



ЮРЖЕНКО
Максим Володимирович —
доктор технічних наук, завідувач
відділу зварювання пластмас
Інституту електрозварювання
ім. Є.О. Патона НАН України

ЗВАРЮВАННЯ ПЛАСТМАС: СЬОГОДЕННЯ ТА МАЙБУТНЄ

Стенограма доповіді на засіданні Президії НАН України 23 червня 2021 року

Доповідь присвячено науковим дослідженням та розробкам Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України в галузі з'єднання полімерних матеріалів і виробів з них. Наведено основні результати фундаментальних і прикладних досліджень зі створення наукової теорії щодо механізму зварювання полімерів та природи їх зварних з'єднань, розроблення інноваційних технологій зварювання полімерних матеріалів та обладнання для їх реалізації. Ці роботи є актуальними для подальшого розвитку полімерного матеріалознавства в Україні, а відповідні розробки вже широко впроваджуються на вітчизняних промислових підприємствах.

Шановні члени Президії!

Шановні присутні!

Маю честь представити доповідь про фундаментальні та прикладні аспекти зварювання пластмас. Актуальність цієї тематики зумовлена постійним розширенням сфери застосування полімерних матеріалів, зокрема термопластичних полімерів, оскільки їх використання дає змогу зменшити метало- та енергомісткість виробів. Значний прогрес у сучасному полімерному матеріалознавстві сприяє стрімкому поширенню полімерних матеріалів у найважливіших галузях промисловості — сьогодні практично всі речі, що нас оточують, тією чи іншою мірою виготовлені із застосуванням полімерів. Широкі перспективи має створення та використання виробів складного профілю, а найбільш ефективним способом з'єднання окремих елементів таких виробів є зварювання, яке має забезпечувати надійність і довговічність виробів під час їх експлуатації.

Полімерні матеріали за своєю структурою поділяються на аморфні та напівкристалічні, а за експлуатаційними застосуваннями — на масові (упаковка, побутові товари), інженерні (застосування в будівельній, хімічній, медичній, радіотехнічній, електронній, харчовій промисловості) та високотехнологічні (використовуються в авіа-, ракето-, автомобіле-, суднобудуванні).

Відомо багато способів зварювання пластмас та виробів з них. Методи зварювання полімерних матеріалів поділяються на зовнішні та внутрішні. Зовнішні методи переважно термічні — це зварювання нагрітим газом, нагрітим клином, нагрітим інструментом, екструзійне, лазерне зварювання. Внутрішні методи у свою чергу поділяються на механічні (зварювання обертанням, змішуванням, вібротерттям, ультразвукове зварювання), електромагнітні (терморезисторне, індукційне, діелектричне, високочастотне тощо), хімічні та зварювання плазмою.

Для ефективного використання будь-якого з цих способів з'єднання пластмас необхідне глибоке розуміння природи зварювання та механізмів формування зварних з'єднань. Так, є ціла низка ефектів, наприклад давно відоме зварникам пластмас підвищення міцності зварних з'єднань поліетилену порівняно з основним матеріалом, які неможливо пояснити та описати постулатами традиційних теорій, зокрема загальновідомої дифузійно-реологічної теорії та її похідних.

Тому в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, який протягом багатьох років є головною організацією в країні в галузі з'єднання полімерних матеріалів і виробів з них, було проведено комплексні фундаментальні дослідження структури та властивостей зварних з'єднань полімерів.

За результатами досліджень, проведених методами ширококутового та малокутового розсіювання рентгенівських променів, інфрачервоної спектроскопії, оптичної та електронної мікроскопії, було виявлено зміни у фазовій структурі зварних з'єднань, зокрема збільшення кількості упорядкованих кристалів, перерозподіл молекулярних груп та зміну гетерогенності полімерного матеріалу.

За результатами диференційної сканувальної калориметрії, термогравіметричного і термомеханічного аналізів встановлено, що зварювання приводить до поліпшення термомеханічних властивостей і підвищення термічної стабільності полімеру у зварному з'єднанні. Для зварного з'єднання характерними є біль-

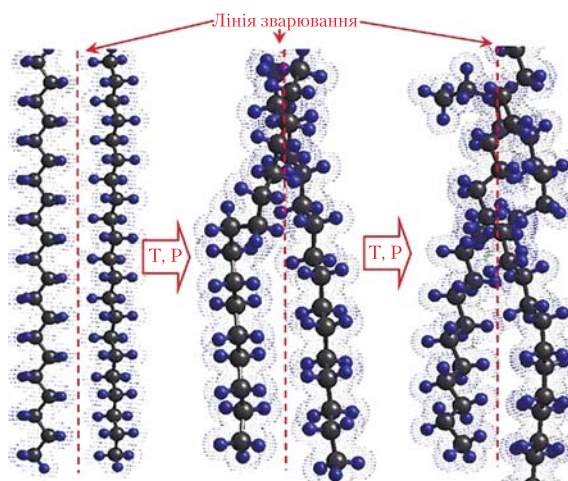


Рис. 1. Конформаційний механізм зварювання полімерів

ші, ніж для основного матеріалу, значення температури плавлення, ентропії плавлення, ступеня кристалічності, розмірів кристалів, розмірів зон гетерогенності, механічної міцності.

