

## ВІДЗИВ

офіційного опонента д.т.н., проф. Квасницького В.В.  
на дисертаційну роботу **Юрженка Максима Володимировича**  
**«Наукові основи та технології зварювання інженерних і**  
**високотехнологічних пластмас».**

представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук  
за спеціальністю 05.03.06 - Зварювання та спорідненні процеси і технології

Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел з 261 найменувань. Загальний обсяг дисертації складає 322 сторінки машинописного тексту, включаючи 199 рисунки, 21 таблицю, список літератури на 26 сторінках та 5 додатків.

**Актуальність обраної теми дисертації.** Сучасний рівень розвитку машинобудування, хімічної, аерокосмічної, суднобудівної, харчової промисловості та медицини вимагає зменшення метало- та енергоємності виробів, що сприяє стрімкому поширенню у виробництві пластмас, зокрема на основі термопластичних полімерів. Створення багатовимірних виробів складного профілю з окремих виготовлених методом литва під тиском простих елементів пов'язане з розвитком технологій формування нероз'ємних з'єднань пластмас. Для з'єднання інженерних і високотехнологічних пластмас успішно застосовують способи зварювання термомеханічного класу, зокрема зварювання нагрітим інструментом та закладним нагрівальним елементом. Наявні особливості структури та властивостей інженерних і високотехнологічних пластмас, геометричні розміри та форма деталей, вимоги до експлуатаційних властивостей зварних з'єднань не завжди дозволяють застосовувати існуючі технології з'єднання пластмас з термопластичних полімерів, а результати останніх досліджень свідчать, що в зварному шві формуються структури з властивостями, які не завжди можна пояснити за допомогою існуючих традиційних теорій, зокрема підвищення механічної міцності зварного з'єднання порівняно з основним полімерним матеріалом. Тому дослідження, що спрямовані на виявлення та встановлення закономірностей впливу технологічних параметрів та умов ведення процесу зварювання, механізмів формування та особливостей утворення зварних з'єднань пластмас, вдосконалення технологічних схем зварювання та створення на їх основі вітчизняного обладнання для зварювання інженерних і високотехнологічних пластмас, в тому числі і армованих волокнами, з метою підвищення надійності конструкцій та виробів є **актуальними**, а робота своєчасною.

Про актуальність теми роботи свідчить також її зв'язок з темами фундаментальних та прикладних досліджень, що виконані в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України в рамках цільових наукових програм НАН України, конкурсних комплексних програм НАН України та міжнародних проектів, зокрема: «Дослідження зварюваності, розробка технологій та устаткування для зварювання нових композиційних матеріалів на основі термостійких поліаріленових та поліолефінових термопластів» (№ держреєстрації 0113U000349), «Розробка технологій зварювання труб, листів та

плівок із полімерних композиційних матеріалів, створення нового зварювального обладнання з використанням сучасних способів керування та дозування енергії» (№ держреєстрації 0112U000629), «Розвиток фундаментальних основ та розробка перспективних технологій одношарового та багатошарового наплавлення полімерних та композиційних матеріалів» (№ держреєстрації 0117U001193), «Дослідження механізмів формування, структури та теплофізичних властивостей зварних з'єднань термопластичних полімерних і композитних матеріалів при використанні джерел нагріву різної фізичної природи» (№ держреєстрації 0115U006707), «Розробка проектної і конструкторської документації з виготовленням дослідного зразка нагрівального інструменту інноваційної установки для зварювання нагрітим інструментом встик полімерних труб зовнішнім діаметром до 250 мм» (№ держреєстрації 0115U005262), «Створення дослідно-виробничого зразка інноваційної зварювальної установки для будівництва та реконструкції трубопроводів з пластмас» (№ держреєстрації 0116U006123), «Розробка методів визначення безпечного терміну експлуатації і технології ремонту поліетиленових трубопроводів» (№ держреєстрації 0116U004220), «Дослідження та визначення напрямків застосування методів променевих технологій (лазерного випромінювання) для зварювання полімерних та композитних матеріалів» (№ держреєстрації 0115U003134), «Розробка інноваційного методу і технології зварювання полімерних і композитних матеріалів під дією постійного магнітного поля» (№ держреєстрації 0115U005227), «Розробка технологічного методу теплового зварювання важкозварюваних полімерних матеріалів під дією сильного постійного магнітного поля» (№ держреєстрації 0117U001194), міжнародного польсько-українського проекту «Welding of biopolymers and investigation of biodegradation of their welded joints» в рамках спільної програми міжнародного співробітництва ПАН-НАН України, міжнародної польсько-української науково-дослідної лабораторії «Formation and characterization of advanced polymers and polymer composites - ADPOLCOM» та міжнародної наукової мережі Central and East European Polymer Network (CEEPN).

У виконанні названих робіт дисертант приймав безпосередню участь у якості керівника або відповідального виконавця.

**Метою роботи** є встановлення загальних закономірностей впливу на структуру та властивості зварних з'єднань пластмас параметрів та режимів зварювання, вивчення особливостей термомеханічних процесів, які протікають в зоні зварювання пластмас за допомогою методів математичного моделювання та порівняльних експериментальних досліджень, розробка на основі нових узагальнених знань ефективних технологій та обладнання.

