

В. С. ПАРНЕНКО

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри конструювання машин  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
ORCID: 0000-0002-1450-2744

Є. В. КОРБУТ

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри конструювання машин  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
ORCID: 0000-0002-1221-4052

## ЕКОЛОГІЧНО ОРІЄНТОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ З'ЄДНАННЯ ТА СКЛАДАННЯ У КОНТЕКСТІ СТАЛОГО ВИРОБНИЦТВА

У статті виконано огляд екологічно орієнтованих технологій з'єднання та складання як одного з ключових інструментів упровадження принципів сталого виробництва та циркулярного дизайну. Показано, що саме рішення щодо типу з'єднання (розбірні механічні, нерозбірні, гібридні та керовано-роз'ємні) визначають ремонтпридатність виробів, можливість модульної заміни компонентів, ресурсоефективність технічного обслуговування, а також реалістичність демонтажу і розділення матеріалів наприкінці життєвого циклу. З позицій життєвого циклу виробу проаналізовано, як вибір з'єднань впливає на формування «чистих» матеріальних потоків для повторного використання та перероблення, і чому традиційні нерозбірні вузли (зокрема клейові системи з високою стійкістю та заливки) часто стають бар'єром для циркулярності, спричиняючи руйнівний демонтаж, змішування матеріалів і втрату цінності вторинної сировини.

Окрему увагу приділено сучасним напрямкам «екологізації» адгезивних технологій: зменшенню токсичності та емісій, відмові від небезпечних компонентів, оптимізації енергомісткості процесів полімеризації, а також розвитку керовано-роз'ємних (*debonding-on-demand*) клейових систем, здатних забезпечувати міцність у експлуатації та прогнозоване роз'єднання під час ремонту або перероблення. Наголошено, що практична ефективність таких рішень визначається не лише адгезійною міцністю, а й довготривалою надійністю, стабільністю властивостей при старінні, технологічною відтворюваністю та можливістю масштабування у масовому виробництві. Розглянуто приклади галузей, у яких екологічні вимоги найбільше впливають на технології складання: автомобілебудування (модульні вузли, багатоматеріальні конструкції), електроніка (ремонтпридатність, зменшення електронних відходів), а також протезування і медичні вироби (біосумісні полімери та сумісність екологічних рішень із вимогами безпеки людини).

У результаті узагальнено ключові критерії вибору технологій з'єднання для сталого виробництва та сформульовано проблемні питання, що потребують подальших досліджень: недостатня формалізація інженерних метрик демонтажності й ремонтпридатності на рівні вузла, обмеженість кількісних моделей екологічної доцільності LCA та LCI (Life Cycle Assessment – оцінювання життєвого циклу та Life Cycle Inventory – інвентаризація життєвого циклу) для порівняння альтернативних з'єднань, а також дефіцит довгострокових експериментальних даних щодо керованого роз'єднання адгезивних систем. Зроблено висновок, що найбільш перспективними є комплексні стратегії, які поєднують модульність, розбірність, гібридні з'єднання та реверсивні адгезивні рішення з обов'язковим врахуванням сценаріїв ремонту й *end-of-life* на ранніх етапах проектування.

**Ключові слова:** стале виробництво; циркулярний дизайн; технології з'єднання; складання; демонтажність; ремонтпридатність; екологічні клеї; життєвий цикл.

V. S. PARNENKO

PhD (Engineering), Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Machine Design  
National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
ORCID: 0000-0002-1450-2744



Ye. V. KORBUT

PhD (Engineering), Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Machine Design  
National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
ORCID: 0000-0002-1221-4052

## ENVIRONMENTALLY ORIENTED JOINING AND ASSEMBLY TECHNOLOGIES IN THE CONTEXT OF SUSTAINABLE MANUFACTURING

*The paper provides a review of environmentally oriented joining and assembly technologies as a crucial engineering lever for implementing sustainable manufacturing and circular design principles. It is demonstrated that decisions on the type of joints – detachable mechanical fasteners, permanent joints, hybrid solutions, and controlled-release (reversible) bonding – largely determine product repairability, the feasibility of modular component replacement, the resource efficiency of maintenance operations, and the practicality of end-of-life disassembly and material separation. From a life-cycle perspective, the study highlights how joining solutions affect the formation of “clean” material streams suitable for reuse and recycling, and why conventional permanent joints (including highly durable adhesive bonds and encapsulation/potting compounds) often become a barrier to circularity by forcing destructive disassembly, mixing materials, and reducing the value of secondary raw materials.*

