

## СУЧАСНІ МОДЕЛІ УТВОРЕННЯ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ (Огляд)

М.Г. Кораб, М.В. Юрженко, В.Л. Демченко, Є.П. Мамуня

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

Процес зварювання пластмас визначається як поступове зникнення межі розподілу між деталями, що з'єднуються та формування між ними перехідного шару, структура якого суттєво відрізняється від структури основного полімерного матеріалу. Існуючі на даний час моделі утворення зварних з'єднань полімерів беруть за основу різні фізичні феномени – взаємну адгезію субстратів, дифузію макромолекул, реологію розплаву. Найбільш поширеною є дифузійна модель рептації макромолекул у зоні зварювання, на яку посилаються багато дослідників для пояснення експериментальних даних. Не заперечуючи можливість поступальної дифузії елементів молекулярного ланцюга крізь поверхню сплавлення, ми вважаємо дискусійним положення, що саме така дифузія забезпечує основний масоперенос при утворенні зварного з'єднання полімерів. Більш реалістичною є теорія утворення зварних з'єднань полімерів за рахунок конформаційних перетворень фрагментів макромолекул, що розробляється науковою школою Інституту електрозварювання (ІЕЗ) ім. С.О. Патона. В розвиток цієї конформаційної теорії, запропоновано модель гомогенізації перехідного шару на межі розділу фаз при зварюванні полімерів за ваканційно-конформаційним принципом. Бібліогр. 24, рис. 12.

*Ключові слова:* полімерні матеріали, зварювання, дифузія макромолекул, конформаційні перетворення

**Вступ.** Розуміння механізму утворення зварного з'єднання полімерних матеріалів необхідне для адекватного вибору технології та параметрів режиму зварювання, а також методів оцінки якості зварного з'єднання. Однак досі відсутня єдина точка зору та існує декілька гіпотез цього механізму. Ще з 1980-х років науковою школою ІЕЗ ім. С.О. Патона запропонована та розробляється теорія утворення зварних з'єднань полімерів за рахунок конформаційних перетворень фрагментів макромолекул. Метою даної роботи є огляд існуючих пояснень механізму створення зварного з'єднання полімерних матеріалів та наведення додаткових аргументів на користь інформаційної теорії.

Фізико-хімічні властивості металів та пластмас кардинально різняться, однак в процесах зварювання цих типів матеріалів є багато спільного, оскільки обидва вони з точки зору фізики є твердими тілами. Наукове визначення процесу зварювання – це отримання нерознімного з'єднання твердих тіл, монолітність якого досягається забезпеченням фізико-хімічних, атомно-молекулярних зв'язків між елементарними частинками тіл, що з'єднуються [1]. Або, так зване термодинамічне визначення: зварювання – процес отримання монолітного з'єднання матеріалів за рахунок введення та термодинамічно необоротного перетворення енергії та речовини в місці з'єднання.

Загальною властивістю твердих тіл, зокрема пластмас, є збереження межі розділу між поверхнями торкання окремих тіл при їх контакті. Тому було сформульовано таке визначення зварювання пластмас – це технологічний процес отримання не-

Кораб М.Г. – <http://orcid.org/0000-0001-8030-1468>, Юрженко М.В. – <http://orcid.org/0000-0002-5535-731X>, Демченко В.Л. – <https://orcid.org/0000-0001-9146-8984>, Мамуня Є.П. – <https://orcid.org/0000-0003-3855-2786>  
© М.Г. Кораб, М.В. Юрженко, В.Л. Демченко, Є.П. Мамуня, 2023

рознімного з'єднання елементів конструкції шляхом дифузійно-реологічної або хімічної взаємодії макромолекул полімерів, у результаті якого зникає межа розділу та утворюється структурний перехід від одного полімерного елемента до іншого [2]. Інший варіант подібного визначення: зварювання полімерних матеріалів – технологічний процес одержання нерознімного з'єднання деталей і елементів конструкції, в результаті якого між деталями з полімерних матеріалів зникає первісна межа розділу, перетворюючись в перехідний шар з однорідною або різнорідною хімічною структурою [3].

Міжнародний стандарт ISO дає досить просте визначення: «зварювання пластмас - це процес з'єднання розм'якшених поверхонь матеріалів, як правило, за допомогою тепла» [4].

Таким чином, сутністю зварного з'єднання вважається розмивання та зникнення поверхні розділу між деталями, на відміну від адгезійного з'єднання, де поверхня розділу завжди залишається та чітко видна. З початком застосування перших способів зварювання пластмас науковці почали висувати гіпотези про механізми утворення зварних з'єднань полімерних матеріалів.

**Основна частина.** Дослідники в роботі [5], вивчаючи особливості теплового зварювання поліметилметакрилату (РММА), висловили припущення, що зварне з'єднання формується по дифузійному механізму аутогезії (зчеплення між приведеними в контакт поверхнями одного і того ж полімерного матеріалу). В подальшому теорію дифузійної аутогезії було розвинуто, взаємне переміщення фрагментів макромолекул через по-

верхню контакту при зварюванні пояснювали тепловим броунівським рухом сегментів молекули та ковзанням їх між собою у високоеластичному (для аморфних полімерів) та в'язкотекучому стані [6, 7].

Пізніше американський дослідник Річард Вул (R. Wool) запропонував дифузійну гіпотезу «заліковування тріщин у полімерах», що складається з п'яти етапів, схематично показаних на рис. 1 [8]. Пунктирною лінією показана умовна лінія розділу з'єднання, в середині кола – так званий випадковий клубок макромолекулярного ланцюга (для наочності показаний тільки з одного боку). Перші два етапи – перебудова поверхні (звичай розплавлення під дією тепла) та зближення поверхонь до їх контакту (*a*, *б*). Третій етап – взаємне змочування поверхонь (*в*), четвертий – початок дифузії на деяку відстань (*г*)  $\chi$  та останній п'ятий етап (*д*) – взаємна дифузія на відстань  $\chi_{\infty}$  та розмивання лінії розділу.