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовані мета й основні завдання досліджень, визначені наукова новизна й практичне значення отриманих результатів, наведені відомості про їх апробацію, відзначений особистий внесок автора та представлений перелік публікацій по темі дисертаційної роботи.

У першому розділі автор ретельно проаналізував літературні дані щодо класифікації полімерних матеріалів, особливостей їх складу, властивостей та

застосування в різних галузях промисловості, існуючих теорій та уявлень про механізми формування зварних з'єднань пластмас на основі термопластичних полімерів і показав, що застосування найбільш розповсюдженої дифузійно-реологічної теорії зварювання полімерних матеріалів та її похідних не завжди в повній мірі дозволяє пояснити комплекс складних явищ, що виникають при з'єднанні інженерних і високотехнологічних пластмас, особливості формування структури та властивостей зварних з'єднань.

На основі проведеного аналізу літературних джерел автором встановлено, що найбільш поширеними способами введення тепла при зварюванні пластмас є застосування нагрітого інструменту та закладних нагрівальних елементів.

За результатами проведеного аналізу автор обґрунтував мету та визначив задачі роботи.

У розділі 2 наведені склад та характеристики основних матеріалів (ОМ) для досліджень, методики підготовки зразків та методів досліджень, що застосовувалися в роботі, технічні характеристики та опис роботи зварювального обладнання для з'єднання інженерних та високотехнологічних пластмас. В якості основних матеріалів для досліджень обрані інженерні полімерні матеріали у вигляді труб та листів, зокрема поліетилену технічних марок ПЕ 80 та ПЕ 100 зі значеннями MRS 8,0 МПа та 10,0 МПа, відповідно, поліпропілен PP-R (ПП 80 тип 3) та полімерні композитні та композиційні матеріали (ПКМ) на його основі, зокрема наповнений рубленим скловолокном PP-R-GF. При дослідженнях зварних з'єднань високотехнологічних пластмас використовували полімерні матеріали торгової марки Zedex ZX – 324 на основі поліетеретеркетону (ПЕЕК) та ZX – 410 на основі поліетеріміду (ПЕІ) з межею міцності при розтягу 110 МПа та 101 МПа, відповідно.

В розділі наведені методики математичного моделювання методом скінченних елементів теплових та термодформаційних процесів при зварюванні стикових та напусткових з'єднань з інженерних і високотехнологічних полімерних матеріалів, підготовки зразків для структурних, термічних, теплофізичних та термомеханічних досліджень, механічних та гідравлічних випробувань.

Теоретичні дослідження термомеханічних процесів при зварюванні та формування напружено-деформованого стану зварних з'єднань полімерів виконані із застосуванням математичного моделювання методом скінченних елементів. Створена модель враховує поведінку пружно-в'язкого тіла (модель в'язко-пружності Максвелла). Для проведення розрахунків визначені необхідні теплофізичні та термомеханічні властивості обраних полімерних матеріалів.

Морфологічну будову полімерів та їх зварних з'єднань досліджували оптичною мікроскопією, структуру та її неоднорідність на нанорозмірному рівні – методами ширококутового розсіювання рентгенівських променів (ШКРРП) у різних напрямках з урахуванням текстури матеріалів та малокутового розсіювання рентгенівських променів (МКРРП) відповідно, термічну стабільність і термоокислювальну деструкцію – методом термогравіметричного аналізу (ТГА). Дослідження теплових процесів проводили методом диференціальної сканувальної калориметрії (ДСК), визначення теплопровідності пластмас здійснювали на універсальному динамічному калориметрі, особливості

термомеханічної поведінки матеріалів вивчали методами термомеханічного аналізу (ТМА), експлуатаційні характеристики пластмас та їх зварних з'єднань визначали шляхом механічних випробувань на атестованому обладнанні із застосуванням стандартних методик.

Оскільки сьогодні не існує спеціально розроблених методик визначення механічної міцності виконаних зварюванням закладним нагрівальним елементом з'єднань внапуск полімерних листів, то для проведення таких випробувань автор використав вимоги для клеєвих з'єднань, зокрема стандарт ASTM D1002 – 10, що був розроблений для визначення міцності на зсув LSS (lap shear strength) для клеєних металічних пластин, та нормативи для визначення міцності клеєвих з'єднань на відрив. Механічні випробування зварних зразків здійснювали відповідно до вимог діючих стандартів на атестованому обладнанні. Експериментальні дослідження та аналіз розподілу теплових полів у процесі зварювання здійснювали за допомогою тепловізора СЕМ DT-980, а вимірювання температури у контрольних точках зразків проводили за допомогою термопар.

В якості закладних нагрівальних елементів автором рекомендовано використовувати дротяні сітки з високолегованої сталі марки 12Х18Н9Т полотняного плетіння з отворами квадратної форми. Тому в роботі з метою визначення технологічних особливостей застосування для зварювання сіток різних типорозмірів виконані розрахунки величини значень загального електричного опору закладних елементів певного розміру.

**У розділі 3** наведені результати математичного моделювання термомеханічних процесів при зварюванні інженерних та високотехнологічних пластмас при введенні тепла в зону з'єднання шляхом короткотривалого прямого нагрівання інструментом, довготривалого непрямого нагрівання виробів та зварювання із застосуванням закладного елемента, що нагрівається.

