ЗМІСТ

Стор.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ……... 10

ВСТУП .……...…… 12

РОЗДІЛ 1. **ВИСОКОТЕХНОЛОГІЧНІ ПОЛІМЕРИ ТА КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ НА ЇХ ОСНОВІ …….** 16

1.1. Види високотехнологічних термопластичних полімерів та їх загальні властивості ……..……. 16

1.1.1. Елементоорганічні термостійкі полімери …….. 19

1.1.2.Високотехнологічні полімери на основі модифікованого поліетилену ……. 23

1.1.3. Високотехнологічні ариленові полімери ……..…… 25

1.1.3.1. Поліфеніленсульфіди …… 28

1.1.3.2. Поліміди ……..….. 29

1.1.3.3. Поліетеріміди ……. 31

1.1.3.4. Полісульфони ……. 34

1.1.3.5. Поліетеркетони …….. 35

1.2. Полімерні композиційні матеріали на основі високотехнологічних полімерів та їх практичне застосування ……... 39

1.2.1. ПКМ на основі поліфеніленсульфіду (PPS) …….. 46

1.2.2. ПКМ на основі полііміду (PI) ……. 48

1.2.3. Поліетерімід (PEI) та ПКМ на його основі …… 50

1.2.4. Полісульфони (PSU, PES, PPSU) та ПКМ на їх основі …. 53

1.2.5. Поліетеретеркетон (PEEK) та ПКМ на його основі …….. 55

1.2.6. Препреги …… 59

1.2.7. Характеристики високотехнологічних ПКМ ZX-324 на основі PEEK та ПКМ ZX-410 на основі PEI …… 65

1.3. Дослідження теплофізичних властивостей новітніх високотехнологічних ПКМ …….……... 69

1.3.1. Температурна поведінка коефіцієнту теплопровідності високотехнологічних ПКМ ……..……. 69
1.3.1.1. Методика та обладнання для визначення коефіцієнту теплопровідності високотехнологічних ПКМ …… 70
1.3.1.2. Експериментальні результати вимірювань коефіцієнту теплопровідності високотехнологічних ПКМ …….. 73
1.3.2. Теплові процеси в високотехнологічних ПКМ …….. 79
1.3.2.1. Методика та обладнання для вивчення теплових процесів в високотехнологічних ПКМ ……. 79
1.3.2.2. Експериментальні результати дослідження теплових процесів в високотехнологічних ПКМ ……. 80
1.3.3. Термодеструкція та термостабільність високотехнологічних ПКМ …… 82
1.3.3.1. Методика та обладнання для дослідження термодеструкції та термостабільності високотехнологічних ПКМ … 82
1.3.3.2. Експериментальні дослідження термоокислювальної деструкції та термостабільності високотехнологічних ПКМ. 84
1.3.4. Термомеханічна поведінка високотехнологічних ПКМ.... 86
1.3.4.1. Методика та обладнання для дослідження термомеханічної поведінки високотехнологічних ПКМ ……..… 86
1.3.4.2. Експериментальні дослідження термомеханічної поведінки високотехнологічних ПКМ ……..... 87
1.3.4.3. Температурні залежності повзучості та релаксації напруження високотехнологічних ПКМ …….. 93
1.4. Опис основних способів зварювання, що застосовують при виготовленні конструкцій з високотехнологічних пластмас ……. 101
РОЗДІЛ 2. **ДОСЛІДЖЕННЯ ЗВАРЮВАНОСТІ, РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ТА УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ТЕРМОРЕЗИСТОРНОГО ЗВАРЮВАННЯ НОВИХ ПКМ НА ОСНОВІ ВИСО-**

КОТЕХНОЛОГІЧНИХ ПОЛІМЕРІВ ……..... 109

2.1. Технології терморезисторного зварювання високотехнологічних ПКМ …… 109

2.2. Математичне моделювання термічних процесів при терморезисторному зварюванні високотехнологічних ПКМ ……..…. 118

2.3. Експериментальні дослідження процесу терморезисторного зварювання високотехнологічних ПКМ ……... 132