*Particular attention is paid to current trends in “greening” adhesive technologies: reducing toxicity and emissions, avoiding hazardous constituents, lowering the energy intensity of curing processes, and developing debonding-on-demand adhesive systems that combine high in-service performance with predictable separation during repair or recycling stages. The review emphasizes that the industrial viability of such systems depends not only on adhesion strength, but also on long-term reliability, ageing resistance, process repeatability, and scalability under high-throughput manufacturing conditions. The paper discusses representative application contexts where environmental requirements strongly influence assembly choices: automotive manufacturing (modular architectures and multi-material lightweight structures), electronics (repairability and reduction of e-waste), and prosthetics/medical devices (biocompatible polymers and the need to align environmental solutions with strict human safety constraints).*

*As a result, the paper consolidates key criteria for selecting joining and assembly technologies in sustainable manufacturing, and identifies major knowledge gaps requiring further research. These include the lack of standardized, joint-level metrics for disassembly performance and repairability, limited availability of quantitative environmental comparison models (LCA/LCI) for alternative joining strategies, and the shortage of long-term experimental datasets addressing controlled debonding behaviour of reversible adhesive systems under real-life ageing conditions. The review concludes that the most promising direction lies in integrated strategies combining modular design, detachable joints, hybrid joining, and reversible bonding, while explicitly incorporating repair and end-of-life scenarios at early design stages.*

**Key words:** sustainable manufacturing; circular design; joining technologies; assembly; disassembly; repairability; debonding-on-demand; green adhesives; life cycle.

### Вступ

Умови сучасного промислового розвитку визначаються посиленням екологічних вимог до продукції та виробничих процесів упродовж усього життєвого циклу виробу, починаючи від вибору матеріалів і технологій складання до етапів експлуатації, ремонту, демонтажу та утилізації. У цьому контексті технології з'єднання та складання набувають ключового значення, оскільки саме вони часто визначають ремонтпридатність, можливість заміни модулів, рівень повторного використання компонентів і реальність переходу до проектування за принципами циркулярності. Традиційні підходи (нерозбірні з'єднання, клейові системи з токсичними компонентами, складні для розбирання вузли з великою кількістю різних матеріалів) нерідко ускладнюють переробку, підвищують екологічні ризики та збільшують сумарні витрати енергії й ресурсів.

Актуальність дослідження посилюється впливом міжнародних та регіональних стандартів і політик екологічного управління, які стимулюють підприємства переглядати технологічні рішення на користь екологічно орієнтованих альтернатив (зокрема впровадження систем екологічного менеджменту на засадах ISO 14001 та стратегічних орієнтирів ЄС у межах EU Green Deal) [1]. Це формує запит на технології з'єднання, що зменшують використання небезпечних речовин, підтримують розбірність і повторне використання вузлів, а також дають змогу кількісно обґрунтовувати екологічний ефект через підходи оцінювання життєвого циклу.

Практична значущість теми підтверджується прикладами галузей із високими вимогами до ефективності та якості, наприклад, автомобілебудуванням (модульне складання й швидка заміна вузлів), електронікою (ремонтпридатність і зниження електронних відходів), а також медичними технологіями та протезуванням (біосумісні полімерні матеріали й безпечні з позиції довкілля технології формування та з'єднання). Систематизація екологічно орієнтованих технологій з'єднання та складання і їхній аналіз у контексті сталого виробництва є своєчасним і необхідним кроком для підвищення конкурентоспроможності виробництв та зменшення екологічного навантаження.

### Постановка проблеми

Попри зростання вимог до екологічності виробництва, у практиці проектування та виготовлення виробів технології з'єднання й складання часто обираються переважно за критеріями міцності, технологічності, вартості та продуктивності, без достатнього врахування наслідків для довкілля на етапах ремонту, модернізації, демонтажу й утилізації. У результаті виникає суперечність між потребою забезпечити надійність і довговічність виробу та необхідністю реалізувати принципи сталого виробництва і циркулярного дизайну, які передбачають зменшення токсичності матеріалів, скорочення відходів, підвищення частки повторного використання компонентів і можливість ефективного розділення матеріалів.