Будову аморфних полімерів схематично уявляють, як сітчасту структуру випадкових зв'язків макромолекулярних ланцюгів між собою. Існують альтернативні гіпотези утворення таких зв'язків – за рахунок складчастих кластерних структур [9, 10], та через безпосереднє зачеплення одного молекулярного ланцюга повинен утворити хоча б одне з іншим – теорія мостових зв'язків в полімерному масиві [11]. Відповідно з цією теорією, при утворенні зварного з'єднання між макромолекулами вздовж лінії сплавлення також повин-

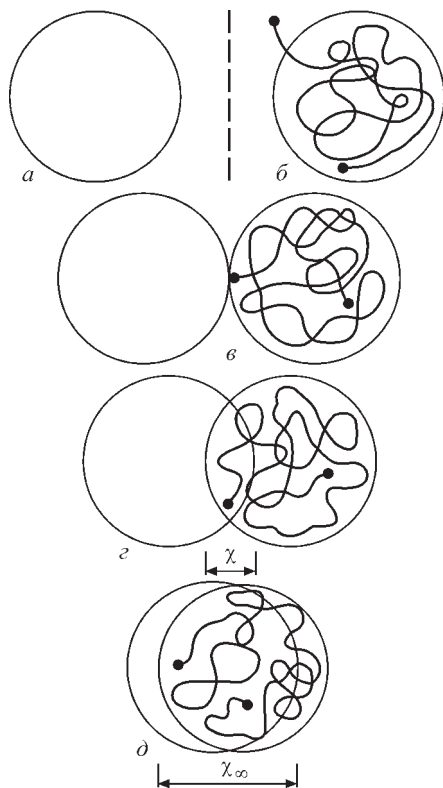


Рис. 1. Принципова схема етапів утворення зварного з'єднання Річарда Вула (R. Wool)

ні формуватись мостові зв'язки – зачеплення, що схематично показано на рис. 2. Товстою лінією показано мінімальну структуру молекулярного моста через лінію розділу, яка необхідна для формування зварного шва. З використанням цієї моделі пояснюють механізм утворення структур різної міцності вздовж лінії сплавлення в залежності від теплофізичних умов процесу зварювання [12].

У західній літературі в рамках дифузійної гіпотези використовують термін «healing» – «заліковування» для описання процесу утворення зварного з'єднання полімерів, що ілюструється на рис. 3 [13]. Після виникнення взаємного контакту між оплавленими поверхнями полімерних елементів, що зварюються, розпочинається процес дифузії молекулярних ланцюгів через поверхню стику та їх заплутування. Показано, що основною умовою «заліковування» слід вважати досить трива-

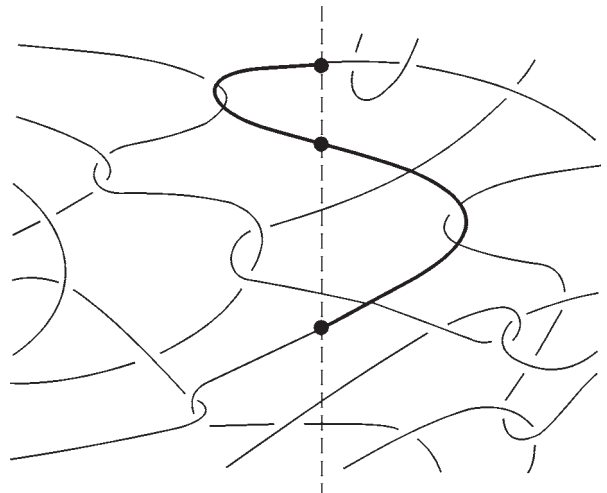


Рис. 2. Ілюстрація моделі утворення зварного з'єднання полімерів за рахунок зачеплень макромолекул у роботі [11]

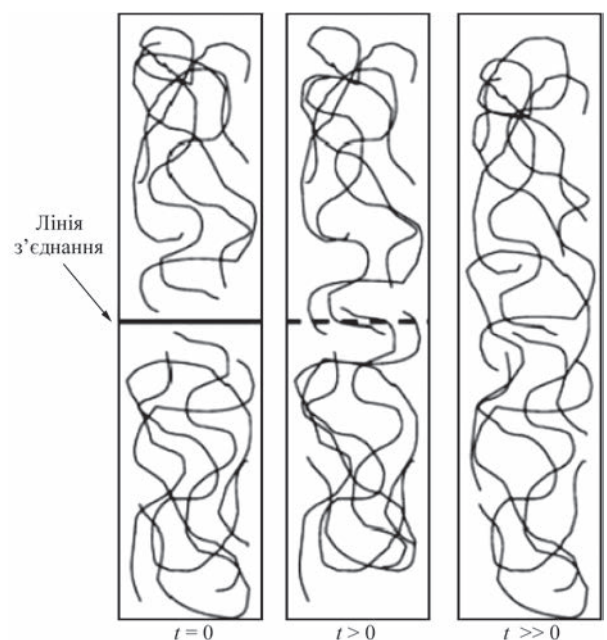


Рис. 3. Ілюстрація дифузійної моделі утворення зварного з'єднання полімерів у роботі [13]

ле перебування полімеру у розплавленому стані, коли процеси переміщення макромолекул активні. Однак дискусійним залишається питання самого дифузійного механізму «заліковування» (розмивання, зникнення) межі сплавлення у зварному з'єднанні.

Для пояснення механізму можливої самодифузії полімерного ланцюга французький фізик П'єр де Женн (de Gennes) з колегами розробив теорію рептації. Вважається, що макромолекула оточена іншими ланцюгами з усіх боків та не може зміщуватись убік, однак може переміщуватись у поздовжньому напрямку крізь таке оточення як свого роду трубку, тунель (рис. 4). Такий рух макромолекули назвали рептацією та умовно порівнювали із рухом змії, яка пробирається крізь купу гілок [14]. Оскільки в умовах розплаву всі молекули перебувають у тепловому броунівському русі, ланцюги, що утворюють стінки трубки постійно оновлюються.

Вважається, що основним чинником, який впливає на параметри рептаційної трубки, є щільність флуктуаційної сітки зачеплень між макромолекулами, яка існує в розплаві полімеру. Для гнучких полімерних ланцюгів відстань між окремими зачепленнями оцінюється у межах від 50 до 500 статистичних молекулярних сегментів. Це відповідає досить довгим відрізням ланцюга з довжиною у межах  $10^4 \dots 10^5$ . Тому було припущено, що

такі довгі відрізки складаються в послідовність субмолекулярних клубків, яка розташовується всередині рептаційної трубки (рис. 5). Характерний розмір клубка (1) і визначає середній діаметр трубки  $d$ .

