труб діаметром 63, 90, 110 та 160 мм із поліетилену марки ПЕ80 виконували на стандартному обладнанні для зварювання нагрітим інструментом встик, на режимах, рекомендованих ДБН В.2.5-41: 2009. Випробування проводили згідно вимогам, міжнародного стандарту ISO 22088 «Розтріскування під дією зовнішнього середовища» (ESC). Досліджено характерні особливості розповсюдження тріщин при випробуваннях основного матеріалу та зони сплавлення зварного шва. З використанням оптичної мікроскопії досліджено поверхні руйнування зразків безпосередньо після випробувань та після хімічного травлення у розчині сірчаної кислоти. Показано, що в зоні сплавлення утворюється ослаблена «розмита» структура полімерного матеріалу, яка руйнується при локальному навантаженні. Бібліогр. 14, рис. 10.

Ключові слова: зварювання нагрітим інструментом встик, надмолекулярна структура, механічні випробування, поверхні руйнування

Вступ. Надмолекулярна будова полімеру дуже складна та розділяється на декілька рівнів в залежності від розмірів структурних елементів. Для кристалічних полімерів основною складовою одиницею є сфероліти, розміри яких мають величину на рівні 10 мкм. На наступному рівні розташовуються домени кристалітів-ламель, що мають розміри 10...100 нм. Розміри складчастих ламелей оцінюються у 10 нм. Елементарна складчаста ланка, яка утворює ламелі має розміри у межах 0,1...1,0 нм.

Більшість конструкційних пластмас мають в складі різноманітні домішки та наповнювачі, тому спостерігати мікроструктуру матеріалу за допомогою оптичного мікроскопа зазвичай неможливо [1]. Наочно оцінити деталі складної надмолекулярної будови полімерного зварного з'єднання можна досліджуючи характерні особливості руйнування зварного шва під дією локальних механічних навантажень [2, 3].

Оскільки полімери складаються з довгих гнучких молекулярних ланцюгів, вони мають характерні особливості матеріалу у твердому стані: неоднорідність, нелінійність та часову залежність механічних властивостей [4]. Втрата міцності полімером зазвичай відбувається в декілька етапів після досить значних пластичних деформацій. У теорії руйнування полімерів використовують терміни «послаблення» (failure), тобто накоплення дефектів структури, «руйнування» (fracture) – формування тріщин з утворенням нових поверхонь та розрив (rupture) – розділення тіла на

окремі частини. Тобто поступова втрата міцності полімерним матеріалом при навантаженні відбувається за рахунок розширення існуючих та утворення нових дефектів надмолекулярної структури. Дослідження розповсюдження тріщин використовується для визначення різних видів міцності полімерних матеріалів [5]. У даній роботі проводили дослідження міцності основного матеріалу та зварних з'єднань полімерів механічним навантаженням із додатковим стимулюванням руйнування за допомогою поверхнево активних речовин (ПАР).

Процеси руйнування, що відбуваються у твердому полімері, суттєво залежать від його фізико-хімічної взаємодії з навколишнім середовищем. Такі органічні речовини, як спирти, жирні кислоти, каніфолі, мила містять у складі молекул одночасно гідрофільні та гідрофобні групи та називаються поверхнево активними. Молекули ПАР при контакті інтенсивно адсорбуються на поверхні твердого тіла, що суттєво зменшує його поверхневу енергію, та пропорційно зменшують міцність тіла [6, 7].

Адсорбційне зниження міцності твердих тіл отримало назву ефект Ребіндера [8]. Ефект має універсальний характер та спостерігається для будь-яких твердих матеріалів.

У полімерах розвиток тріщини у матеріалі відбувається через послідовний розрив окремих макромолекулярних ланцюгів. З просуванням тріщини утворюються нові поверхні матеріалу, які адсорбують ПАР. Молекули ПАР, покриваючи

Кораб М.Г. – <http://orcid.org/0000-0001-8030-1468>, Юрженко М.В. – <http://orcid.org/0000-0002-5535-731X>,

Ковальчук М.О. – <https://orcid.org/0000-0003-2161-643X>

© М.Г. Кораб, М.В. Юрженко, М.О. Ковальчук, Л.С. Паршутіна, О.М. Чукашкін, 2023

собою новоутворені площини тріщини нейтралізують їх високий енергетичний потенціал та намагаються просунутись якнайближче до самого початку тріщини. Навіть при відсутності зовнішніх навантажень ці молекули, стикаючись між собою створюють в основі тріщини руйнівне зусилля F (рис. 1), яке в мінімальних зазорах може досягати значної величини.