Згодом було вивчено релаксаційну поведінку полімерів у зварному з'єднанні і виявлено релаксацію в їх структурі і властивостях з відновленням характеристик до відповідних значень вихідного полімеру. Досліджено також вплив різноманітних фізичних полів, зокрема постійного магнітного поля, на структуру і властивості зварних з'єднань полімерів. Незважаючи на те, що переважна більшість полімерних матеріалів є нечутливими до дії магнітного поля, виявлено зміну фазової структури й теплофізичних характеристик полімеру, зокрема поліетилену, у зварному з'єднанні під впливом постійного магнітного поля. При цьому дія поперечного постійного магнітного поля поліпшує характеристики матеріалу у зварному з'єднанні, а дія повздовжнього постійного магнітного поля — навпаки, погіршує їх.

Отримані результати комплексних досліджень лягли в основу нової наукової теорії конформаційного механізму зварювання полімерів. Згідно з її основними положеннями, в процесі зварювання за рахунок додаткової енергії відбувається зміна конформаційного порядку макромолекулярного ланцюга з пере-

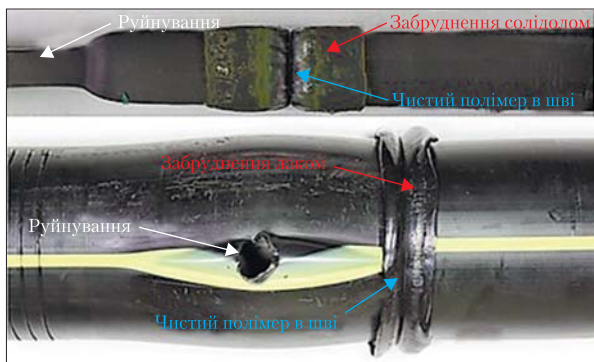


Рис. 2. Результати механічних і гідравлічних випробувань зварних з'єднань, сформованих за інноваційною технологією

ходом частини його молекул через лінію зварювання і подальшим формуванням зародків кристалів та їх ростом в основний матеріал при охолодженні (рис. 1).

Розроблену конформаційну теорію було успішно представлено світовій науковій спільноті на щорічній асамблеї Міжнародного інституту зварювання, яка проходила у 2019 р. у Братиславі.

Положення цієї теорії стали основою для розроблення низки технологічних рішень, створення нових технологій та відповідного обладнання. Так, для зварювання полімерних, зокрема поліетиленових та поліпропіленових, труб при будівництві, ремонті та реконструкції трубопроводів для водо- і газопостачання розроблено інноваційну технологію стикового зварювання нагрітим інструментом. На відміну від традиційної технології зварювання полімерних труб, запропонована технологія дозволяє уникнути високовартісного і технологічно складного процесу механічної підготовки торців труб до зварювання. Крім того, завдяки використанню цієї технології в місцях з'єднання труб не утворюється внутрішній грат, що надзвичайно важливо при спорудженні сучасної вакуумної каналізації. Для відпрацювання технологічних параметрів в Інституті було створено дослідну зварювальну установку.

Проведено також математичне моделювання стикового зварювання полімерних труб,

результати якого було підтверджено експериментально.

На основі отриманих експериментальних результатів і теоретичних розрахунків було визначено рекомендовані параметри зварювання за новою інноваційною технологією та створено промислову зварювальну установку.

Ефективність цієї технології підтверджено результатами механічних та гідравлічних випробувань зварних з'єднань полімерних труб. При цьому під час випробувань торці труб спеціально забруднювали різними речовинами, такими як солідол, лак, пил тощо, і було показано, що в процесі зварювання за інноваційною технологією всі забруднення витісняються у зовнішній грат (рис. 2).

Для вирішення проблеми безпечного транспортування травмованої людини до медичного закладу співробітники Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України разом з фахівцями кафедри травматології і ортопедії Національного медичного університету ім. О.О. Богомольця розробили конструкції і технології виготовлення з полімерних ламінованих плівкових матеріалів іммобілізаційних пневматичних шин для тимчасової фіксації травмованих частин тіла людини, зокрема тазостегнового поясу, верхніх та нижніх кінцівок. Дослідні зразки було випробувано в лабораторних і польових умовах, а дослідна серія іммобілізаційних пневматичних шин, виготовлена в ТОВ «Навігатор» (м. Київ), успішно пройшла апробацію під час військових навчань і отримала схвалення фахівців у сфері військової медицини та медицини катастроф.