Слід відзначити, що рухливість макромолекули у межах теорії рептації суттєво залежить від її довжини, тобто молекулярної маси. Вважається, що час переміщення молекули в процесі рептації зростає пропорційно кубу її молекулярної маси. Отже, найбільше такі переміщення будуть спостерігатись для коротких молекулярних ланцюгів. Однак, розглядається, також, можливість рептаційного переміщення фрагментів молекулярних ланцюгів складної будови – розгалужених, зіркоподібних та циклічних. Так, розгалужений полімерний ланцюг може в процесі руху втягнути бокову гілку в рептаційну трубку з наступною її новою випадковою конформацією назвні. Циклічні полімерні ланцюги можуть складатись у лінійні конформації та у такому вигляді здійснювати рептаційні переміщення. Через велику складність механізмів переміщення ланцюгів нелінійних форм у розплаві, рептаційне переміщення макромолекул складних форм буде відбуватись дуже повільно.

Розглянемо можливі альтернативні механізми утворення зварних з'єднань полімерів. Процеси зварювання полімерних матеріалів та металів у

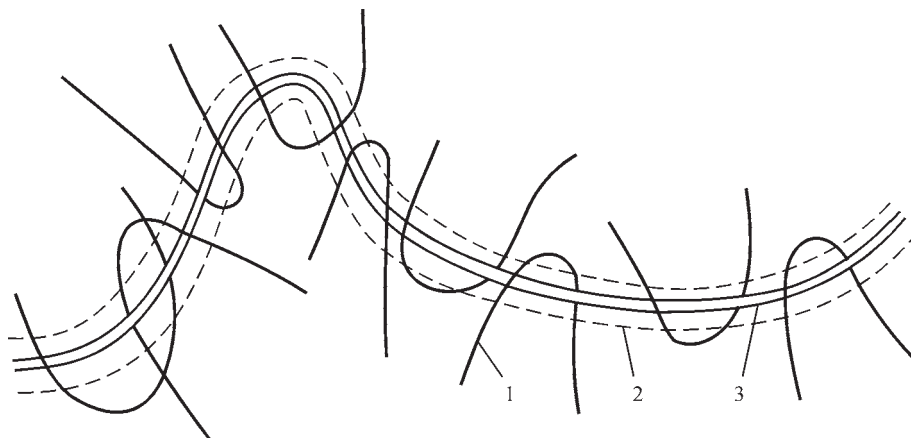


Рис. 4. Схема утворення «трубки» з молекулярних ланцюгів, згідно з теорією рептації: 1 – молекули оточення; 2 – умовні межі трубки; 3 – ланцюг, спроможний до рептації

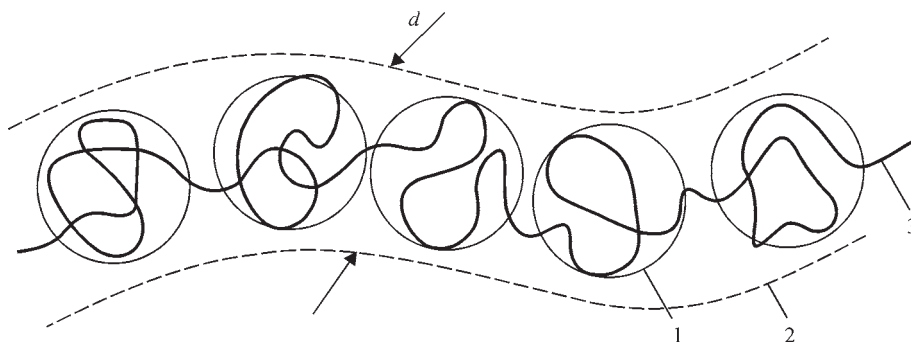


Рис. 5. Молекула, що складається з послідовності невеликих клубків (субмолекул) всередині «трубки»: 1 – молекулярний клубок; 2 – умовна межа трубки; 3 – полімерний ланцюг

багатьох випадках подібні. При контактному стиковому зварюванні металевих деталей утворюється структура, схожа на зварні шви полімерних матеріалів, виконані нагрітим інструментом встик. На рис. 6 показана макроструктура контактного зварного з'єднання гарячекатаної шаруватої феррито-перлітної сталі. При зварюванні без оплавлення (*a*) горизонтальна шарувата структура сталі змінює орієнтацію, відхиляючись у вертикальному напрямку вздовж лінії з'єднання. При зварюванні з оплавленням (*б*) на торцях утворюється суцільний шар розплавленого матеріалу, як суміш розплавів обох деталей, більша частина якого зусиллям осадження витісняється у ґрат. При охолодженні метал кристалізується та утворює зварне з'єднання. Вважається, що перші стикові з'єднання формуються у твердій фазі а другі комбіновано у твердо-рідкій фазі нагрітого матеріалу [15]. В останньому випадку зварне з'єднання утворюється за рахунок кристалізації тонкого шару розплавленого металу по поверхні розподілу. За аналогією з цим механізмом було запропоновано

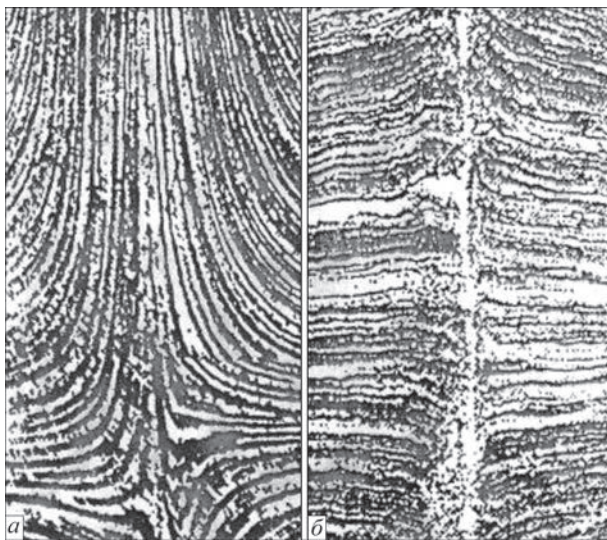


Рис. 6. Макроструктура контактних зварних з'єднань трубної сталі: *a* – зварювання без оплавлення кромки; *б* – зварювання з оплавленням [15]