Використовуються різні методики створення локальних навантажень та концентраторів напружень у полімерному зразку. Міжнародний стандарт ISO 22088-1 [9] дає визначення процесу утворення тріщин в полімерному матеріалі (пластмасі), який знаходиться в певному хімічному середовищі та перебуває під дією постійного напруження, меншого за величину межі текучості. Цей процес має стандартну назву – «розтріскування під дією зовнішнього середовища» (environmental stress cracking, ESC).

Один із найбільш розповсюджених способів оцінки стійкості до ESC – метод вигнутої пластинки [10]. На пластину полімерного матеріалу наносять надріз, який слугує концентратором для ініціації тріщин, та згинають у цьому місці навпіл, створюючи постійне механічне напруження. Вигнуті пластинки розміщують у середовищі ПАР та через деякий час оцінюють кількість та розміри тріщин, що утворились. Однак, навантаження при цьому методі прикладається асиметрично та одразу по всій ширині пластини-зразка, тому цей метод застосовують для випробувань основного матеріалу, а для полімерних зварних з'єднань він непридатний. У даній роботі ставилась задача порівняльних випробувань міцності основного матеріалу та матеріалу зварних швів, а також оцінки надмолекулярної будови перехідної зони сплавлення у зварних з'єднаннях поліетиленових труб.

У роботі використовували відрізки стандартних поліетиленових труб діаметром 63, 90, 110 та 160 мм, призначених для будівництва газопроводів, виготовлених із поліетилену марки ПЕ80 згідно з вимогами ДСТУ Б В.2.7-73-98. Використовували труби чорного та жовтого кольорів.

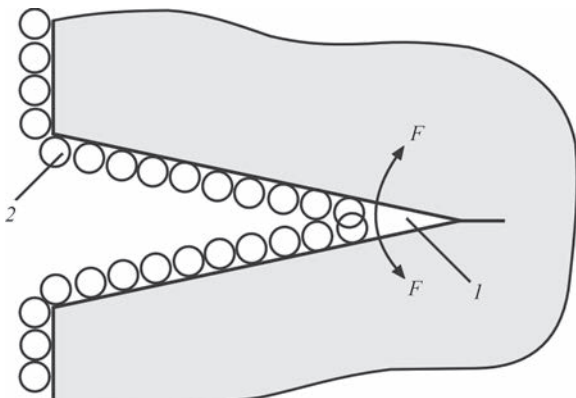


Рис. 1. Схема впливу ПАР на розвиток тріщини в твердому тілі: 1 – початок тріщини; 2 – молекули ПАР на поверхні

Відрізки поліетиленових труб з'єднували стиковими зварними швами на стандартному обладнанні для зварювання нагрітим інструментом встик, на режимах, рекомендованих нормативом [13].

Метод визначення стійкості до утворення тріщин. Стійкість основного матеріалу та матеріалу зварних швів до утворення тріщин визначали згідно з методикою ISO 22088-4 [11], шляхом утворення локального навантаження в потрібній області полімерного зразка. Для цього використовували метод вдавлення стрижня (pin impression method), сутність якого схематично показано на рис. 2. Зі зварного з'єднання вирізається пластинчастий зразок з розташуванням шва посередині. На лінії сплавлення свердлиться отвір діаметром 3...4 мм в залежності від розмірів зразка. В отвір вдавлюється циліндричний стрижень дещо більшого діаметру з конусним наконечником, що створює у зразку загальні зусилля розтягання F та тангенційні зусилля по периметру отвору f . В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона (ІЕЗ) вже проводили роботи з використанням цього методу для порівняння міцності зварного стикового шва поліетиленових труб в різних точках орбіти стику [12].