Автором визначені додаткові характеристики матеріалів, що з'єднуються, необхідні для проведення розрахунків, зокрема температури та ентальпії склування, плавлення та початку термоокислювальної деструкції, коефіцієнти термічного розширення, теплємність та теплопровідність інженерних (ПЕ 80, ПЕ 100, ПП РР-Р та РР-Р-GF) та високотехнологічних пластмас (ПЕЕК та ПЕІ).

За результатами математичного моделювання автором встановлена кінетика розподілу температур та напружень в полімерних матеріалах у процесі розігрівання та охолодження заготовок, що зварюються, для різних моментів часу, розрахований рівень залишкових деформацій.

Аналіз результатів математичного моделювання теплових процесів дозволяє визначити час вирівнювання температури до заданого рівня при відомій товщині виробів, зокрема і багатошарових, що є вкрай важливим при визначенні часових та температурних умов нагріву поверхонь з'єднання виробів різних типорозмірів.

Автором встановлено, що при зварюванні встик труб з різнотипних поліетиленів прямим нагріванням нагрітим інструментом температура приповерхневого шару поліетилену ПЕ100 вища, ніж ПЕ80, що пов'язано з підвищеною теплопровідністю останнього. Для забезпечення стабільного якісного формування зварних з'єднань таких матеріалів насичене значення температури нагрівального інструменту має бути не меншим за 208 °С, а при



непрямому нагріванні трубних заготовок з композитного тришарового поліпропілену з товщиною стінки 8,6 мм із застосуванням нагрітого інструмента у вигляді безінерційного кільцевого нагрівача мінімальна тривалість термічного циклу зварювання складає 15 хвилин при температурі нагрівача 240 °С.

За результатами аналізу розподілу температурних полів при зварюванні закладним нагрівальним елементом внапуск полімерних листів з високотехнологічного ПКМ на основі поліетеретеркетону та поліетеріміду встановлено, що на початковій стадії процесу нагріву температура вздовж поверхні закладного нагрівального елемента розподілена досить рівномірно, а на заключній стадії нагріву нерівномірність розподілу температур зростає внаслідок збільшення відводу тепла по краях закладного елемента. Результати моделювання полів залишкових пластичних деформацій свідчать, що найбільший рівень пластичних деформацій спостерігається на краях з'єднання. При механічних випробуваннях руйнування зварних з'єднань починалося саме в цій зоні, що пов'язано з недостатньою температурою для формування якісного з'єднання на цих ділянках та наявністю концентраторів напружень у вигляді переходу від ОМ до зварного з'єднання.

Результати визначення деформаційної поведінки високотехнологічних полімерних композитних матеріалів ZX-410 на основі поліетеріміду та ZX-324 та основі поліетеретеркетону за різних умов навантаження та теплофізичних досліджень показують наявність стрибків теплоємності матеріалів поблизу температур склування та в межах температур плавлення кристалічної фази, що відповідає відновленню ентальпії при розсклуванні аморфної фази та свідчить про наявність міжфазного зв'язку в таких полімерах та кристалітів складної будови.

**В розділі 4** проведені дослідження по визначенню особливостей структури, структурних перетворень та змін властивостей зварних з'єднань при зварюванні з короткотривалим прямим нагріванням поліетиленів технічних марок як в однорідному, так і різнорідному сполученні, та зроблене припущення, що в процесі зварювання поліетиленів ПЕ 80 та ПЕ 100 у структурі зварного з'єднання формуються області з підвищеними термічною стабільністю та щільністю пакування макромолекул. Структурні дослідження відповідних чистих поліетиленів та їх зварних з'єднань методами диференціальної сканувальної калориметрії та ширококутового розсіювання рентгенівських променів підтвердили висунуте автором припущення. Матеріал зварних з'єднань характеризується підвищеною температурою плавлення та сумарною ентальпією плавлення у порівнянні з чистими поліетиленами, що свідчить про підвищену термічну стабільність кристалічної фази зварного з'єднання. Встановлено, що ступінь кристалічності зварного з'єднання також найвищий.

Автором встановлено, що в зварних з'єднаннях як однотипних, так і різних поліетиленів утворюється структура, яка відрізняється від структури вихідних поліетиленів, та спостерігається зростання розмірів кристалітів. Порівняння величини діапазону гетерогенності структури показало, що відносний рівень гетерогенності структури у зварному з'єднанні ПЕ 80/ПЕ 100 займає проміжне значення між окремими полімерами ПЕ 80 і ПЕ 100, та є меншим за відповідні значення для зварних з'єднань однотипних поліетиленів.

З метою вивчення довготривалих релаксаційних процесів у зварному з'єднанні через 1 рік після зварювання були проведені повторні структурні та теплофізичні дослідження зварних з'єднань ПЕ 80/ПЕ 100. Аналіз ширококутових рентгенівських дифрактограм зварного з'єднання, що досліджувалось безпосередньо після зварювання та через рік, показав, що з часом відбувається релаксація не тільки аморфної фази, але й кристалічної структури зварного з'єднання, що супроводжується утворенням нових фаз та кристалічних модифікацій полімерів. З часом зменшується термостійкість матеріалу зварного шва, що автор пов'язує з процесами структурної релаксації, які розвивається в часі на ділянці текстурованого під впливом процесу зварювання полімеру зварного шва.