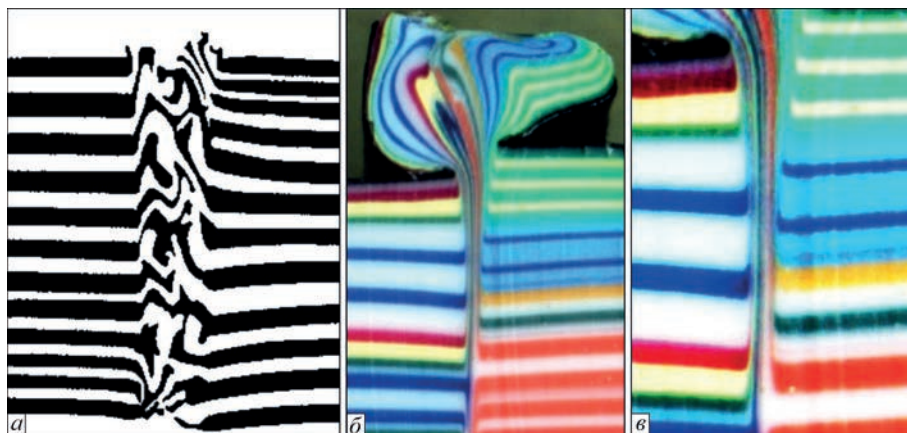


Рис. 7. Результати досліджень реологічних процесів при зварюванні шаруватих термопластів нагрітим інструментом встик *a* – у роботі [16]; *б, в* – за даними ІЕЗ [2]

«реологічну концепцію» утворення зварних з'єднань термопластичних полімерів. Вважалося, що, визначальну роль у формуванні з'єднання має реологія – течія розплаву полімеру при осадженні деталей під дією робочого тиску. При цьому зі зони контакту витісняються усі інгредієнти, що заважають міжмолекулярному зближенню – гази, окислені та забруднені ділянки. Оскільки швидкість зсуву окремих шарів розплаву відрізняється через нерівномірність розподілу температури та тиску, це викликає його перемішування, зокрема на поверхні сплавлення. Дифузія сегментів макромолекул, що відбувається при охолодженні з'єднання мало впливає на формування стику та має вторинний характер [16].

На підтвердження перемішування мікроб'ємів розплаву приводять фото перерізу стикового з'єднання шаруватого полімерного матеріалу, охолодженого на початковому етапі осадження (рис. 7, *a*). Насправді з фотографії видно, що шари полімерного матеріалу значно деформовані, але ніщо не свідчить про їх суттєве перемішування. Аналогічні роботи зі зварювання нагрітим інструментом встик кольорових шаруватих зразків термопластів проводили в ІЕЗ. На перерізі шаруватого зварного з'єднання (рис. 7, *б, в*) можна спостерігати, що всі шари основного матеріалу зразків повністю зберігають свою послідовність навіть у зовнішньому ґраті, змінюючи тільки товщину [2]. Отже, про якесь значне перемішування розплаву в процесі розплавлення та осадження говорити не можна.

Ю.С. Ліпатов з колегами досліджували специфіку міжфазних явищ у гетерогенних системах полімер – наповнювач та полімер – полімер [17]. Було відзначено, що полімери різних типів термодинамічно несумісні та не можуть утворювати спільні кристалічні форми. Однак різні полімери сумісні у морфологічному плані та при контакті у розплавленому стані формують спільні надмолекулярні структури – перехідний шар. Цей шар

утворюється як взаємною дифузією компонентів через межу розділу фаз, так і за рахунок адсорбції одного компонента на поверхні іншого.

Полімер являє собою суміш молекулярних ланцюгів різних розмірів. Теплові флуктуації на поверхні сплавлення призводять до диференціації молекул за розмірами та збагачення перехідної зони молекулами меншої ваги. Локальна дифузія через поверхню міжфазного контакту зазвичай відбувається на невелику глибину та формує перехідний шар товщиною декілька нанометрів. З іншого боку, у різних роботах фіксується наявність перехідних зон у з'єднаннях полімер-полімер товщиною 0,1...1,0 мкм. Вірогідно, в розплавах полімерів при підвищених температурах, разом зі звичайною дифузією за рахунок сегментальної рухливості макромолекул відбувається перенос через міжфазну межу досить значних об'ємів одного полімеру у міжструктурні області сусіднього.

На базі аналізу експериментальних даних Ю.С. Ліпатовим було розроблено модель поетапного утворення перехідної зони на межі контакту двох полімерів (рис. 8). На початковому етапі при контакті розплавлених поверхонь утворюється тонкий перехідний шар за рахунок конформаційних поворотів сегментів макромолекул. Якщо температура у зоні контакту деякий час залишається достатньо високою, настає другий етап, у якому під дією теплового руху через поверхню сплавлення переміщуються не тільки сегменти, а й цілі макромолекули у вигляді невеликих надмолекулярних об'єктів. У результаті замість первісного тонкого перехідного шару формується значно ширший шар, у якому мікрооб'єми одного полімеру занурюються в структуру іншого.

Аналогічні процеси, вочевидь, можуть відбуватися і при створенні зварного з'єднання між контактуючими поверхнями однакових полімерів. Якщо при з'єднанні різнотипних полімерів навіть

при утворенні широкого перехідного шару, завжди залишається явно виражена міжфазна поверхня, то у однотипних полімерів ця межа зникає та розмивається в процесі аутогезії та дифузії. На міцність зварного з'єднання впливають, головним чином, саме властивості цієї перехідної структури в зоні сплавлення.

Загальна теорія дифузії у будь-яких середовищах, зокрема в полімерах, розглядає цей процес як сукупність елементарних актів переміщення молекулярних часток. Зрозуміло, що для руху будь якої молекули або її фрагменту необхідний вільний простір, в який вона буде переміщена. Тому основою процесу дифузії вважається вакаційний (дірковий) механізм [18]. Елементарний акт дифузії являє собою утворення в результаті теплового руху поблизу молекули мікропорожнини («дірки») та їх наступний обмін місцями. У високомолекулярних полімерах мікропорожнини зазвичай утворюються за рахунок конформаційних поворотів окремих сегментів ланцюгів – так званих кінетичних сегментів. Відповідно висловлюють припущення, що утворення перехідної структури між полімерними деталями при зварюванні відбувається головним чином за рахунок сегментального взаємопроникнення макромолекул через поверхню з'єднання [19]. При цьому підкреслюється визначальна роль температури в зоні зварювання та робочого тиску, який забезпечує необхідний в'язкий контакт розплавлених поверхонь.