Проблема полягає в тому, що багато поширених рішень (нерозбірні клейові або комбіновані з'єднання, складні багатоматеріальні вузли, застосування клеїв із леткими органічними сполуками чи інших небезпечних компонентів) ускладнюють сервісне обслуговування та ремонт, роблять демонтаж енергоємним або економічно нецільним, а також знижують якість вторинних матеріалів під час перероблення. Водночас альтернативні екологічно орієнтовані технології, такі як нетоксичні або низькоемісійні клейові системи, розбірні та повторно збірні з'єднання, модульні конструктивні підходи, технології, сумісні з багаторазовим використанням вузлів, потребують систематизованого аналізу з позицій їхньої придатності до різних виробничих сценаріїв.

Таким чином, науково-практичне завдання полягає у визначенні та обґрунтуванні підходів до вибору технологій з'єднання і складання, які одночасно забезпечують необхідні експлуатаційні характеристики виробу та відповідають сучасним екологічним вимогам і стандартам, з урахуванням повного життєвого циклу продукції (виробництво → експлуатація → ремонт → демонтаж → повторне використання/перероблення).

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні наукові публікації у сфері сталого виробництва демонструють перехід від «локальної» оптимізації процесів з'єднання (міцність/вартість/продуктивність) до системного підходу життєвого циклу, де технології складання й демонтажу безпосередньо пов'язують із ремонт придатністю, повторним використанням вузлів і ефективністю перероблення. Цей тренд підтримується як інженерними дослідженнями DFA/DFD (DFA (Design for Assembly) – проектування для складання, DFD (Design for Disassembly) – проектування для розбирання та демонтажу), так і нормативними змінами, що стимулюють ремонт і продовження терміну служби виробів [1].

У роботах із модульного проектування наголошується, що модульність сама по собі не гарантує циркулярності: екологічний ефект проявляється лише тоді, коли критерії складання/розбирання (DFA/DFD) інтегровані на ранніх етапах вибору архітектури виробу. Зокрема, запропоновано розширення підходів Modular Function Deployment з явним урахуванням орієнтації на складання та демонтаж як параметрів оптимізації конструкції [2].

Дослідження з роботизованого демонтажу (в т.ч. кейси щодо батарей електромобілів) показують, що складність і ризики розбирання суттєво залежать від типів з'єднань, доступності кріплень, послідовності операцій та необхідності спеціального оснащення. Це підсилює актуальність інженерних правил проектування для демонтажу як частини сталого виробництва [3].

Велика кількість робіт присвячений клеям, що забезпечують достатню міцність під час експлуатації, але можуть керовано втрачати адгезію під дією заданого стимулу (тепло/світло/механічний вплив). Це розглядається як перспективний шлях до зменшення бар'єрів демонтажу та підвищення відновлюваності компонентів. Прикладом є публікації про термо- та фотоактивовані реверсивні епоксидні системи [4], а також концепції механічно-індукованого «розклеювання» через мікрокапсули у складі адгезиву [5].

У оглядових статтях з автомобільних застосувань підкреслюється, що перехід до легких багатоматеріальних структур (алюміній – сталь – полімери – композити) ускладнює вибір технологій з'єднання та посилює роль гібридних рішень (клей + механічне кріплення) і процесів, що обмежують термічні пошкодження. Такі огляди систематизують технології, як самопробивне заклепування (self-piercing riveting), фрикційних методів зварювання тощо [6].

Європейська Директива (EU) 2024/1799 (Right to Repair) закріплює підхід, за якого ремонт і продовження ресурсу виробу розглядаються як інструмент зменшення відходів і ресурсоспоживання. У тексті прямо пов'язуються вимоги ремонт придатності з конструктивними аспектами, зокрема здатністю до розбирання та доступністю запасних частин. Це створює зовнішній тиск на перехід від нерозбірних вузлів до рішень, сумісних із сервісом і демонтажем [1].

У оглядах з біомедичних полімерів і протезування розглядаються вимоги до біосумісності, деградації, механічних властивостей та технологічності переробки/виготовлення. Хоча екологічний аспект тут підпорядкований медичній безпеці, тренд на матеріали з контрольованими властивостями та потенційно кращими профілями безпеки/утилізації формує підґрунтя для екологізації відповідних технологій з'єднання й складання [7].