В усіх випробуваннях за методикою ISO 22088-4 використовували стрижень з конусним наконечником, варіюючи співвідношенням діаметрів отвору та стрижня для змінення величини напруження у зразку (рис. 2). Після введення стрижня у отвір та виникнення локального навантаження зразка зі зварними швами поміщали у водний розчин ПАР (марка ОП-7) при температурі до 80 °С та витримували там від декількох хвилин до годин до появи тріщин. Для полегшення вивчення лінії сплавлення зварних швів виконували з'єднання з труби

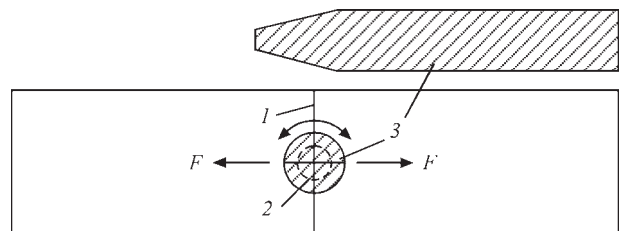


Рис. 2. Схема ініціації руйнування зварного з'єднання з використанням отвору та циліндричного стрижня: 1 – лінія сплавлення зварного шва; 2 – наскрізний отвір у зразку; 3 – циліндричний стрижень

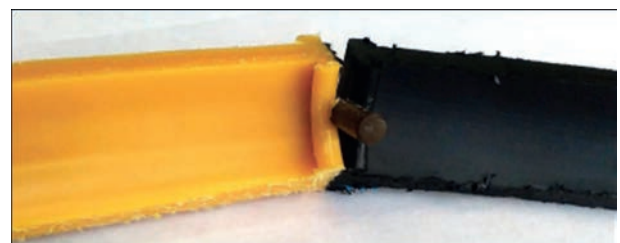


Рис. 3. Зразок стикового зварного з'єднання поліетиленових труб, зруйнований після випробувань

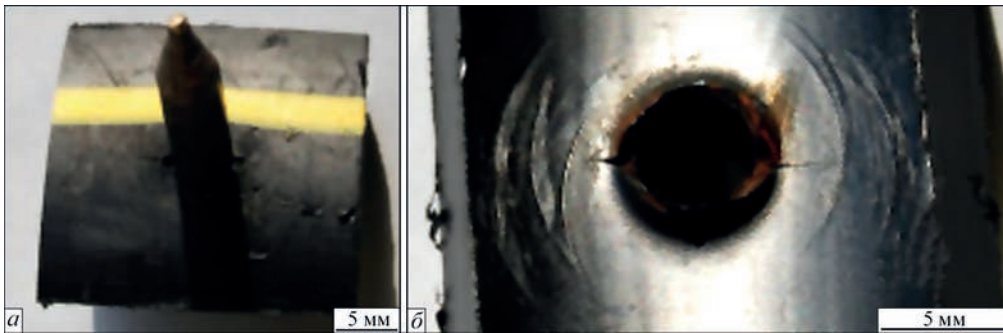


Рис. 4. Тріщини в зразках з основного матеріалу труб із поліетилену газових марок ПЕ80 товщиною стінки 10 мм на зовнішній (а) та внутрішній поверхні труби (б)

чорного та жовтого кольорів. У більшості випадків, при локальному ініціюванні напруження за допомогою стрижня, зварні з'єднання руйнувались поблизу лінії сплавлення (рис. 3). Різниця в кольорах труб дозволяє добре оцінити приналежність полімерного матеріалу до однієї чи іншої трубної деталі на поверхнях руйнування.

Знімки зразків зроблені цифровою камерою Nikon D350 (NIKON Corp, Токіо, Японія). Збільшенні зображення поверхонь зразків зроблені тією ж камерою, вбудованою в оптичний поляризаційний мікроскоп Versamet-2 (UNITRON, New-York, NY, USA).

Результати досліджень. Поліетилену трубних марок ПЕ80 та ПЕ100 є досить пластичними матеріалами з високою стійкістю до тріщин. Тому при випробуваннях основного матеріалу поліетиленових труб невеликі тріщини з'являються тільки після витримування під напруженням в середовищі ПАВ протягом декількох годин (рис. 4). Тріщини в основному матеріалі мають невелику довжину та розповсюджуються по обидві боки від джерела напруження вздовж прямої лінії. На зовнішній поверхні труби напрямок тріщин точно співпадає зі поздовжньою віссю труби, що свідчить про певну структурну організацію матеріалу. На внутрішній поверхні труби тріщини утворюються у поперечному відносно осі напрямку, вони не мають наскрізного характеру, а формуються на поверхнях зразків там, де напруження та вплив ПАВ найбільші.