За результатами досліджень Ю.С. Ліпатова та вчених ІЕЗ було сформульовано конформаційну теорію зварних з'єднань полімерів [20]. В основі теорії лежить уявлення, що тепловий рух макромолекул відбувається в основному за рахунок конформаційних поворотів сегментів молекулярних ланцюгів, не поступальним переміщенням їх кінців. Тому розплавлення та кристалізацію полімеру слід розглядати як разупорядкування та наступне

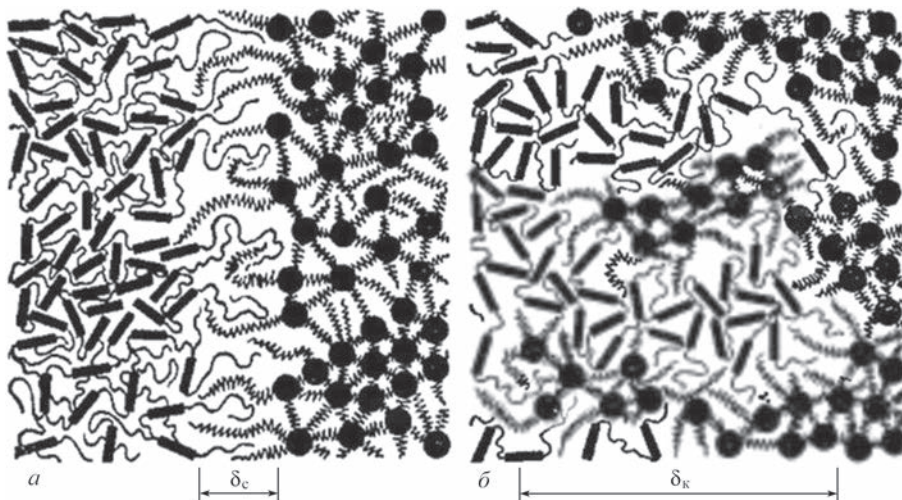


Рис. 8. Модель перехідного шару на межі розділу фаз між різними об'єктами: *а* – з урахуванням тільки сегментальної дифузії; *б* – при переміщенні структурних елементів [17]

упорядкування за конформаційним механізмом. Взаємопроникнення фрагментів макромолекул через поверхню з'єднання при зварюванні полімерів («заліковування» межі розподілу) також відбувається за рахунок молекулярних конформаційних поворотів. Дифузія макромолекул поступальним рухом їх кінців крізь поверхню з'єднання практично не впливає на процес «заліковування» через короткоплинність зварювання та невелику кількість вільних кінців молекулярних ланцюгів у порівнянні з кількістю сегментальних атомарних груп, що здатні до конформації.

Також, було припущено, що визначальний вплив на кінцеву кристалічну структуру полімеру, що формується зі розплаву має кількість зародків сферолітизації на поверхні сплавлення. Згідно з цим положенням було сформульовано критерій утворення якісного стикового зварного з'єднання полімерів. На рис. 9, а вздовж лінії сплавлення наявна оптимальна кількість зародків кристалітів. В результаті формується суцільна завершена сферолітна структура, рівномірна з основним полімерним матеріалом. На рис. 9, б показано випадок, коли теплофізичні умови при формуванні стику сприяли утворенню надмірної кількості зародків сферолітів. У результаті формується велика кількість дрібних незавершених сферолітів і так званий транскристалічний шар вздовж лінії сплавлення. Таке з'єднання має знижену механічну міцність та руйнується по лінії стику.

Останні дослідження, проведені в ІЕЗ, дозволили доповнити новими даними конформаційну теорію утворення зварних з'єднань полімерів [21, 22].

Показано, що на формування зварного з'єднання впливають два основні фактори – теплова енергія  $T$  та силове поле  $P$  (зовнішній тиск та інші фактори) (рис. 10). За підсумками комплексних досліджень структури та властивостей зварних з'єднань полімерів було припущено, що в тонкому шарі розплаву при зварюванні відбувається орієнтація макромолекул уздовж поверхні розмежування з наступним розмиванням цієї поверхні за рахунок обертальних рухів сегментів макромолекул, тобто зміни їх конформацій в об'ємі перехідного шару [23]. Запропонована концепція не заперечує можливість взаємної дифузії макромолекул полімерів, зокрема за рахунок рептації, однак вважається, що статистично конформаційні обертальні рухи сегментів макромолекул відбуваються значно частіше у порівнянні з дифузійними, тому мають вирішальний вплив на розмивання поверхні розмежування для короткотривалого процесу з'єднан-

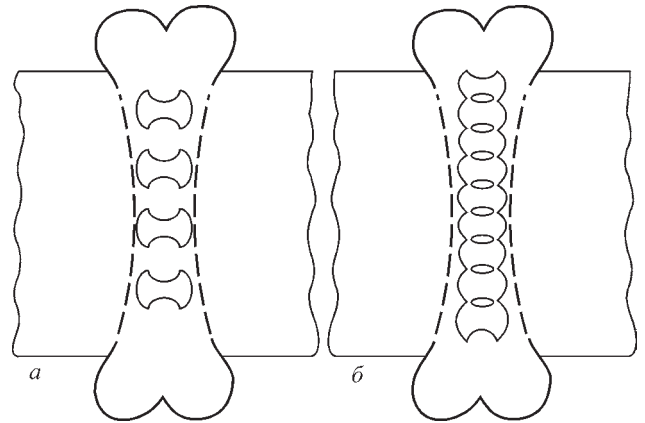


Рис. 9. Формування сферолітної структури вздовж лінії сплавлення полімерів [20]

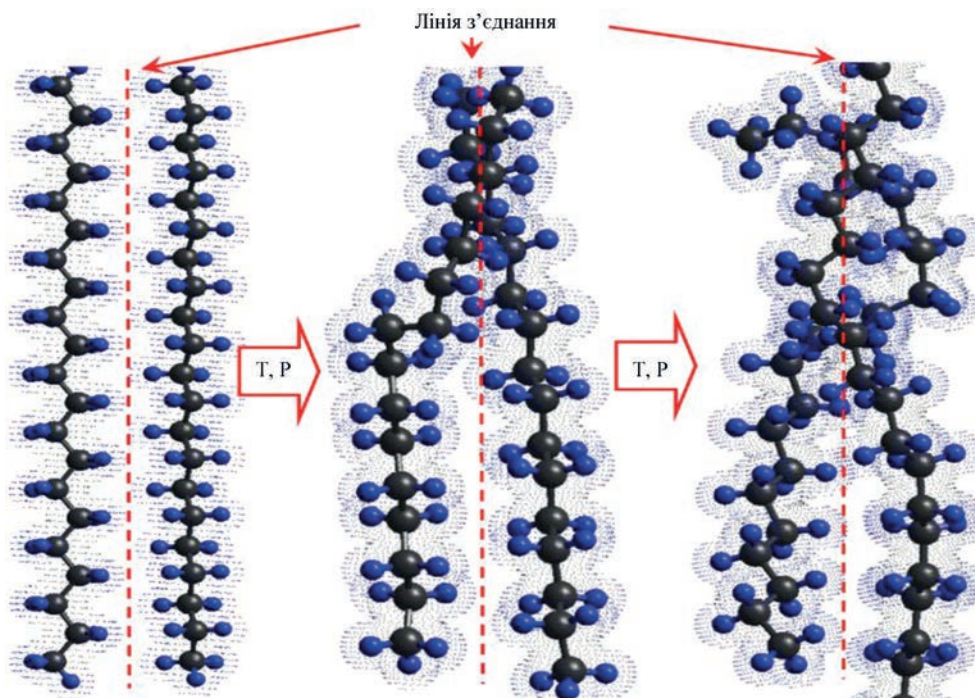


Рис. 10. Процес сегментальної рухливості зі зміною конформацій макромолекул під дією теплового та силового полів при зварюванні [23, 24]