Автором проведені дослідження по впливу магнітних полів на формування структури та експлуатаційних властивостей зварних з'єднань технічних поліетиленів. За результатами термомеханічного та термогравіметричного аналізу, механічних випробувань встановлено, що при зварюванні поліетилену дія поперечного до площини зварювання магнітного поля сприяє зростанню характеристик міцності зварних з'єднань на  $\sim 2-3$  МПа, термостійкості до  $10$  °С та термостабільності на  $\sim 10$  °С, а дія повздовжнього до площини зварювання магнітного поля призводить до їх зменшення у порівнянні з характерними для зварних швів, що були сформовані за відсутності магнітного поля, значеннями.

При зварюванні довготривалим непрямим нагріванням тришарових композитних поліпропіленових труб встановлено, що «класичне» стикове зварювання не забезпечує рівномірності зварного шва ОМ, оскільки під впливом зусилля осадження відбувається витіснення матеріалу наповнювача в площину зварного шва, і в подальшому він не тільки не відіграє ролі армуючого елемента, а навпаки утворює зону багаточисельних дефектів у шві. Рекомендовано здійснювати зварювання нагрітим інструментом встик тришарових композитних труб з поліпропілену з внутрішнім наповненим рубленим скловолокном шаром із застосуванням запропонованого автором обладнання на режимах, при яких не відбувається інтенсивна течія розплаву полімеру між шарами, а процес зварювання відбувається за рахунок тиску, що виникає внаслідок теплового розширення заготовок. В цьому випадку на ділянці зварного з'єднання залишається незруйнованою пошарова структура стінки труби, яка ідентична структурі основного матеріалу. Запропоновано в якості критерію завершеності процесу прогрівання стінки труби застосовувати значення температури на ділянці, що розташована на внутрішній поверхні труби. Руйнування зварних з'єднань з незмінною пошаровою структурою відбувається по основному матеріалу.

За результатами технологічних досліджень встановлено, що формування якісних зварних з'єднань високотехнологічних пластмас забезпечується застосуванням «м'яких» температурних режимів, що виключає можливість утворення перегрітого полімерного матеріалу біля зовнішніх поверхонь торців труб. Враховуючи високу в'язкість розплавів високотехнологічних полімерів, рекомендовано збільшення тиску осадження до  $0,25-0,3$  МПа. На основі результатів технологічних досліджень розроблені рекомендації зі зварювання

труб з високотехнологічних пластмас нагрітим інструментом встик, при дотриманні яких міцність зварних швів складає 80-90 % від міцності ОМ.

На основі проведених комплексних теоретичних та експериментальних досліджень автором визначені рекомендовані режими та умови зварювання, розроблені технологічні рекомендації для зварювання нагрітим інструментом встик труб з високотехнологічних пластмас.

На основі всебічного аналізу літературних джерел та результатів власних досліджень дисертантом запропонована нова концепція механізму формування зварних з'єднань полімерних матеріалів при короткотривалому контакті та термічному впливі. Згідно неї формування особливої структури на ділянці зварного з'єднання пов'язане з сегментальною рухливістю макромолекул полімерів та зміною їх конформацій під дією теплового та силового полів, що виникають при зварюванні.

Результати досліджень поверхні полімерів інфрачервоною спектроскопією підтверджують запропоновану концепцію, яка дозволяє пояснити дію постійного магнітного поля в процесі зварювання, коли магнітне поле або сприяє, або заважає обертальному руху магнітоанізотропних сегментів макромолекул полімерів, а також релаксацію внутрішніх напружень в кристалах перехідного шару, які виникають при дії силового поля в процесі зварювання. Основні припущення концепції лягли в основу технологій та обладнання для зварювання виробів з пластмас, зокрема полімерних труб та зварювання важкозварюваних полімерних матеріалів.

**У розділі 5**, запропоновані нові технологічні підходи та обладнання для зварювання виробів з інженерних та високотехнологічних пластмас із застосуванням закладних елементів, що нагріваються. За результатами механічних випробувань зварних з'єднань встановлений вплив параметрів металевих сіток закладних елементів на міцність зварних з'єднань інженерних та високотехнологічних полімерів. Показано, що для всіх типорозмірів закладних елементів зварні з'єднання руйнуються по зварному шву, а підвищення експлуатаційних характеристик з'єднань може бути досягнене шляхом збільшення площі зварних швів при зварюванні внапуск. Враховуючи те, що виконанні цим способом зварювання з'єднання можуть мати складну просторову форму та велику площу, в якості енергетичного параметра процесу запропоновано застосовувати приведену до площі зварного з'єднання питому електричну потужність.

За результатами теоретичних та експериментальних досліджень автором розроблені технологічні рекомендації зі зварювання закладним нагрівальним елементом високотехнологічних ПКМ на основі ПЕІ та ПЕЕК, що враховують товщину полімерних деталей, що з'єднуються. Згідно розроблених технологічних рекомендацій обирають типорозмір сітчастого закладного нагрівального елемента, питому електричну потужність джерела тепла та час зварювання.