Попри активний розвиток підходів до екологічно орієнтованих технологій з'єднання та складання, аналіз сучасних досліджень вказує на наявність аспектів, що залишаються недостатньо опрацьованими або не мають усталених методик практичного впровадження. Насамперед, у багатьох роботах принципи DFA/DFD визнаються важливими, однак у реальних процедурах проектування часто бракує формалізованих алгоритмів вибору

технології з'єднання, які б одночасно враховували експлуатаційну надійність, вартість і продуктивність, а також параметри демонтажу, ремонтпридатності, можливості повторного використання вузлів і якості вторинних матеріалів. Унаслідок цього екологічні критерії нерідко залишаються етапом післяпроектної перевірки, а не рівноправним параметром оптимізації конструкції. Водночас обмежено представлені уніфіковані кількісні моделі, що дозволяли б порівнювати клейові нерозбірні, гібридні та повністю розбірні з'єднання з позицій LCA/LCI, включаючи енерговитрати, викиди, токсикологічний профіль, втрати матеріалу під час розділення, необхідність очищення й сортування, а також вплив на чистоту вторинної сировини. Наявні результати часто мають локальний характер для конкретних матеріалів або виробів і погано переносяться на інші виробничі сценарії. Окремою не вирішеною проблемою є довготривала надійність керовано-роз'ємних (debonding-on-demand) клейових систем. В таких з'єднаннях є потреба поглиблення дослідження старіння з'єднань у реальних умовах (вологість, температура, циклічні навантаження), стабільності механізмів керованого роз'єднання після тривалого строку служби, ризику залишкових забруднень поверхонь та їх впливу на повторне використання деталей, а також питань масштабованості й відтворюваності процесу у промислових умовах. Недостатньо розвинутими залишаються й стандартизовані інженерні показники ремонтпридатності та демонтажності, прив'язані саме до технологій з'єднання на рівні вузла (час і кількість операцій розбирання, потреба у спеціальному інструменті, доступність зони з'єднання, ймовірність пошкодження компонентів, придатність кріплень до повторного застосування), що ускладнює порівняння альтернативних рішень і створення єдиних критеріїв для промисловості. Крім того, порівняно мало системних робіт присвячено технологічній сумісності, так званих, зелених з'єднань, із високопродуктивним масовим виробництвом, адже екологічно дружні клеї чи повністю розбірні вузли можуть вимагати додаткових операцій, змінених режимів полімеризації або підвищених вимог до підготовки поверхонь, що впливає на цикл, контроль якості та економіку процесу. Нарешті, у виробках медичного призначення та протезуванні домінують вимоги біосумісності й безпеки, тоді як питання циркулярності (демонтаж, повторне використання модулів, екологічність клейових систем і компаундів, утилізація полімерів) висвітлюються фрагментарно, що вказує на потребу в підходах, здатних поєднати медичні обмеження з екологічними вимогами без компромісу щодо безпеки для людини.

#### Формулювання мети дослідження

Метою цієї статті є систематизувати екологічно орієнтовані технології з'єднання та складання у контексті сталого виробництва та circular design і показати, як вибір типу з'єднання впливає на ремонтпридатність, можливість демонтажу, повторного використання вузлів і якість перероблення матеріалів протягом життєвого циклу виробу. У межах мети передбачається узагальнити сучасні підходи до, так званих, зелених клейових систем (низькотоксичних/низькоемісійних) і керовано-роз'ємних клейових з'єднань (debonding-on-demand), а також розбірних і модульних конструктивних рішень, що забезпечують відновлюваність та адаптивність виробів.

Для досягнення цієї мети стаття спрямована на виявлення прогалин у наявних дослідженнях і практиках, зокрема щодо недостатньої формалізації критеріїв вибору технологій з'єднання з урахуванням демонтажу та повторного складання, обмеженості кількісних моделей екологічної доцільності (LCA/LCI) для різних типів з'єднань, а також проблем довготривалої надійності реверсивних адгезивних систем і нестачі стандартизованих метрик ремонтпридатності на рівні вузла.

#### Викладення основного матеріалу дослідження

Екологічно орієнтовані технології з'єднання та складання доцільно розглядати не як набір окремих зелених рішень (наприклад, заміна клею на інший клей), а як комплекс інженерних принципів, що забезпечують екологічні переваги впродовж життєвого циклу виробу. На практиці саме з'єднання визначають, чи можна виріб розібрати без руйнування деталей, чи доступні для заміни критичні компоненти, чи реально повторно використати вузли після демонтажу і наскільки чистими залишаться матеріальні потоки для перероблення. Тому у сталому виробництві технологія з'єднання має оцінюватися одночасно за функціональними (міцність, герметичність, точність, довговічність), технологічними (швидкість операцій, автоматизація, стабільність якості, вимоги до поверхонь) та екологічними критеріями (токсичність/емісії, енергомісткість, ремонтпридатність, демонтажність, повторне використання, придатність до перероблення).