2.3.1. Основні параметри закладних елементів, які виготовлені з плетеної металевої сітки ……. 135

2.3.2. Дослідження теплових процесів при терморезисторному зварюванні високотехнологічних ПКМ ……... 145

2.3.3. Експериментальні дослідження міцнісних характеристик терморезисторних зварних швів високотехнологічних ПКМ … 158

2.4. Технологічних рекомендацій з терморезисторного зварювання високотехнологічних ПКМ …..…….… 172

2.4.1. Технологічні рекомендації з терморезисторного зварювання високотехнологічних ПКМ на основі поліетеріміду (PEI) …….. 173

2.4.2.Технологічні рекомендації з терморезисторного зварювання високотехнологічних ПКМ на основі поліетеретеркетону (PEEK) ……..……..…… 175

2.4.3. Дослідне випробування розроблених технології та технологічних рекомендацій ……...…… 176

РОЗДІЛ 3. **ДОСЛІДЖЕННЯ ЗВАРЮВАНОСТІ, РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ТА УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ТЕПЛОВОГО ЗВАРЮВАННЯ НОВИХ ПКМ НА ОСНОВІ ВИСОКОТЕХНОЛОГІЧНИХ ПОЛІМЕРІВ …….** 185

3.1. Технології зварювання нагрітим інструментом встик високотехнологічних полімерів та ПКМ на їх основі, визначення

меж варіювання основних параметрів технологічного процесу зварювання ..……. 185
3.2. Моделювання термомеханічних процесів при зварюванні нагрітим інструментом встик високотехнологічних ПКМ ……..… 194
3.3. Дослідження впливу основних параметрів режиму зварювання нагрітим інструментом на морфологію та міцнісні характеристики зварних з'єднань високотехнологічних ПКМ ……..… 210
3.3.1. Експериментальне обладнання для зварювання нагрітим інструментом високотехнологічних ПКМ …….. 210
3.3.2. Дослідження теплових процесів при зварюванні нагрітим інструментом встик високотехнологічних ПКМ ……. 220
3.3.3. Експериментальні дослідження морфології та міцнісних характеристик зварних з'єднань високотехнологічних ПКМ при стиковому зварюванні нагрітим інструментом ……..…. 230
3.3.4. Дослідне зварювання нагрітим інструментом плівкових матеріалів з високотехнологічних полімеру ETFE класу поліолефінів ……..…… 246
3.4. Розробка макетів обладнання та технологічних рекомендацій для зварювання нагрітим інструментом встик виробів з високотехнологічних ПКМ ……...…… 251
РОЗДІЛ 4. **ДОСЛІДЖЕННЯ ЗВАРЮВАНОСТІ, РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ТА УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ НОВИХ ПКМ НА ОСНОВІ ВИСОКОТЕХНОЛОГІЧНИХ ПОЛІМЕРІВ …….....** 263
4.1. Технології ультразвукового зварювання високотехнологічних ПКМ, визначення меж варіювання основних параметрів технологічного процесу зварювання …...……. 263
4.2. Математичне моделювання термомеханічних процесів при УЗ зварюванні високотехнологічних ПКМ …….……. 270

4.3. Експериментальне дослідження впливу основних параметрів режиму УЗ зварювання на морфологію та міцнісні характеристики зварних з'єднань високотехнологічних ПКМ ……. 283
ЗАКЛЮЧЕННЯ …… 293
ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ……...…… 299
ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЗЖИК …… 315