Технологічні рекомендації апробовані на ряді інженерних і високотехнологічних пластмас, зокрема при виготовленні виробів складної геометричної форми поверхні з'єднання, а також у виробничих умовах ДП «КБ «Антонов» та ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля». Отримані в промислових

умовах всі таврові зварні шви мали міцність не менше за 85% від ОМ, а всі напускні зварні шви були рівноміцними ОМ.

Слід додати, що при наведеному вище огляді змісту розділів дисертації коротко відзначені ті результати, які є найбільш вагомими.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації**

У дисертаційній роботі встановлені закономірності впливу виду полімерного матеріалу, його структурної будови, параметрів режиму та умов ведення процесу зварювання нагрітим інструментом та закладним нагрівальним елементом інженерних і високотехнологічних пластмас на формування структури та властивостей зварних з'єднань з урахуванням теплових та термодформаційних процесів, визначений зв'язок між структурною будовою та властивостями зварних з'єднань пластмас та на основі сформульованих автором узагальнених наукових положень запропоновані новітні технологічні підходи до отримання високоякісних зварних з'єднань пластмас та зварювальне обладнання.

На основі проведених комплексних досліджень структури і властивостей зварних з'єднань поліетиленів автором встановлено, що при короткотривалому зварюванні в зоні зварного шва формується специфічна структура з підвищеними на 10-12 % ступенем кристалічності орієнтованих в площині зварювання сегментів макромолекул кристалічної фази, до 8 нм діапазоном гетерогенності, до 10 % розмірами та впорядкованістю кристалітів. Така специфічна структура характеризується відмінними від ОМ теплофізичними, термомеханічними та експлуатаційними властивостями.

За результатами досліджень особливостей фазових перетворень, що протікають з часом у полімерному матеріалі виявлена релаксація не тільки аморфної, але й кристалічної фази полімеру зварного з'єднання, яка супроводжується зміною кристалітів від модифікації  $\alpha$ -форми до змішаної  $\alpha\beta$ -форми, що відбувається з суттєвим (до 50%) зменшенням розмірів кристалітів та релаксацією характеристик полімеру зварного шва з їх наближенням до характерних для індивідуальних поліетиленів значень.

На основі аналізу результатів експериментальних досліджень по визначенню впливу постійного магнітного поля на структуроутворення та властивості отриманих зварних з'єднань пластмас встановлено, що ведення процесу зварювання під дією поперечного до площини зварювання магнітного поля забезпечує підвищення до ~ 10-12% характеристик міцності зварних з'єднань, а за наявності повздовжнього до площини зварювання магнітного поля ці характеристики зменшуються до 95% від рівня отриманих без впливу магнітного поля зварних з'єднань, що пов'язано зі зміною під впливом постійного магнітного поля просторової орієнтації утворених при плавленні кристалітів полімерів магнітоанізотропних макромолекулярних комплексів підвищеної густини, які сприяють або протидіють силовому полю під час зварювання. За наявності магнітного поля при переході полімеру із розплавленого до твердого стану зберігається орієнтаційна анізотропія структури макромолекул полімеру зварного шва.



На основі узагальнених результатів фундаментальних досліджень запропонована нова наукова концепція щодо механізму зварювання пластмас та природи їх зварних з'єднань, положення якої описують процес зварювання як формування перехідного шару сегментів орієнтованих макромолекул полімерів двох поверхонь, які знаходяться в розплавленому стані, під дією теплової енергії та силового поля. При охолодженні розплаву по обидва боки від площини зварювання відбувається їх кристалізація та формування спільних кристалітів в об'ємі зварного шва.

Шляхом проведення комплексних теоретичних досліджень із застосуванням математичного моделювання методом скінченних елементів для аналізу теплових та термодформаційних процесів, що протікають при формуванні зварних з'єднань полімерних матеріалів, та порівняння результатів математичного моделювання з даними експериментальних досліджень доведена можливість застосування математичного моделювання для прогнозування розподілу температур у полімерних матеріалах та визначення напружено-деформованого стану, що утворюється при формуванні зварних з'єднань з інженерних та високотехнологічних пластмас. При цьому встановлено, що при зварюванні спостерігається нерівномірний розподіл тепла в об'ємі полімерних матеріалів. Це призводить до розвитку пластичних деформацій, максимальні значення яких при зварюванні нагрітим інструментом спостерігаються на підгратовій ділянці зварного шва, а при нагріві закладним елементом на ділянках виходу закладного елемента зі шва.

Для обґрунтування встановлених закономірностей автором виконані чисельні теоретичні та експериментальні дослідження. Теоретичні дослідження виконані із застосуванням основ теорії в'язко-пружності Максвелла, аналітичних та розрахункових методів із застосуванням сучасних розрахункових алгоритмів, що засновані на послідовному простеженні кінетики розвитку температурних полів, напружень та деформацій у часі в період дії термічного циклу зварювання.