Ключовим методологічним підходом є прив'язка рішень зі складання до логіки повного життєвого циклу. У спрощеному вигляді екологічний життєвий цикл виробу з урахуванням з'єднань може бути поданий як послідовність: вибір матеріалів і типу з'єднань → складання та контроль якості → експлуатація і технічне обслуговування → ремонт/модернізація (заміна модулів) → демонтаж (роз'єднання) → сортування матеріалів і компонентів → повторне використання вузлів/перероблення → повернення матеріалів у виробництво (рис. 1). На кожному з етапів з'єднання виступає або полегшувачем циркулярності (коли доступні розбірні та повторно-збірні рішення), або блокатором (коли нерозбірність призводить до руйнування деталей, змішування матеріалів і зниження цінності вторинної сировини).

З позиції конструктора й технолога екологічно орієнтовані рішення можна умовно поділити на кілька груп.



Рис. 1. Екологічний життєвий цикл виробу [8]

Перша група, це розбірні механічні з'єднання (гвинтові, замкові, байонетні, клинові, пружинні фіксатори тощо), які забезпечують можливість багаторазового розбирання, ремонту та модульної заміни вузлів. Їхня сильна сторона, це прогнозованість демонтажу та висока ремонтпридатність, а слабкими місцями може бути потенційне збільшення маси/габаритів, вища кількість деталей, ризики самовідгвинчування без належних заходів та потреба в контролі моментів затягування. До другої групи можна віднести нерозбірні з'єднання (зварювання, пайка, заклепки одноразового застосування, традиційні клеї, заливки), які часто забезпечують високу міцність і швидкість складання, але ускладнюють end-of-life процеси. Третя група, це керовано-роз'ємні або реверсивні рішення, що намагаються поєднати переваги перших двох, тобто високу експлуатаційну надійність та можливість роз'єднання за заданим сценарієм (наприклад, під час сервісу або перероблення). До них належать debonding-on-demand клейові системи, модифіковані адгезиви, технології тимчасового фіксування, а також конструктивні інженерні компроміси, коли вузол має захисний/доступний інтерфейс для розбирання.

Особливе місце займають клейові технології, оскільки вони одночасно мають значний потенціал для оптимізації маси та конструкції (особливо в багатоматеріальних виробках) і водночас створюють найбільше проблем для циркулярності. Екологічна орієнтація клейових систем включає декілька напрямів: мінімізацію токсичних компонентів і шкідливих емісій, відмову від небезпечних розчинників, оптимізацію режимів полімеризації для зниження енерговитрат, а також забезпечення чистого розділення на етапі демонтажу. У практичному вимірі це означає, що вибір клею не може обмежуватися показниками адгезійної міцності. Необхідно враховувати також поведінку з'єднання при старінні, можливість ремонту (локальне відновлення шару), сумісність із матеріалами, і що є критичним, як воно буде роз'єднуватися. Саме тому зростає інтерес до керовано-роз'ємних клейових систем, де роз'єднання може бути активоване контрольованим впливом. Для циркуляційного дизайну важливими є два критерії: по-перше, щоб роз'єднання не руйнувало деталі і не залишало залишків, які важко видалити, а по-друге, щоб процедура була технологічно реальною в сервісних і переробних умовах.

Однак у промисловості часто найкращі результати дають не чисті підходи, а гібридні з'єднання, що поєднують, наприклад, клейове з'єднання з механічним фіксатором. Така стратегія може зменшити масу та підвищити жорсткість, одночасно забезпечуючи сценарій демонтажу: механічний елемент задає напрямок/послідовність розбирання, а клейова складова забезпечує демпфування та розподіл напружень. Екологічна цінність гібридних рішень виникає тоді, коли вони проектуються не лише під складання, а й під розбирання, тобто це доступність кріплень, можливість стандартного інструмента, унеможливлення пошкоджень при від'єднанні та мінімізація змішування матеріалів.

Важливим організаційним і нормативним тлом виступають системи екологічного менеджменту та політики сталого розвитку, що стимулюють підприємства формувати вимоги до технологій на рівні процесів і постачальницьких



Рис. 2. Екологічно орієнтовані рішення в процесах з'єднань та складань

ланцюгів. У реальному виборі технологій це проявляється через потребу контролю небезпечних речовин, зменшення відходів, обліку споживання енергії та документування екологічних характеристик матеріалів і процесів. У такій логіці технології складання переходять із локального рішення технолога в площину міжфункціональної оптимізації, де бере участь конструктор, технолог, еколог/фахівець із якості та підрозділ закупівель.