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

α	коефіцієнт лінійного теплового розширення, $^{o}C^{-1}$
λ	коефіцієнт теплопровідності, Вт/м ^{o}К
ε	відносна деформація, %
η	в’язкість, Па с
σ	навантаження,робочий тиск, МПа
τ	час релаксації, с
P_M	питома електрична потужність, кВт/м^2
$T_{пл}$	температура плавлення, ^{o}С
$T_{ск}$	температура склування, ^{o}С
$T_{тч}$	температура текучості, ^{o}С
ДСК	диференційна сканувальна калориметрія
ТГА	термогравіметричний аналіз
ТМА	термомеханічний аналіз
ПКМ	полімерний композиційний матеріал
МКС	міжнародна космічна станція
Препрег	листовий ПКМ – напівфабрикат
LSS	lap shear strength, міцність на зсув, МПа
ETFE	кополімер етилентетрафторетилен
HDPE	поліетилен високої густини
PA	поліамід
PAI	поліамідімід
PC	полікарбонат
PEEK	поліетеретеркетон
PEI	поліетерімід
PEK	поліетеркетон
PEKK	поліетеркетонкетон
PERT	поліетилен підвищеної термостійкості
PES	поліетерсульфон

PET	поліетилентерефталат
PEX	зшитий поліетилен
PI	поліімід
PPO	поліфеніленоксид
PPS	поліфеніленсульфід
PPSU	поліфеніленсульфон
PS	полістирол
PTFE	політетрафторетилен

ВСТУП

Передові галузі світової промисловості, такі, як авіа- та ракетобудування, автомобілебудування, електроніка, електротехніка, медицина, будівництво та інші перебувають у процесі сталого розвитку, з кожним роком з'являються нові, більш складні та досконалі технології, прилади і машини. З розвитком техніки постійно збільшується використання полімерних матеріалів (пластмас) у різних конструкціях, де вони поступово витісняють метали та інші традиційні матеріали. Використання пластмас дозволяє, як правило, знизити вагу конструкції, покращити її техніко-економічні параметри, зменшити собівартість та трудомісткість виготовлення. Значно підвищити експлуатаційні параметри виробів із пластмас у багатьох випадках дозволяє використання композиційних полімерних матеріалів, які складаються з полімерної матриці та армуючих елементів у вигляді мінеральних волокон або тканого полотна.

У минулому традиційно вважали, що пластмаси відносяться до конструкційних матеріалів з низьким рівнем механічної та теплової міцності. З іншого боку, сучасні технічні вироби розробляють для тривалої роботи у все більш екстремальних умовах – у відкритому космосі, з великими швидкостями пересування у повітрі та на землі, в контакті з нагрітими агресивними середовищами тощо. Тому вже багато років науковці розробляють високотехнологічні і, в першу чергу, термостійкі, полімерні матеріали на заміну таких жаростійких матеріалів, як тугоплавкі метали та їх сплави, кераміка, природні мінеральні сполуки. В залежності від своєї хімічної будови полімери, в тому числі високотехнологічні, поділяють на термореактивні (які не здатні до плавлення) та термопластичні. Застосування у різних галузях високотехнологічних термопластичних полімерів розвивається найбільш інтенсивно, оскільки для виготовлення конструкцій або окремих деталей в цьому випадку можливо використання різноманітних способів їх з'єднання і, в першу чергу, зварювання.

В останні роки провідними світовими компаніями освоєно промислове виробництво широкого асортименту нових високотехнологічних полімерів, термостійкість яких забезпечується особливостями їх хімічної будови. Це карбоцикличні полімери (поліфенілени, поліарилени) та гетероциклічні полімери (полігетероарилени) з робочими температурами до 300-350 ^{o}C. Найбільше практичне застосування в аерокосмічній промисловості, машинобудуванні, медичних виробах та інших галузях знайшли такі види високотехнологічних термопластичних полімерів – полісульфон (PS), поліфеніленоксид (PPO), поліфеніленсульфід (PPS), поліетеретеркетон (PEEK), поліетерімід (PEI). За даними зарубіжних експертів впровадження цих нових полімерних матеріалів дозволяє суттєво знизити собівартість продукції, а деякі елементи сучасних конструкцій можливо виготовляти тільки з цих матеріалів або композитів на їх основі.