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується результатами чисельних теоретичних досліджень та їх зіставленням з отриманими експериментальним шляхом за допомогою методів оптичної мікроскопії, ширококутового та малокутового розсіювання рентгенівських променів, термогравіметричного аналізу, диференціальної сканувальної калориметрії, термомеханічного аналізу даними. Механічні випробування зразків полімерів та зварних з'єднань проводили на атестованому обладнанні із застосуванням стандартизованих методик. Отримані експериментальні дані обробляли з використанням статистичних методів обробки результатів досліджень.

Отримані автором теоретичні закономірності підтверджені чисельними дослідженнями реальних зразків. Вони не мають протиріч з існуючими теоретичними уявленнями та накопиченим досвідом про природу формування зварних з'єднань полімерних матеріалів. Наукові положення, висновки і рекомендації узгоджуються з існуючими концепціями. Їх достатня обґрунтованість підтверджується визнанням на відомих міжнародних конференціях з матеріалознавства полімерів, нанотехнологій та наноматеріалів,

хімії, механіки та фізико-хімії конденсованого стану речовини, зварювання і споріднених технологій, нових матеріалів і технологій та ін.

**Достовірність одержаних результатів.** Про достовірність результатів роботи свідчать використання сучасних методів і засобів досліджень, загальноприйнятих методик проведення досліджень полімерних матеріалів та їх з'єднань, які рекомендовані міжнародними та вітчизняними стандартами.

Достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій роботи підтверджені результатами зварювання та чисельними випробуваннями реальних зразків зварних з'єднань з термопластичних полімерів, промислового застосування запропонованих підходів, розроблених технологій та обладнання.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в теоретичному узагальненні та розширенні уявлень про перебіг процесів структуроутворення та формування зварних з'єднань пластмас з урахуванням виду полімерного матеріалу, його структурної будови, параметрів режиму та умов ведення процесу зварювання нагрітим інструментом та закладним нагрівальним елементом електроопором, а також теплових та термодформаційних процесів, вивченні структурної організації зварних з'єднань пластмас та встановленні взаємозв'язку між структурною будовою та властивостями зварних з'єднань пластмас, формулюванні узагальнених наукових положень та створенні на їх основі нових технологічних підходів до формування зварних з'єднань пластмас з високими характеристиками якості.

Автором вперше встановлено, що в процесі короткотривалого зварювання поліетиленів за традиційними методиками під дією термічного циклу зварювання в зварному шві формується особлива структура з підвищеними ступенем кристалічності орієнтованих в площині зварювання сегментів макромолекул кристалічної фази, діапазоном гетерогенності, розмірами та впорядкованістю кристалітів, що володіє специфічними відмінними від основного матеріалу теплофізичними, термомеханічними та експлуатаційними властивостями.

Вперше досліджені особливості фазових перетворень, що відбуваються у полімерному матеріалі зварного з'єднання з часом, і встановлено, що у полімерному матеріалі зварного з'єднання з плином часу відбувається релаксація не лише аморфної, а і кристалічної фази, що супроводжується зміною модифікації кристалітів з одночасним суттєвим зменшенням їх розмірів та релаксацією характеристик полімеру зварного шва.

Автором вперше встановлений характер впливу постійного магнітного поля при зварюванні пластмас на структуру і властивості їх зварних з'єднань. Доведено, що, як і при дифузійному зварюванні скла, при зварюванні полімерних матеріалів під дією поперечного до площини зварювання магнітного поля відбувається зростання міцності зварних з'єднань до ~ 10-12%, а під дією повздовжнього магнітного поля міцність зварних з'єднань зменшується на 5% у порівнянні з отриманими без впливу зовнішнього постійного магнітного поля з'єднаннями.

На основі узагальнення результатів фундаментальних та експериментальних досліджень автором запропонована нова наукова концепція щодо механізму формування зварних з'єднань пластмас, згідно якої формування структури зварного з'єднання відбувається з розплаву перехідного шару сегментів орієнтованих макромолекул полімерів поверхонь, що з'єднуються під дією теплової енергії та силового поля з наступною кристалізацією при охолодженні та формуванням спільних кристалітів в об'ємі зварного шва.

Математичним моделюванням методом скінченних елементів доведена можливість прогнозування розподілу температур у полімерних матеріалах та визначення напружено-деформованого стану, що утворюється при формуванні зварних з'єднань з інженерних та високотехнологічних пластмас.

Положення наукової новизни сформульовані зрозуміло і лаконічно, з розкриттям суті.

**Практичне значення роботи.** На основі встановлених автором закономірностей процесів структуроутворення та формування зварних з'єднань пластмас, сформульованих узагальнених наукових положень створені нові технологічні підходи до зварювання інженерних та високотехнологічних пластмас з використанням нагріву ділянки зварювання нагрітим інструментом та закладним нагрівальним елементом електроопором та запропоновані технологічні рекомендації, виготовлене нове зварювальне обладнання, що забезпечують отримання зварних з'єднань пластмас з високими характеристиками якості.

Розроблена технологія та створена установка новітнього типу для зварювання полімерних труб забезпечують формування якісних зварних з'єднань за спрощеною технологією без попередньої механічної підготовки до зварювання торців труб та без утворення внутрішнього грату.

Технічні рекомендації та обладнання для зварювання полімерних матеріалів закладним нагрівальним елементом електроопором пройшли успішну апробацію на підприємствах України аерокосмічної галузі та визнані перспективними до широкомасштабного впровадження.