Розглянемо приклади, де зв'язок між екологічністю та технологіями з'єднання проявляється найбільш наочно. В автомобільній галузі актуальними є модульні підходи та можливість заміни вузлів, що скорочує час ремонту і зменшує обсяг відходів через відновлення, а не заміну всього виробу. Тут важливо, щоб модульність не була номінальною. Модулі мають бути доступними, з'єднання повинні бути розбірними у запланованій послідовності, а використані матеріали вибирається такими, щоб демонтаж не перетворювався на руйнівний процес. У разі використання багатоматеріальних структур критичною стає стратегія розділення матеріалів наприкінці життєвого циклу. Якщо з'єднання змішують потоки (наприклад, пластик + метал без можливості розділення), це знижує цінність вторинної сировини. Для сталого виробництва в автоіндустрії важливим є баланс, тобто міцність/безпека та ресурсоефективність у виробництві мають бути узгоджені з керованим демонтажем і ремонтом.

В електроніці проблема ще гостріша, оскільки пристрої часто мають високу щільність компонування, крихкі елементи та різні матеріали. Нерозбірні клеєні або залиті вузли ускладнюють ремонт і сприяють переходу від ремонту до заміни, що збільшує електронні відходи. Екологічно орієнтовані технології з'єднання в електроніці передбачають конструктивні рішення, які забезпечують доступ до компонентів, мінімізують руйнівні операції та спрощують заміну типових елементів (акумуляторів, дисплеїв, модулів). Технічно це означає стандартизацію кріплення, оптимізацію доступу, контроль зусиль/моментів розбирання, а також використання адгезивів і ущільнювачів, що допускають сервісне роз'єднання без пошкоджень. Саме тут реверсивні/керовано-роз'ємні клеї можуть дати відчутний ефект, якщо вони забезпечують прогнозований сценарій демонтажу і не погіршують надійність.

У протезуванні та медичних виробках екологічна орієнтація технологій з'єднання повинна бути сумісною з найжорсткішими вимогами безпеки для людини. З одного боку, зростає інтерес до біосумісних полімерів і композитів, а також до технологій, що мінімізують токсичні компоненти та ризики небезпечних виділень. А з іншого боку ці вироби часто потребують індивідуалізації, сервісного підлаштування та заміни окремих модулів (наприклад, елементів кріплення, накладок, вузлів регулювання). Відповідно, екологічно орієнтовані рішення можуть полягати в модульній архітектурі, яка дозволяє замінювати зношені частини без виготовлення нового виробу повністю, а також у виборі матеріалів і способів з'єднання, що не ускладнюють безпечну утилізацію. У цьому сегменті важливо підкреслити, що екологічність не може досягатися за рахунок біомеханічної надійності. Слід шукати рішення, які одночасно спрощують сервіс і зменшують матеріаломісткість та відходи.

Для обґрунтованого вибору технологій з'єднання в контексті сталого виробництва доцільно застосовувати узгоджену схему критеріїв (рис. 3). Практично зручно розділити їх на: експлуатаційні (міцність, довговічність, стійкість до середовища), виробничі (час циклу, автоматизація, контроль якості, потреба в підготовці поверхні, ремонтпридатність процесу), сервісні (доступність, інструментальність, повторне складання), end-of-life

(демонтажність, можливість розділення матеріалів, чистота матеріальних потоків, придатність до повторного використання вузлів) та екологічно-гігієнічні (емісії, токсичність, безпека роботи, утворення відходів). У межах цієї статті ключовим є саме взаємозв'язок сервісних і end-of-life критеріїв із технологією з'єднання: якщо виріб можна ремонтувати та розбирати без руйнування – це зазвичай зменшує сумарне ресурсоспоживання навіть тоді, коли первинне складання є трохи складнішим [3].

Таким чином можна зробити наступне узагальнення. Екологічно орієнтовані технології з'єднання та складання формують інженерну основу сталого виробництва через три взаємопов'язані механізми, якими є зменшення екологічної небезпеки матеріалів і процесів, підвищення ремонтпридатності та продовження ресурсу виробу, а також забезпечення демонтажу й розділення матеріалів для повторного використання та перероблення.