З метою імпортозаміщення високовартісних витратних матеріалів, а саме — налагодження вітчизняного виробництва надтонких плетених плівок для виготовлення фільтрів надтонкої фільтрації, що широко використовуються в харчовій та хімічній промисловості, медичній сфері та агропромисловому комплексі, розроблено технологію термоімпульсного зварювання і відповідне промислове зварювальне устаткування. Розробку впроваджено на київських підприємствах ТОВ «Лабор технік» і ТОВ «Плюріма лаб технолджіс».

У сучасному авіа- і ракетобудуванні широко застосовують виготовлені з полімерних матеріалів деталі зі складною геометрією з'єднання. Для вирішення завдання з виготовлення таких деталей було розроблено новітню технологію зварювання закладним елементом високотехнологічних полімерних композитів та листових виробів з них. За допомогою математичного моделювання визначено оптимальні технологічні параметри зварювання закладним елементом для отримання максимально якісних зварних з'єднань. Технологія успішно пройшла випробування і використовуватиметься в рамках протоколу про науково-технічне співробітництво в авіакосмічній галузі на ДП «КБ «Антонов» та ДП «КБ «Південне ім. М.К. Янгеля».

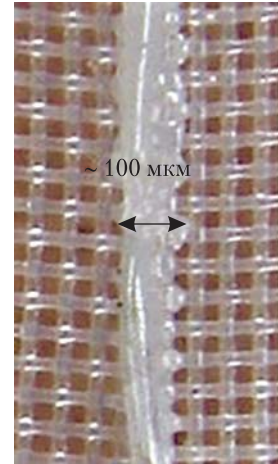
Ці роботи набули подальшого розвитку в розрізі підвищення адгезії між закладним елементом та полімером. Для модифікації поверхонь металевих сіток було використано різні способи обробки, зокрема піскоструминну обробку та мікроплазмове напилення різних металів. Наприклад, для закладного елемента на основі сталевий сітки найбільш ефективним виявилось напилення ніхрому, оскільки руйнування відбувається не лише по полімеру, а й по самій сітці. Водночас сталева сітка зі своїми, відмінними від полімеру, властивостями в будь-якому разі відіграватиме роль дефекту у зварному з'єднанні та негативно впливатиме на міцність зварного з'єднання. Тому було розроблено науково-технологічну концепцію зварювання полімерних матеріалів самими полімерами. Для цього створено закладний нагрівальний елемент на основі електроактивних полімерних композитів із сегрегованою структурою електропровідної фази вуглецевих мікронаповнювачів. Розрахунки за всесвітньвідомою геометричною моделлю доктора фізикоматематичних наук Є.П. Мамуні показали, що такі закладні нагрівальні елементи матимуть низький перколяційний поріг і високу нагрівальну здатність, необхідну і достатню для зварювання. Встановлені технологічні параметри дали можливість з використанням створеного закладного елемента отримувати рівномірні

Рис. 3. Надтонкі плетені полімерні плівки та їх зварне з'єднання

ні зварні з'єднання. Крім того, зараз проводяться відповідні дослідження щодо використання розроблених закладних нагрівальних елементів як вбудованих сенсорів для моніторингу якості зварних з'єднань у реальному часі.

Проблема катастрофічного забруднення навколишнього середовища полімерними відходами, значну частину яких становить використана полімерна упаковка, не залишилася поза увагою наших учених. Потенційним рішенням цієї проблеми може бути заміна синтетичних полімерів на біополімери, але і в цьому разі виготовлення упаковки потребує зварювання. Проте питання, як впливає зварювання на процес деструкції зварних з'єднань біополімерів, вивчено не було. Відповідні дослідження проведено в рамках діяльності міжнародної польсько-української науково-дослідної лабораторії ADPOLCOM, а також глобальної мережі з екологічно безпечних пластиків PLASTiCE. Під час реалізації проекту з вивчення деструкції зварних з'єднань низки біополімерів у лабораторних і польових умовах встановлено, що процес відбувається спочатку в аморфній фазі, а потім уже у кристалічній, а отже, чим вищий ступінь кристалічності полімеру в зварному шві, тим повільніше він розкладається порівняно з основним матеріалом.