Отримані за результатами експериментальних досліджень характеристики фізичних та механічних властивостей досліджених матеріалів, їх залежності від температури можуть слугувати довідковим матеріалом для широкого кола фахівців інших галузей науки.

**Впровадження результатів.** На основі отриманих дисертантом результатів теоретичних та експериментальних досліджень на підприємствах України реалізовані технології зварювання інженерних та високотехнологічних пластмас з нагрівом ділянки зварювання нагрітим інструментом та закладним нагрівальним елементом електроопором.

Зокрема, запропонована технологія та створена установка новітнього типу для зварювання полімерних труб за спрощеною технологією впроваджені у виробництво на ТОВ «ТД «Євротрубпласт», що підтверджується наявною в додатку 3 роботи ліцензійною угодою.

Технічні рекомендації та обладнання для зварювання полімерних матеріалів закладним нагрівальним елементом електроопором пройшли успішну апробацію на ДП «КБ «Антонов» та ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля» та визнані перспективними для широкомасштабного впровадження, що підтверджується відповідними актами апробації науково-технічної роботи, які наведені в додатках 4 та 5 дисертаційної роботи.

Розширення обсягів впровадження результатів досліджень має перспективу на інших підприємствах, що працюють у галузях авіаційної, космічної, суднобудівної, хімічної промисловості, нової техніки та ін.

**Повнота викладу основних результатів роботи в наукових фахових виданнях.** Основні результати досліджень дисертації опубліковані в 80 наукових роботах, які включають 5 монографій, 4 розділи монографій, 16 статей у наукових виданнях, які є в переліку ДАК України, як фахові, 11 опубліковані в іноземних спеціалізованих виданнях і виданнях України, що внесені до реєстру міжнародних наукометричних баз даних, 24 тезах та матеріалах наукових і науково-практичних конференцій, 1 патент України на винахід, 6 патентів України на корисну модель, 15 державних стандартів, введених в дію в Україні методом підтвердження та гармонізованих з Європейськими стандартами, 9 статей у галузевих та науково-популярних виданнях.

Результати роботи достатньо широко висвітлені публікаціями в різних виданнях, наприклад, «Advances in progressive thermoplastic and thermosetting polymers, perspectives and applications», «Notes in Mechanical Engineering. Advances in Thin Films, Nanostructured Materials, and Coatings», «Procedia Engineering», «Nanoscale Research Letters», «Macromolecular Symposia», «Вісник ЧДТУ», «Фізико-хімічна механіка матеріалів (Materials Science)», «Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології», «Автоматическая сварка», «Journal of Hydrocarbon Power Engineering», «Міжвузівський зб. наук. праць «Наукові нотатки», «Науковий вісник НЛТУ України», «Вісник ХНТУ», «Полімерний журнал», «Сварщик», тощо.

Результати досліджень, які були одержані при виконанні кандидатської дисертації «Електричні, термомеханічні та сорбційні властивості гібридних органо-неорганічних систем на основі уретанових олігомерів та силікатів» (2009 р.) у представленій докторській дисертації не використовуються.

**Висновки дисертації** відображають найважливіші наукові та практичні результати дисертації, в якій наведене теоретичне узагальнення і нове вирішення актуальної науково-технічної проблеми, що полягає у встановленні закономірностей та розширенні уявлень про перебіг процесів структуроутворення та формування зварних з'єднань пластмас нагрітим інструментом та закладним нагрівальним елементом під дією термічного циклу зварювання та термодформаційних процесів, встановленні взаємозв'язку між структурною будовою та властивостями зварних з'єднань пластмас та створенні нових технологічних підходів до формування зварних з'єднань пластмас з високими характеристиками якості.

Висновки сформульовано конкретно та логічно, відповідно до змісту дисертації.

**Зміст дисертації і автореферату ідентичний.** Автореферат дисертації достатньо повно висвітлює результати, що наведені в самій дисертації.

#### **Зауваження та коментарі до дисертації:**

1. Наведений перелік умовних позначень є не повним, в різних розділах роботи одні і ті самі фізичні величини мають різні позначення, застосовуються не загальноприйняті позначення, наприклад для температури –  $\theta$ , для компоненти діючих напружень –  $s_1$  (рис. 3.17), що ускладнює сприйняття наведених результатів досліджень.

2. В роботі наведені дані про певні фізичні характеристики матеріалів запозичені з літературних джерел та власних досліджень, які відрізняються за своєю величиною і в подальшому використовуються для математичного моделювання. Відсутність чітких посилань не дозволяє зрозуміти, які конкретно вихідні дані автор використовував для математичного моделювання теплових та термомодеформаційних процесів.

3. На рис. 2.22 наведені графіки зміни компонент величин діючих напружень, що були отримані розрахунковим шляхом, та параметрів процесу зварювання в часі. Бажано пояснити стрибок величини осьових напружень при стисканні зразків після технологічної паузи на величину, що перевищує тиск стиснення 0,2 МПа. Необхідно пояснити з яких міркувань обрано саме точку на середині товщини стінки труби для оцінки напруженого стану, що формується в процесі отримання зварного з'єднання.