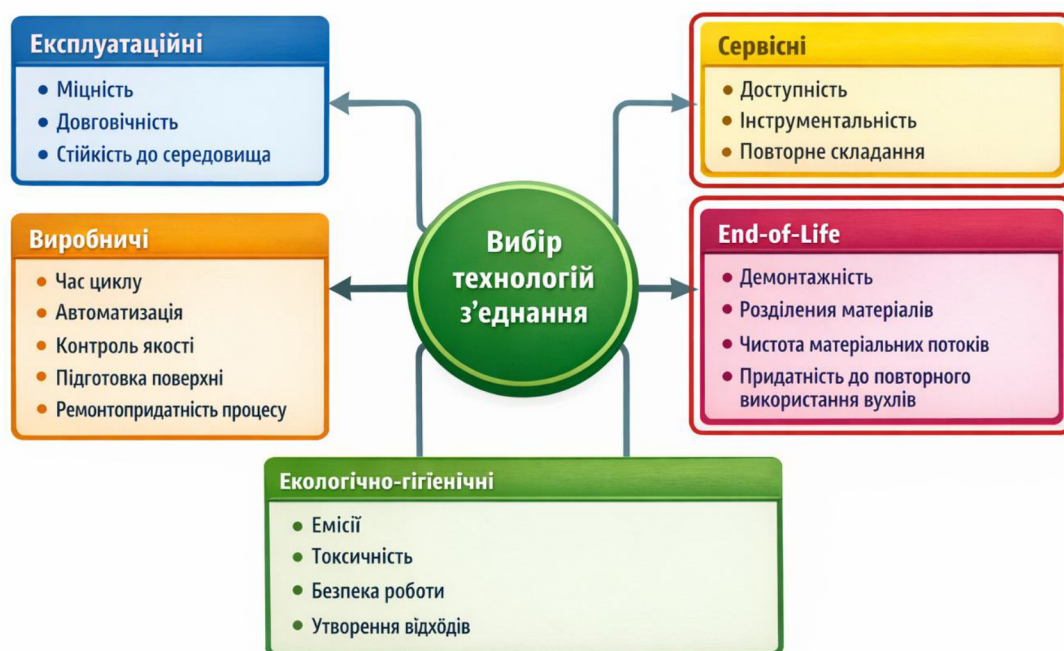


Рис. 3. Критерії вибору технологій з'єднання в контексті сталого виробництва

Найперспективнішими виглядають підходи, що поєднують модульність, розбірність, керовано-роз'ємні адгезивні технології та кількісну оцінку рішень у логіці життєвого циклу, оскільки саме вони дозволяють узгодити виробничу ефективність із вимогами циркулярної економіки.

#### Висновки

Екологічно орієнтовані технології з'єднання та складання є одним із визначальних чинників реалізації сталого виробництва, оскільки саме тип з'єднання значною мірою задає ремонтпридатність виробу, можливість модульної заміни компонентів, ефективність демонтажу та якість розділення матеріалів наприкінці життєвого циклу. Показано, що традиційні нерозбірні рішення (частина клейових систем, заливки, нероз'ємні комбіновані вузли) часто виступають бар'єром для circular design, оскільки ускладнюють відновлення та повторне використання вузлів і знижують цінність вторинної сировини через змішування матеріалів і забруднення поверхонь.

Узагальнення сучасних підходів дозволяє стверджувати, що найбільш перспективними є конструктивно-технологічні стратегії, які поєднують модульність, розбірність та керовано-роз'ємні (debonding-on-demand) адгезивні рішення, за умови підтвердження їх довготривалої надійності та промислової масштабованості. Обґрунтовано необхідність переходу від вибору технологій з'єднання лише за критеріями міцності й продуктивності до багато-критеріальної оцінки з урахуванням екологічних параметрів, сервісних сценаріїв і end-of-life процесів, включно з кількісними підходами LCA/LCI та метриками демонтажності/ремонтпридатності на рівні вузла.

Встановлено, що нормативні вимоги та політики сталого розвитку стимулюють перегляд технологічних рішень у галузях із високою інтенсивністю використання ресурсів та відходоутворення (автомобілебудування, електроніка), а також формують додаткові обмеження і можливості для медичних виробів та протезування, де екологічність має бути сумісною з біосумісністю та безпекою. Подальші дослідження доцільно спрямувати на формалізацію методик вибору технологій з'єднання з урахуванням демонтажу і повторного складання, розроблення стандартизованих показників ремонтпридатності/демонтажності та накопичення експериментальних даних щодо старіння і керованого роз'єднання реверсивних адгезивних систем у реальних умовах експлуатації.