За кордоном (США, Японія, країни Європейського союзу), зважаючи на стратегічне значення нових високотехнологічних полімерних матеріалів, проводять інтенсивні роботи з розробки технологій їх зварювання. В зарубіжних наукових публікаціях описано застосування декількох способів для зварювання цих матеріалів, найбільш ефективними серед яких визнано зварювання нагрітим інструментом (теплове), ультразвукове та зварювання закладним елементом (терморезисторне). В Україні, за даними пошукової роботи, практичне застосування нових високотехнологічних полімерних матеріалів досить обмежено, роботи з розробки технологій зварювання цих матеріалів не проводяться. В той же час, Україна є однією з небагатьох країн світу з власною авіаційною та космічною промисловістю, де технічний прогрес без впровадження нових полімерних матеріалів неможливий. Розробка сучасних вітчизняних технологій зварювання високотехнологічних полімерів є актуальною економічною та соціальною задачею.

Слід зазначити, що окрім поліариленових термопластичних полімерів, розроблені та знаходять різноманітне практичне застосування нові високотехнологічні матеріали на базі традиційних полімерів. Це нові

поліолефінові термопласти - термостійкий поліетилен (PE-RT), поліпропілен типу PPRC, поліетилен з надвисокою молекулярною масою (UHMWPE), а також термопласти на основі фторполімерів, зокрема етилентетрафторетилен (ETFE). Завдяки високій хімічній та тепловій стійкості, ці матеріали можуть ефективно використовуватися в хімічній, медичній галузях промисловості, на будівництві для заміни деталей та конструкцій, які раніше виготовлялися із дорогих типів сталі, титанових сплавів та скла. Основним способом з’єднання деталей з термостійких поліолефінів та фторполімерів є теплове зварювання, а розробка відповідних вітчизняних технологій та обладнання на заміну імпортним є в даний час надзвичайно актуальним.

Розробка вказаних технологій зварювання високотехнологічних полімерів потребує вивчення для кожного матеріалу і способу зварювання впливу основних параметрів технологічних процесів на морфологію та міцність їх зварних швів. При цьому зменшити об’єм технологічних досліджень дозволяє використання математичного моделювання термомеханічних процесів, які реалізуються в зоні з'єднання при ультразвуковому, тепловому та терморезисторному зварюванні високотехнологічних полімерів. Для формулювання початкових умов математичних моделей, розрахунку технологічних параметрів зварювання необхідно визначення основних теплофізичних характеристик високотехнологічних полімерів, чому присвячена перша частина книги. З іншого боку, в основу другої частини книги покладено досягнення та багаторічний досвід науковців відділу «Зварювання пластмас» Інституту електрозварювання ім.Є.О.Патона НАН України у дослідженнях та розробці технологічних процесів зварювання полімерів та композитів на їх основі, моделюванні фізичних процесів в зоні зварювання, а також у створенні та впровадженні у виробництво відповідного зварювального обладнання.

Дана монографія є перевиданням книги «Зварювання термостійких пластмас» зі змінами та доповненнями, однак у зв’язку з наявністю в ній опису та результатів розробок в області зварювання, науково-технічних

досліджень та промислово-виробничих випробувань зварних з'єднань ряду високотехнологічних пластмас (у більшості випадків ПКМ), які знаходяться на умовній межі з інженерними пластмасами та за своїми характеристиками не відносяться до термостійких полімерних матеріалів, авторами було вирішено внести зміни й у назву видання.

Автори висловлюють подяку співробітникам відділу «Зварювання пластмас» Інституту електрозварювання ім.Є.О.Патона НАН України д.ф.-м.н. Сенченкову І.К., к.ф.-м.н. Демченко В.Л., к.т.н. Шадріну А.О., к.т.н. Литвиненко Ю.В., Гальчуну А.М., Кондратенко В.Ю., Аністратенко В.В., Дяченко С.М., Менжерес М.Г., Карповій С.В., Ковальчуку М.О., Коліснику Р.В. та Скоку О.Г. за плідну працю та вагомий внесок у підготовку цієї монографії.

Частина досліджень, результати яких представлені у монографії, були проведені спільно з викладачами та науковцями кафедри експериментальної та прикладної фізики Національного педагогічного університету ім. М.П.Драгоманова, Зварювального факультету НТУУ «КПІ», Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України та Центру теплофізичних досліджень та аналізу полімерних, композитних та біоматеріалів НАН України.

Автори