Вище наведено результати робіт зі зварювання термопластичних полімерів, однак існує, хоч і не такий великий, клас терморезистивних полімерів, які не можливо зварювати термічними методами. Зазвичай їх з'єднують за допомогою склеювання. Проте такі матеріали все ж можна зварювати за допомогою хімічного зварювання, яке в чомусь подібне до





Проект MARSNA з будівництва житлових комплексів на Марсі (фото AI SpaceFactory)



Дослідна камера для моделювання аномальних умов з метою вивчення особливостей зварювання та 3D-друку полімерних конструкцій у цих умовах

процесу так званого «самозаліковування» полімерів. Суть механізму полягає у з'єднанні полімерного матеріалу за рахунок фізико-хімічних реакцій, але без використання шару додаткового матеріалу, як це відбувається при склеюванні. Розроблено полімерний композит на основі епоксидної смоли з високою здатністю до «самозаліковування» та, відповідно, до хімічного зварювання.

Для подальших досліджень цікавими є також гібридні технології хімічного зварювання та 3D-друку. Серед адитивних технологій для полімерних матеріалів слід особливо відзначити метод пошарового наплавлення, при застосуванні якого вироби формуються пошаровим нанесенням розплавленого полімеру відповід-

но до заданої 3D-моделі об'єкта. За допомогою математичного моделювання було встановлено оптимальні технологічні параметри цього процесу – температуру, швидкість 3D-друку, висоту шарів тощо. Виявлено, що так само, як і при зварюванні, в процесі 3D-друку відбуваються фазові зміни, а варіюванням значеннями основних параметрів можна отримувати вироби з пошарово різною структурою та властивостями полімеру, що є суттєвим кроком на шляху до 4D-друку, тобто виготовлення за допомогою адитивних технологій деталей з полімерних матеріалів із заздалегідь заданою здатністю виробу до перетворення під дією певних зовнішніх факторів, таких як температура, ультрафіолетове випромінювання, електричний струм тощо. До речі, останніми роками розвитку цього напрямку велику увагу приділяє Агентство передових оборонних дослідницьких проєктів США – DARPA.

Крім робіт з розроблення нових адитивних технологій для полімерів ведуться дослідження, спрямовані на створення нових матеріалів для 3D-друку та функціональних виробів з них. Зокрема, з використанням зазначених вище електроактивних полімерних композитів з упорядкованою структурою створено матеріали для 3D-друку та електроактивні полімерні вироби, які можуть бути використані, наприклад, для виробництва «розумного» одягу.

На основі срібловмісних полімерних композитів за допомогою 3D-друку виготовлено вироби з антимікробною (зокрема, до золотистого стафілокока) та противірусною (наприклад, проти вірусів грипу H1N1 або аденовірусу людини 2-го типу) активністю для застосування в медичній та харчовій промисловості.

Наостанок хотів би коротко розповісти про підтриманий NASA проєкт MARSNA (MARS HAbitat), спрямований на створення розробок для будівництва житлових комплексів при колонізації Марса. Основна проблема полягає в тому, що доставка з Землі будівельних матеріалів є недозвільною розкішшю, а тому компанією AI SpaceFactory було запропоновано зводити споруди за допомогою адитивних технологій з використанням біополімеру полілак-

тиду, який можна отримувати безпосередньо на Марсі з відходів, які в біологічних реакторах перероблятимуть завезені земні мікроорганізми.

Сьогодні в земних умовах відпрацьовуються технології зведення таких будинків, однак однією з невирішених проблем є особливості наплавлення полілактиду в екстремальних марсіанських умовах. Наші співробітники долучилися до вирішення цієї проблеми. Для цього було виготовлено спеціальну дослідну камеру, яка дозволяє змоделювати аномальні

умови червоної планети і вивчити особливості процесу зварювання та 3D-друку полімерних конструкцій у цих умовах. Попередні дослідження показали, що, наприклад, вимушеним охолодженням торців зварних з'єднань можна запобігти утворенню пор, зменшити дефектність зварних швів і, відповідно, підвищити їхні експлуатаційні характеристики.

Дякую за увагу!

За матеріалами засідання підготувала О.О. Мележик

Maksym V. Iurzhenko

Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5535-731X>

PLASTIC WELDING: THE PRESENT AND THE FUTURE

Transcript of report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, June 23, 2021

The report is devoted to research and developments of the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine in the field of connection of polymeric materials and products from them. The main results of fundamental and applied research on the creation of a scientific theory of the mechanism of welding of polymers and the nature of their welded joints, the development of innovative technologies for polymeric materials welding and equipment for their implementation are given. These works are relevant for the further development of polymer materials science in Ukraine, and their results are already widely used in domestic industrial enterprises.

Keywords: polymer materials science, welding of polymers, conformational theory, additive technologies for polymers.