## Список використаної літератури

1. Directive (EU) 2024/1799 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 on common rules promoting the repair of goods and amending Regulation (EU) 2017/2394 and Directives (EU) 2019/771 and (EU) 2020/1828 (Text with EEA relevance) // *Official Journal of the European Union*. 2024. OJ L, 10.07.2024. Документ 32024L1799. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1799/oj1> Дата звернення: 22.12.2025.
2. Monetti F. M. Evaluating an assembly- and disassembly-oriented expansion of Modular Function Deployment through a workshop-based assessment : arXiv preprint. 2025. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2505.01762> 1 Дата звернення: 18.01.2026.
3. Rastegarpanah A., Contreras C. A., Stolkin R. Semi-autonomous Robotic Disassembly Enhanced by Mixed Reality : arXiv preprint. 2024. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://arxiv.org/pdf/2405.035301> Дата звернення: 08.01.2026.
4. Knight S. J. (Lindholm), McCoy J. D., Chowdhury S. та ін. Debonding-on-demand reversible adhesives via heat or light with competitive adhesion strength to conventional epoxy adhesives // *Polymer Testing*. 2025. Vol. 146. Art. 108776. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2025.108776
5. Stamp C.-H. та ін. Adhesives with Debonding-On-Demand Capability: Leveraging Responsive Microcapsules for Mechanically-Induced Debonding // *Advanced Materials*. 2025. Vol. 37, No. 13. Art. 2414308. DOI: 10.1002/adma.202414308
6. Lambiase F., Scipioni S. I., Lee C.-J. та ін. A State-of-the-Art Review on Advanced Joining Processes for Metal-Composite and Metal-Polymer Hybrid Structures // *Materials*. 2021. Vol. 14, No. 8. Art. 1890. DOI: 10.3390/ma14081890
7. Ornaghi Jr H. L., Monticeli F. M., Dall Agnol L. та ін. A Review on Polymers for Biomedical Applications on Hard and Soft Tissues and Prosthetic Limbs // *Polymers (Basel)*. 2023. Vol. 15, No. 19. Art. 4034. DOI: 10.3390/polym15194034
8. Жива планета. United for Nature. Agenda for Ukraine: управління відходами та запровадження циркулярної економіки [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://livingplanet.org.ua/novuny/united-for-nature-agenda-for-ukraine-upravlinnya-vidkhodami-ta-zaprovadzhennya-tsirkulyarnoji-ekonomiki> Дата звернення: 12.12.2025.

## References

1. The European Parliament and the Council of the European Union. (2024). Directive (EU) 2024/1799 of 13 June 2024 on common rules promoting the repair of goods and amending Regulation (EU) 2017/2394 and Directives (EU) 2019/771 and (EU) 2020/1828. *Official Journal of the European Union*, L.
2. Monetti, F. M. (2025). *Evaluating an assembly- and disassembly-oriented expansion of Modular Function Deployment through a workshop-based assessment* (arXiv:2505.01762). arXiv.
3. Rastegarpanah, A., Contreras, C. A., & Stolkin, R. (2024). *Semi-autonomous robotic disassembly enhanced by mixed reality* (arXiv:2405.03530). arXiv. ()
4. Knight, S. J. (Lindholm), McCoy, J. D., Chowdhury, S., & Lee, Y. (2025). Debonding-on-demand reversible adhesives via heat or light with competitive adhesion strength to conventional epoxy adhesives. *Polymer Testing*, 146, 108776. doi:10.1016/j.polymertesting.2025.108776
5. Stamp, C.-H., Stumpp, J., & Calvino, C. (2025). Adhesives with debonding-on-demand capability: Leveraging responsive microcapsules for mechanically-induced debonding. *Advanced Materials*, 37(13), 2414308. <https://doi.org/10.1002/adma.202414308>
6. Lambiase, F., Scipioni, S. I., Lee, C.-J., Ko, D.-C., & Liu, F. (2021). A state-of-the-art review on advanced joining processes for metal-composite and metal-polymer hybrid structures. *Materials*, 14(8), 1890. doi:10.3390/ma14081890
7. Ornaghi Jr, H. L., Monticeli, F. M., & Dall Agnol, L. (2023). A review on polymers for biomedical applications on hard and soft tissues and prosthetic limbs. *Polymers*, 15(19), 4034. doi:10.3390/polym15194034 ()
8. Living Planet (2024, February 1). United for Nature. Agenda for Ukraine. Retrieved (12.12.2025), from <https://livingplanet.org.ua/novuny/united-for-nature-agenda-for-ukraine-upravlinnya-vidkhodami-ta-zaprovadzhennya-tsirkulyarnoji-ekonomiki>

Дата першого надходження статті до видання: 18.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026