Поверхні руйнування зразка труб із поліетилену ПЕ80 зовнішнім діаметром 110 мм та товщиною стінки 10 мм (рис. 5) демонструють повністю когезійну природу зварного з'єднання, тобто фрагменти матеріалу одного елемента з'єднання присутні на поверхні руйнування іншого. Зразок зварного з'єднання труб діаметром 160 мм, товщиною стінки 14,6 мм при випробуваннях руйнувався неоднорідно (рис. 6). Частина зразка руйнується точно вздовж поверхні сплавлення, інша частина демонструє спільний характер розповсюдження тріщини по шву та основному матеріалу труби. При значній товщині стінки труби напру-

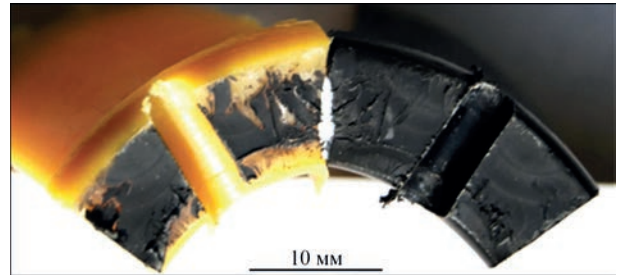


Рис. 5. Поверхні руйнування зварного з'єднання труб з ПЕ80 діаметром 110 мм та товщиною стінки 10 мм

мок розповсюдження тріщини може змінюватись та відходити від ослабленої зони сплавлення.

Аналізуючи збільшене зображення тріщини, що утворюється при руйнуванні зварного з'єднання (рис. 7), можна судити про характер перехідної структури, що утворилась після охолодження розплавленого матеріалу всередині шва. Суцільна сферолітна структура по лінії розмежування не спостерігається. Вочевидь моноліти двох деталей поєднуються через більш дрібні упорядковані структури типу фібріл, складчастих доменів або міцел. Отже, лінія з'єднання в перехідній структурі опиняється найслабшим місцем, при локальному навантаженні починається розтягування надмолекулярних структур (рис. 7, знизу), що утримують з'єднані елементи. В звичайних умовах повільно, а в середовищі ПАВ досить швидко, розтягну-

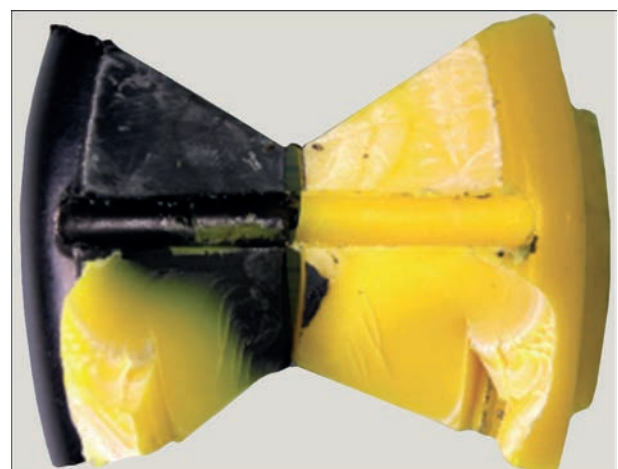


Рис. 6. Поверхні руйнування зварного з'єднання труб з ПЕ80 діаметром 160 мм та товщиною стінки 14,6 мм

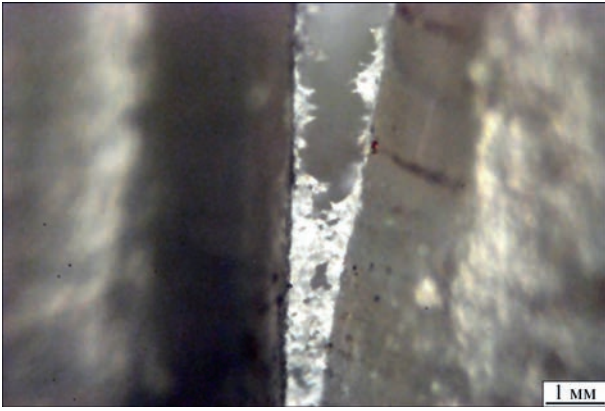


Рис. 7. Розвиток тріщини при руйнуванні зварного з'єднання поліетиленових труб, $\times 10$

ті структури досягають межі міцності та рвуться, сприяючи подальшому розповсюдженню тріщини. Якщо подібні ослаблені структури в зварному шві мають локальний характер, тріщина, руйнуючи їх, зупиняється або змінює напрямок, зустрівши міцніші структурні ділянки. В нашому випадку, перехідні структури рівномірно розподілені всією площею орбіти стику, тому й руйнування відбувається в цій площині, або її околицях. На поверхні руйнування спостерігаються тільки залишки розірваних перехідних структур (рис. 7, верхня частина).