ня (рис. 11), яким у більшості випадків є зварювання полімерів [2]. Основою процесу переміщення фрагментів макромолекул в розплаві при тепловому русі саме вакансійний (дірковий) механізм. Наявність таких ваканцій в кристалічній структурі полімеру передбачає найбільш наближена до реальності паракристалічна модель Хоземанна [24].

Згідно з цією моделлю в структурі полімеру наявні порожнини, аморфні ділянки, монокристали, фрагменти розпрямлених ланцюгів та інші утворення. Після розплавлення або переходу у в'язкотекучий стан порожнини на молекулярному рівні залишаються, так само, як і деякі складчасті або неупорядковані утворення, здатні до конформаційних перетворень. На рис. 12 показано модель поступового зникнення межі розподілу при зварюванні полімерів за ваканційно-конформацій-

ним принципом. На етапі змочування та контакту розплавлених поверхонь ( $t = 0$ ) кількість ваканцій є найбільшою саме поблизу площини контакту. Через деякий час ( $t > 0$ ) за рахунок теплового руху молекулярних сегментів (конформацій) ваканції на поверхні розмежування поступово заповнюються, переміщуючись вглиб матеріалу. Якщо полімерний матеріал перебуває у розплавленому стані деякий мінімально необхідний час, розподіл ваканцій у розплаві стане майже рівномірним і межа розподілу «розмиється», зникне. Після твердіння гомогенного шару розплаву утворюється міцне суцільне зварне з'єднання. Цей мінімально необхідний час  $T_g$  назвемо часом гомогенізації.

Терміни «заліковування», «герметизація» для процесу зникнення поверхні розділу між однотипними розплавами полімерів, що контактують

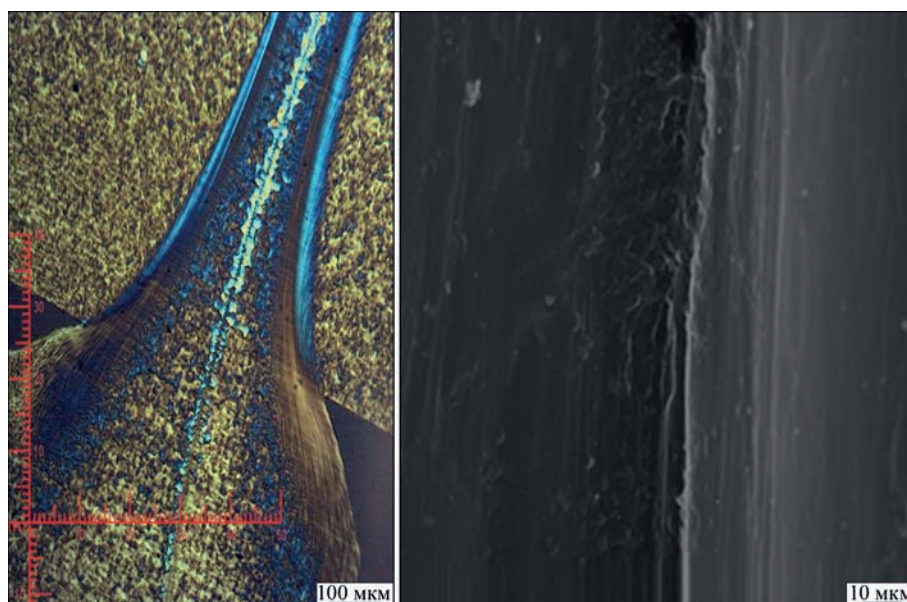


Рис. 11. Оптична та електронна мікроскопії зварних швів полімеру [25]

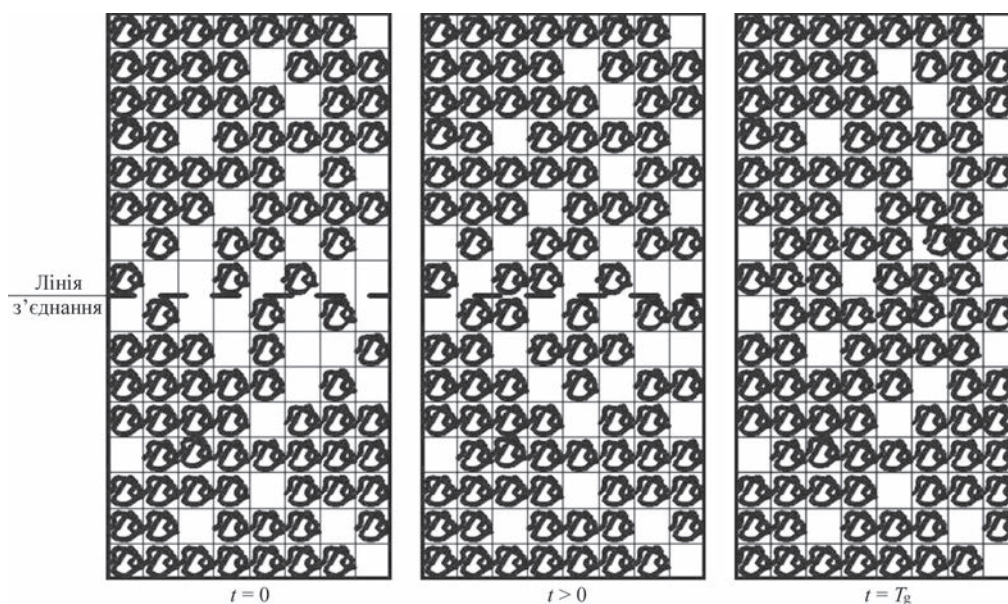


Рис. 12. Модель гомогенізації перехідного шару на межі розділу фаз при зварюванні полімерів за ваканційно-конформаційним принципом

ми вважаємо недостатньо точними. Насправді відбувається, хоча й неповне але вирівнювання об'ємно-просторових властивостей молекулярної будови розплавленого полімеру, розподіл фрагментів макромолекул стає більш однорідним, гомогенним. Тому, процес, що відбувається у тонкому шарі перехідної зони зварювання слід вважати вирівнюванням властивостей розплаву, тобто «гомогенізацією».