4. Треба пояснити наведене на стор. 118 ствердження автора, що «Осьові напруження практично нульові», оскільки їх величина наприкінці процесу зварювання складає приблизно 0,6 МПа, а в процесі зварювання змінюється в межах приблизно від -0,8 до 0,6 МПа.

5. На стор. 124, без пояснень, автором вказано, що «Приймаємо величину електричної потужності закладного елемента, яка приведена до площі зварного з'єднання 23 Вт», тому необхідно пояснити яким чином визначена вказана величина.

6. Не зовсім зрозуміло яким чином зміни деформації в середній точці торця труби, які наведені на рис. 3.17, «...описують наявність грату...» (стор. 140).

7. Необхідно пояснити яким чином визначене значення похибки 5 % при встановленні часу вирівнювання температури (стор. 149).

8. Зі ствердженням автора «З рис. 3.31 видно, що розподіл теплового поля під час експериментального зварювання повністю відповідає розрахованій моделі», стор. 154, важко погодитись, оскільки на рис. 3.31 наведені лише максимальні значення температур та неможливо порівняти ці дані з розподілом температур по перетину з'єднання, що наведений на рис. 3.29 - 3.30. На рис. 3.32 наведена динаміка зміни полів пластичних деформацій під час зварювання і вони не відносяться до залишкових пластичних деформацій.



9. Необхідно пояснити висновок 7 висновків по розділу 3 в частині «З використанням тепловізора показано, що характер розповсюдження теплових полів, спрогнозований математично, абсолютно співпадає з експериментальним».

10. Дані наведені на рис. 4.29 є малоінформативними, оскільки автором наведена залежність часу прогрівання стінки труби на повну глибину лише від величини значення електричної напруги. В цьому випадку краще замість значення електричної напруги використовувати значення ефективної потужності або кількості введеного тепла.

11. На стор. 250 вказано, що «Міцність на зсув LSS зварних з'єднань суттєво менше межі плинності основного полімерного матеріалу, що пов'язано як з наявністю у шві самої металевої сітки, так і з характером зсувного навантаження». Не зрозуміло, як характер навантаження при таких дослідженнях впливає на міцність з'єднань. Треба пояснити, які характеристики геометричних розмірів валиків ґрату автор має на увазі, коли висуває вимогу, що «Розміри валиків ґрату не повинні перевищувати величини 30-40% від товщини деталей».

12. При зварюванні пластмас виділяються 3 стадії процесу з'єднання. Було б доцільно розглянути процеси, що відбуваються при утворенні фізичного контакту та активації поверхонь з'єднання досліджених матеріалів.

13. Робота має деякі неточності в застосуванні термінів та помилки, наприклад на стор. 6 «...релаксації теплофізичних та термомеханічних властивостей...»; на стор. 55 «...кільцеве напруження...»; на стор. 116 «...процесів повзучості і релаксації напруги...»; на стор. 137 «Щільність елементів сітки зростає за логарифмічним законом з віддаленням від умовної площини нагрівального інструменту...»; на стор. 140 «...розподілами напруги вздовж осі...»; на стор. 141-144 назва рис. 3.12-3.15 «Напружено-деформаційний стан...» є помилковою, оскільки представлені лише епюри та поля окремих компонент діючих напружень та деформацій; на стор. 152 для рис. 3.27 невдало обраний масштаб; на стор. 156 для рис. 3.32 невдало обрана шкала розподілу величин напружень суттєво ускладнює розуміння отриманих автором результатів; на стор. 198 «...летючих речовин...»; на стор. 248 «Попередні органолептичні випробовування показали, що ... міцність ... зварних швів...», хоча в цілому написана грамотно, логічно та зрозуміло.

Однак відзначені недоліки та зауваження не знижують загального високого рівня роботи та цінності отриманих результатів.

Дисертація відповідає вимогам Департаменту атестації кадрів МОН України. Назва та зміст дисертації відповідають паспорту спеціальності 05.03.06 – Зварювання та споріднені процеси і технології, як за формулою спеціальності, так і за напрямками досліджень.

**Загальний висновок.** Розглянуті вище результати дають підстави вважати, що дисертаційна робота М.В. Юрженка є завершеною науково-дослідною розробкою, що присвячена актуальній проблемі встановлення закономірностей та розширенні уявлень про перебіг процесів структуроутворення та формування зварних з'єднань пластмас нагрітим

інструментом та закладним нагрівальним елементом під дією термічного циклу зварювання та термодформаційних процесів, взаємозв'язку між структурною будовою та властивостями зварних з'єднань пластмас та створенню нових технологічних підходів до формування зварних з'єднань пластмас з високими характеристиками якості.

За обсягом виконаних досліджень, їх новизною, науковою та практичною значимістю одержаних результатів та їх рівнем, представлена робота відповідає вимогам п. 9, 10 «Порядку присудження наукових ступенів» щодо докторських дисертацій, а її автор Юрженко Максим Володимирович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – Зварювання та спорідненні процеси і технології.

Офіційний опонент,  
завідувач кафедри зварювального виробництва  
Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
доктор технічних наук,  
професор



В.В. Квасницький

Підпис завідувача кафедри зварювального виробництва Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», д.т.н, проф. Квасницького В.В. засвідчую:

Вчений секретар  
Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»



А.А. Мельниченко