Лінія сплавлення двох трубних зразків з поліетилену різних кольорів (рис. 8) демонструє часткове взаємопроникнення надмолекулярних доменів чорного та жовтого поліетиленів (на фото має білий колір). Профіль межі розподілу має нерівномірний зубчастий характер, вірогідно сформований під дією випадкових факторів. Такий профіль явно не може бути наслідком спільної течії розплавів двох деталей, що з'єднуються під дією зусилля осадження. У перехідній зоні видно гострі протяжні елементи матеріалу чорного та жовтого матеріалу, які взаємно проходять крізь лінію сплавлення, «розмиваючи» її. Логічно припустити, що чим глибше відбувається подібне взаємопроникнення матеріалів при формуванні шва, тим міцніше буде утворене зварне з'єднання. Єдина рушійна сила такого взаємопроникнення – це тепловий рух сегментів макромолекулярних ланцюгів при підвищеній температурі. Швидкість такого руху обмежена та різко падає зі зниженням температури. Тому для утворення міцного зварного з'єднання необхідно перебування матеріалу в зоні сплавлення деякий час при підвищеній температурі.

Інформацію про характер мікроструктури полімеру дозволяє отримати дослідження поверхонь їх руйнування. Руйнування будь якого матеріалу є утворенням нових поверхонь, у даному випадку руйнування зразків зварних з'єднань поліетиленових труб є процесом, що відбувається відносно повільного розповсюдження площини тріщини від місця її ініціації та зародження. У напівкристаліч-

ному матеріалі, яким є поліетилен високої густини, на надмолекулярному рівні межують ділянки упорядкованого та аморфного матеріалу. У аморфних ділянках й міжмолекулярних порожнинах також скупчуються різноманітні домішки та олігомери. Розповсюдження тріщини відбувається саме по ослабленим, аморфним ділянкам, тому дозволяє проявити структуру матеріалу.

Поверхні руйнування вивчали за допомогою оптичного мікроскопу на зразках чорного кольору, оскільки темний матеріал дозволяє отримати більш контрастне зображення. Типовий приклад направлених структурних утворень в масиві полімерного матеріалу приведено на рис. 9. На процес розповсюдження тріщини накладається низка об'єктивних та випадкових факторів. Тому ми спостерігаємо на поверхні руйнування видовжені криволінійні структури, які є проявом регулярної сферолітної структури і випадково розташованою ділянками, які утворились через «блукання» тріщини на ділянках з відносно ізотропною структурою.

Сферолітна структура кристалічного полімеру формується нерівномірно, в залежності від теплових умов на рівні мікронних розмірів та наявності необхідної кількості зародків кристалізації. При утворенні упорядкованих структур, низькомолеку-

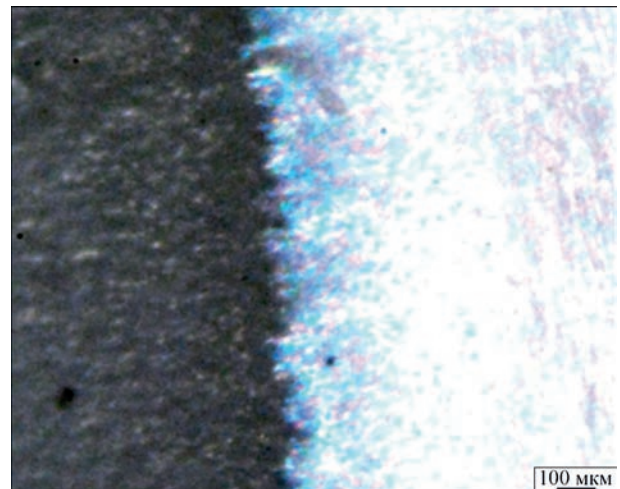


Рис. 8. Лінія зварного з'єднання поліетиленових труб різних кольорів при збільшенні $\times 20$