Вище було відзначено, що для формування кристалічного утворення при охолодженні розплаву полімеру, окремі молекулярні ланцюги повинні мати змогу переміщуватись у розплаві відносно своїх сусідів. Рух макромолекулярного ланцюга може мати дві форми: конформаційні повороти окремих частин молекули відносно власних хімічних зв'язків та поступальне переміщення ланцюга відносно загального молекулярного клубка. Обидва рухи можна розглядати як явище самодифузії, що ініціюється тепловими процесами.

Слід відзначити, що запропонована модель гомогенізації перехідного шару на межі розділу фаз при зварюванні полімерів за вакаційно-конформаційним принципом може бути доповнена розробкою математичної моделі для визначення придатних режимів зварювання різноманітних полімерних матеріалів.

## Висновки

1. Визначено, що процес зварювання пластмас як поступове зникнення на молекулярному рівні проміжку між деталями, що з'єднуються та формування між ними перехідного шару (зварного шва), структура якого міцна, однак суттєво відрізняється від структури основного полімерного матеріалу.

3. Сьогодні існує декілька теорій щодо природи та механізмів процесу зварювання пластмас, кожна з яких має непряме експериментальне обґрунтування, але не має узагальнюючого характеру. Тому в даний час актуальним є продовження дослідження структури і властивостей зварних з'єднань пластмас з метою отримання фундаментальних даних для доповнення теоретичних основ зварювання полімерних матеріалів.

3. Дискусійним питанням залишається можливість та механізм дифузії фрагментів молекулярного ланцюга, що є визначальним для розуміння механізму процесу зварювання полімерів. Вочевидь, для процесу «розмивання» межі розподілу при зварюванні полімерів замість поширеного визначення «заліковування» більш точним буде визначення «гомогенізація», тобто вирівнювання властивостей.

4. Існуючі на даний час моделі утворення зварних з'єднань полімерів беруть за основу різні фі-

зичні феномени – взаємну адгезію субстратів, дифузію макромолекул, реологію розплаву. Ми вважаємо найбільш реалістичною теорію утворення зварних з'єднань полімерів за рахунок конформаційних перетворень фрагментів макромолекул. У розвиток конформаційної теорії, що розробляється науковою школою ІЕЗ, запропоновано модель гомогенізації перехідного шару на межі розділу фаз при зварюванні полімерів за вакаційно-конформаційним принципом.

## Список літератури

1. Николаев Г.А. (1978) *Сварка в машиностроении: Справочник в 4-х томах*. Москва, Машиностроение.
2. Патон Б.Є. (2018) *Словник-довідник зі зварювання та склеювання пластмас*. Київ, Наукова думка.
3. Комаров Г.В. (2006) *Соединения деталей из полимерных материалов*. Москва, Профессия.
4. ISO 472:2013 *Plastics – Vocabulary*. Geneva.
5. Гришин Н.А., Воюцкий С.С., Гудимов М.М. (1957) *О механизме сваривания органических стекол*. Доклады Академии наук СССР, 116, 4, 629–632.
6. Воюцкий С.С. (1960) *Аутогезия и адгезия высокополимеров*. Москва, Ростехиздат.
7. Гришин Н.А. (1963) *Свариваемость термопластов. Высокмолекулярные соединения*, 3, 33–35.
8. Wool, R.P., O'Connor, K.M. (1981) A theory of crack healing in polymers. *Journal of Applied Physics*, 52, 10, 5953–5963.
9. Липатов Ю.С., Привалко В.П. (1976) О возможности складывания макромолекул в аморфных полимерах. *Высокомолекулярные соединения*, 18, А(5), 991–996.
10. Yeh, G.S.Y. (1972) A structural model for the amorphous state of polymers. Folded-chain fringed micellar grain model. *Journal of Macromolecular Science*, 6, 2, 3, 465–468.
11. Wool, R.P. (1995) *Polymer Interfaces: Structure and Strength*. Hanser Publishers.
12. Вольнский А.Л., Бакеев Н.Ф. (2009) Залечивание межфазной поверхности в полимерных системах. *Высокомолекулярные соединения*, серия А, 51, 10, 1783–1816.
13. Grevell, D. (2007) Welding of plastics: fundamentals and new developments. *International polymer processing*, XXII, 43–46.
14. Жен де П. (1982) *Идеи скейлинга в мире полимеров*. Москва, Мир.
15. Губенко С.И., Журавлев С.И., Коновалов Н.А. (2014) О физической природе возникновения дефектов типа «матовые пятна» при контактной сварке магистральных трубопроводов из феррито-перлитных сталей. *Металлофизика и новейшие технологии*, 36(5), 661–688.
16. Зайцев К.И. (1973) Механизм образования соединений при контактной сварке оплавлением. *Автоматическая сварка*, 9, 29–30.
17. Липатов Ю.С. (1977) *Физическая химия наполненных полимеров*. Москва, Химия.
18. Чалых А.Е. (1987) *Диффузия в полимерных системах*. Москва, Химия.
19. Комаров Г.В. (2015) Состав и свойства полимерных материалов, влияющие на их свариваемость. *Полимерные материалы*, 9, 44–48.
20. Гринюк В.Д., Шадрин А.А., Кораб Г.Н. (1992) Молекулярный механизм образования сварных соединений термопластичных материалов. *Автоматическая сварка*, 7–8, 33–36.
21. Galchun, A., Korab, N., Kondratenko, V. et al. (2015) Nano-structurization and thermal properties of polyethylenes' welds. *Nanoscale Research Letters*, 10, 138–144. <https://doi.org/10.1186/s11671-015-0832-4>
22. Demchenko, V., Iurzhenko, M., Shadrin, A. et al. (2017) Relaxation behavior of polyethylene welded joints. *Ibid*, 12, 280–285. <https://doi.org/10.1186/s11671-017-2059-z>
23. Iurzhenko, M. (2018) Novel theory of plastics welding and its application. *10<sup>th</sup> International conference Advanced Materials and Technologies: from idea to market*, 24–26 October 2018. Ningbo, China.



24. Hosemann, R. (1882) Dependence of the change in the free enthalpy on the lattice number with the formation of microparacrystals. *Colloid and Polymer Science*, **9**, 864–870.