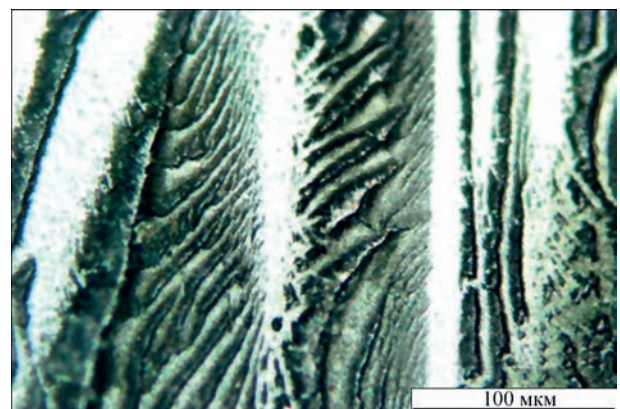


Рис. 9. Фрагмент поверхні руйнування зі збільшенням $\times 10$

лярні речовини витісняються в області між ними. Випадково сформовані сфероліти, в свою чергу, утворюють надкристалічні структури, які при руйнуванні формують поверхню, подібну до двоскатних ламелей, тільки значно більшого масштабу. На рис. 9 добре видно ці лінійні, двоскатні, або напівкруглі утворення з глибокими, загостреними донизу впадинами між ними. Слід мати на увазі, що така поверхня утворилась не в результаті якоїсь спеціальної обробки або травлення, а внаслідок вільного процесу руйнування матеріалу. Така поверхня свідчить про суттєву фізичну неоднорідність матеріалу, в якому упорядковано чергуються області міцного та ослабленого матеріалу.

Двоскатні упорядковані створення межують із більш протяжними видовженими лінійними областями на поверхні. Вочевидь, на цих ділянках матеріал на мікрорівні створював менший опір розповсюдженню тріщини і руйнування відбувалось прямолінійно, залишаючи на поверхні слід, як проведений «під лінійку». Спостерігаються, також, ділянки з разупорядкованою структурою поверхні, яким, вочевидь відповідають аналогічні ділянки структури в масиві матеріалу. Заглиблення у поверхні між двоскатними структурами насправді мають досить рівномірну однорідну структуру. Вочевидь, це є наслідком того, що ослаблені ділянки між кристалічними областями мають свій певний мінімальний розмір, який проявляється на поверхні у вигляді ниткоподібних утворень майже однакової ширини. Видно, що такий характер поверхні є тільки в деяких певних місцях, отже він проявляється тільки при збігу декількох необхідних факторів у процесі розповсюдженні тріщини.

Наочно виявити на поверхні полімеру кристалічні та аморфні ділянки допомагає травлення зразка у розчині сірчаної кислоти. Аморфні ослаблені ділянки розчиняються значно швидше за кристалічні, тому проявляються на поверхні у вигляді заглиблень на фоні більш високих упорядкованих ділянок. Поверхні руйнування зразків піддавали травленню та досліджували за допомогою оптичного мікроскопу (рис. 10).

Ділянки поверхні з лінійною упорядкованою структурою майже не зазнають змін після травлення. Вочевидь, це області з найбільшим ступенем кристалічності та відсоток аморфної фази тут невеликий. Тому після травлення на поверхні залишаються тільки вузькі поздовжні полоси, що утворились після видалення невеликої кількості ослабленого матеріалу. Зони сферолітної структури характеризуються суттєвою нерівномірністю поверхні та наявністю утворень округлої форми. Оскільки сфероліти кристалізуються нерівномірно, вони скупчуються в деяких місцях, утворюючи надкристалічні асоціації, що складаються з округлих об'єктів. Домішки, олігомери та інший аморфний матеріал в невеликій кількості залишаються в складі сферолітів, але в основній масі витісняються за межі упорядкованих зон, утворюючи, в свою чергу, аморфні асоціації, іноді досить великих розмірів.

На рис. 10, *a* видно, що структура поверхні неоднорідна та змінюється від однієї ділянки до іншої. Кристалічні ділянки неправильної форми, вочевидь є проявом асоціацій сферолітів, які зрослись в одне велике утворення. Не випадково, одна з найбільш реалістичних теорій будови полімерів, паракристалічна модель Хоземанна [14] описує його структуру як рухому матрицю з кристалічних складчастих утворень, які плавають в аморфній фазі, розташованій між ними. Окремі випуклі округлі об'єкти можуть бути залишками розірваних молекулярних доменів – фібрил, які утворились в процесі утворення тріщини. Аморфний матеріал займає в деяких областях досить великі площі, отже в цих зонах полімерний матеріал має знижену міцність, що може слугувати напрямком для розповсюдження тріщин. На фото найбільшого масштабу (рис. 10, *b*) видно упорядковані утворення круглої форми, які після травлення отримали характерну конусоподібну форму, всередині якої спостерігається більш дрібна пошарова структура, подібна до сферолітної. Хімічний травник видалив на цих об'єктах усі аморфні петлі ланцюгів та прохідні молекули, залишивши тільки кристалічну фазу сферичної форми.

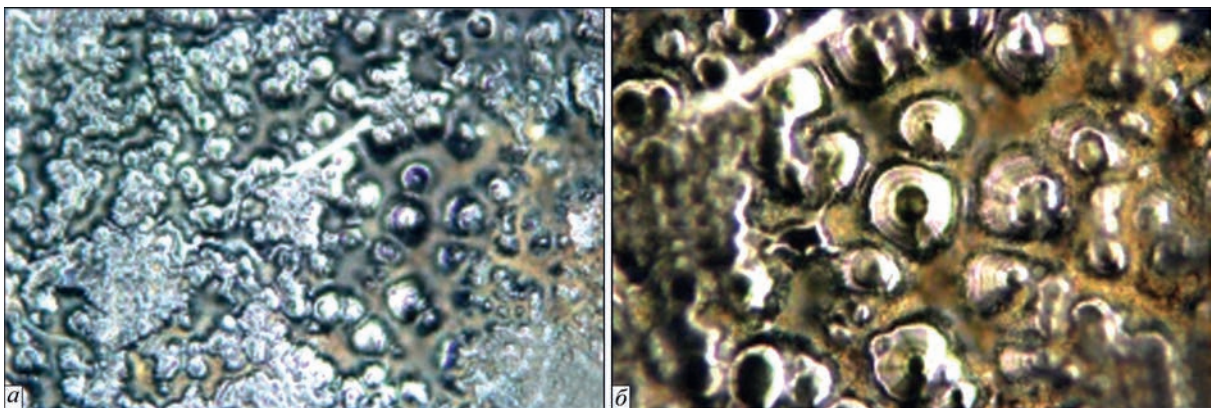


Рис. 10. Ділянка упорядкованих сферолітних структур, збільшення: *a* – $\times 10$; *b* – $\times 20$

Слід відзначити, що зварні з'єднання, що досліджувались є механічно рівномірними згідно з випробуваннями на розтяг згідно з [12]. Таким чином, хоча мікроструктура полімерного матеріалу досить нерівномірна, вздовж поверхні сплавлення формується ослаблена зона, але на макрорівні можна вважати матеріал зварного з'єднання статистично ізотропним. У зоні сплавлення стикового зварного шва формується напівкристалічна перехідна зона, що вочевидь складається із фрагментів макромолекул та кластерів, що тонким шаром з'єднують монолітну сферолітну структуру основного матеріалу.

Висновки

1. Проведено випробування на стійкість до тріщин основного матеріалу та зварних з'єднань поліетиленових труб згідно з вимогами міжнародного стандарту ISO 22088-4 з використанням ефекту Ребіндера.

2. Характер розповсюдження тріщин в основному матеріалі свідчить про певну структурну організацію поліетилену у поздовжньому напрямку труби. На зовнішній поверхні труби напрямок тріщин точно співпадає з її поздовжньою віссю. У зварних з'єднаннях поліетиленових труб тріщини утворюються вздовж поверхні сплавлення, або поблизу неї.

3. Характер руйнування показує, що суцільна сферолітна структура по лінії сплавлення не існує, а ослаблена «розмита» структура полімерного матеріалу утворюється в цій зоні взаємопроникненням фрагментів макромолекул. На збільшених зображеннях поверхні руйнування зварних з'єднань спостерігаються як неупорядковані випадково розташовані ділянки, так і фрагменти регулярної сферолітної структури, що свідчить про «блукання» тріщини в районі ослабленої зони сплавлення.

Список літератури/References

1. Патон Б.Є. (2018) *Словник-довідник зі зварювання та склеювання пластмас*. Київ, Наукова думка.