## References

- Nikolaev, G.A. (1978) *Welding in machine-building: Handbook in 4 Vol.* Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
- Paton, B.E. (2018) *Dictionary and reference book on welding and gluing of plastics.* Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
- Komarov, G.V. (2006) *Connections of parts from polymer materials.* Moscow, Professiya [in Russian].
- ISO 472:2013 Plastics – Vocabulary. Geneva.
- Grishin, N.A., Voyutskii, S.S., Gudimov, M.M. (1957) On mechanism of welding of organic glasses. *Doklady AN SSSR*, **116(4)**, 629–632 [in Russian].
- Voyutskii, S.S. (1960) *Autohesion and adhesion of high polymers.* Moscow, Rostekhzdat [in Russian].
- Grishin, N.A., (1963) Weldability of thermoplasts. *Vysokomolekulyarnye Soedineniya*, **3**, 33–35.
- Wool, R.P., O'Connor, K.M. (1981) A theory of crack healing in polymers. *J. of Applied Physics*, **52(10)**, 5953–5963.
- Lipatov, Yu.S., Privalko, V.P. (1976) On possibility of folding of macromolecules in amorphous polymers. *Vysokomolekulyarnye Soedineniya*, **18, A(5)**, 991–996 [in Russian].
- Yeh, G.S.Y. (1972) A structural model for the amorphous state of polymers. Folded-chain fringed micellar grain model. *J. of Macromolecular Sci.*, **6, 2(3)**, 465–468.
- Wool, R.P. (1995) *Polymer Interfaces: Structure and Strength.* Hanser Publishers.
- Volynsky, A.L., Bakeev, N.F. (2009) Healing of interphase surface in polymer systems. *Vysokomolekulyarnye Soedineniya, series A*, **51(10)**, 1783–1816 [in Russian].
- Grevell, D. (2007) Welding of plastics: Fundamentals and new developments. *Int. Polymer Processing*, **XXII**, 43–46.
- Gennes de P. (1982) Ideas of scaling in polymer world. Moscow, Mir [in Russian].
- Gubenko, S.I., Zhuravlev, S.I., Kononov, N.A. (2014) On physical nature of appearance of “dead spot” type defects in resistance welding of main pipelines from ferritic-pearlitic steels. *Metallofizika i Novejshe Tekhnologii*, **36(5)**, 661–688 [in Russian].
- Zajtsev, K.I. (1973) Mechanism of joint formation in flash butt welding. *Avtomatich. Svarka*, **9**, 29–30 [in Russian].
- Lipatov, Yu.S. (1977) *Physical chemistry of filled polymers.* Moscow, Khimiya [in Russian].
- Chalykh, A.E. (2015) *Diffusion in polymer systems.* Moscow, Khimiya [in Russian].
- Komarov, G.V. (2015) Composition and properties of polymer materials affecting their weldability. *Polimernye Materialy*, **9**, 44–48 [in Russian].
- Grinyuk, V.D., Shadrin, A.A., Korab, G.N. (1992) Molecular mechanism of formation of thermoplastic material welded joints. *Avtomatich. Svarka*, **7-8**, 33-36 [in Russian].
- Galchun, A., Korab, N., Kondratenko, V. et al. (2015) Nano-structurization and thermal properties of polyethylenes' welds. *Nanoscale Research Letters*, **10**, 138–144. <https://doi.org/10.1186/s11671-015-0832-4>
- Demchenko, V., Iurzhenko, M., Shadrin, A. et al. (2017) Relaxation behavior of polyethylene welded joints. *Ibid.*, **12**, 280–285. <https://doi.org/10.1186/s11671-017-2059-z>
- Iurzhenko, M. (2018) Novel theory of plastics welding and its application. In: *Proc. of 10<sup>th</sup> Int. Conf. Advanced Materials and Technologies: From Idea to Market (Ningbo, China, 24–26 October 2018)*.
- Hosemann, R. (1882) Dependence of the change in the free enthalpy on the lattice number with the formation of microparacrystals. *Colloid and Polymer Sci.*, **9**, 864–870.

## MODERN MODELS OF FORMATION OF POLYMER WELDED JOINTS MATERIALS (Review)

M.G. Korab, M.V. Yurzhenko, V.L. Demchenko, Ye.P. Mamunya

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

The process of welding plastics is determined as a gradual disappearance of the boundary interface between parts to be joined and the formation of a transition layer between them, whose structure is significantly different from the structure of the base polymeric material. The models of formation of welded joints of polymers existing for today are based on different physical phenomena: mutual adhesion of substrates, diffusion of macromolecules and melt rheology. The most common is the diffusion model of macromolecules reptation in the welding zone, which many researchers refer to in order to explain experimental data. Without denying the possibility of progressive diffusion of elements of the molecular chain through the fusion surface, the position that this diffusion provides the main mass transfer during the formation of joints of welded polymers is considered to be controversial. The theory of the formation of welded joints of polymers due to conformational transformations of macromolecule fragments, being developed by the Scientific School of the PWI, is more realistic. In the development of this conformational theory, the model of homogenization of the transition layer at the boundary interface of the phases during welding of polymers is proposed based on a vacation and conformation principle. 24 Ref., 12 Fig.

**Keywords:** polymeric materials, welding, diffusion of macromolecules, conformational transformations

Надійшла до редакції 02.01.2023



## CUTTING WORLD 2023 – ВИСТАВКА ПРОФЕСІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ РІЗАННЯ

25-27 квітня 2023, Ессен, Німеччина

Оцифровка є одним із основних напрямків Cutting World 2023. Цифровізація пропонує численні переваги, особливо для промисловості, будь-то оптимізація процесів, економія чи оптимізоване обслуговування клієнтів. Цифрові інновації допоможуть компаніям ідеально підготуватися до викликів і вимог їхнього бізнесу.

Експонент Tailor Steel, наприклад, зосереджується на покращенні обслуговування клієнтів завдяки оцифровці. TailorSteel є провідним європейським виробником нестандартного крою металевих листів, труб та окантовки. Завдяки порталу Sophia® клієнти можуть розмістити свої замовлення онлайн цілодобово, отримати ціну всього за одну хвилину та отримати продукцію протягом 48 годин.

На додаток до TailorSteel компанії Air Liquide, Boschert, ESAB, FICER, Hypertherm, Lantek, Maximator Jet, Mazak, Messer Cutting Systems і Voortman, які представляють свої продукти та послуги на Cutting World, звітують про свій досвід роботи з цифровими процесами.

Додаткову інформацію про виставку можна знайти на [www.cuttingworld.de](http://www.cuttingworld.de)