- (2018) *Reference book on welding and gluing of plastics*. Ed. B.E. Paton. Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
2. Ward, I.M., Sweeney, J. (2012) *Mechanical Properties of Solid Polymers*. 3rd Edition. Wiley.
3. Кулак, М.И. (2002) *Фрактальная механика материалов*. Москва, Высшая школа.
4. Kulak, M.I. (2002) *Fractal mechanics of materials*. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].
4. Demchenko, V., Iurzhenko, M., Shadrin, A. et al. (2017) Relaxation behavior of polyethylene welded joints. *Nanoscale Research Letters*, **12**, 280–285. DOI: <https://doi.org/10.1186/s11671-017-2059-z>
5. Buketov, A., Brailo, M., Yakushchenko, S. et al. (2019) Investigation of Tribological Properties of Two-Component Bidisperse Epoxy-Polyester Composite Materials for Its Use in the Friction Units of Means of Sea Transport. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, **63**(3), 171–182. DOI: <https://doi.org/10.3311/PPme.13161>
6. Ibeh, C.C. (2011) *Thermoplastic Materials: Properties, Manufacturing Methods and Applications*. CRC Press, Boca Raton.
7. Четвергов В.А. (2002) *Физические основы надежности. Конспект лекций*. Омск, ОГУПС.
8. Chetvergov, V.A. (2002) *Physical principles of reliability. In: Lectures*. Omsk, OGUPS [in Russian].
8. Volynskii, A.L., Bakeev, N.F. (2013) Regularities of the Reh-binder effect in polymers. Review. *Prot Met Phys Chem Surf*, **49**, 493–509. DOI: <https://doi.org/10.1134/>
9. ISO 22088-1:2006 *Plastics – Determination of resistance to environmental stress cracking (ESC). Part 1: General guidance*.
10. ISO 22088-3:2006 *Plastics – Determination of resistance to environmental stress cracking (ESC). Part 3: Bent strip method*.
11. ISO 22088-4:2006 *Plastics – Determination of resistance to environmental stress cracking (ESC). Part 4: Ball or pin impression method*.
12. Минеев Э.А., Репа В.П. (1989) *К вопросу исследования прочности сварных стыковых соединений полиэтиленовых труб. Новые разработки по сварке и склеиванию пластмасс*. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона.
13. Mineev, E.A., Repa, V.P. (1989) *To problem of investigation of welded butt joint strength from polyethylene pipes*. Kyiv, PWI [in Russian].
13. Мінрегіонбуд України (2010) ДБН В.2.5-41: 2009 *Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. Газопроводи з поліетиленових труб. Частина I. Проектування. Частина II. Будівництво*. Київ, ДП «Укрархбудінформ».
13. Minregionbud of Ukraine (2010) DBN V.2.5-41: 2009. *Plumbing installations and constructions. External networks and facilities. Gas pipelines from polyethylene pipes. Pt 1: Design. Pt 2: Construction*. Kyiv, SE Ukrarkhbuildinform [in Ukrainian].
14. Hosemann, R. (1982) Dependence of the change in the free enthalpy on the lattice number with the formation of microparacrystals. *Colloid and Polymer Science*, **9**, 864–870.

INVESTIGATIONS OF THE STRUCTURE OF WELDED JOINTS OF POLYMERS USING THE REHBINDER EFFECT

M.G. Korab, M.V. Yurzhenko, M.O. Kovalchuk, L.S. Parshutina, O.M. Chukashkin

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: 4chewip@gmail.com

Welds of polymeric materials, butt welded with a heated tool, are distinguished by a variety of structural components. Investigations of such welds allow studying the general fundamental processes of structure formation in the formation of welded joints of polymers. In this work, mechanical tests of welded joints of polymer pipes with a local load in the environment of surface active substances and with the use of the Reh binder effect were carried out. Experimental specimens of pipe joints with a diameter of 63, 90, 110 and 160 mm from PE80 polyethylene were produced in the standard equipment for butt welding with a heated tool on the modes recommended by DBN V.2.5-41:2009. The tests were carried out in accordance with the requirements of the international standard ISO 22088 “Cracking under the influence of the environment” (ESC). The characteristic features of cracks propagation in the tests of the base material and the fusion zone of the weld were investigated. Using optical microscopy, the fracture surfaces of the specimens were investigated immediately after tests and after chemical etching in sulfuric acid solution. It was shown that in the fusion zone, a weakened “blurry” structure of polymeric material is formed, which is fractured during a local load. 14 Ref., 10 Fig.

Keywords: butt welding with a heated tool, supramolecular structure, mechanical tests, fracture surfaces

Надійшла до редакції 02.01.2023