

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2026-64-38>

УДК: 621.382

Часник Дмитро Васильович¹, провідний науковий співробітник

<https://orcid.org/0000-0002-3608-3122>

¹Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України, м. Київ, Україна

НОВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПОВЕРХНЕВОГО МОНТАЖУ, ЛАЗЕРНОГО ПАЯННЯ ТА КОРПУСУВАННЯ ВИРОБІВ МІКРОЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

Часник Д. В. Новітні технології поверхневого монтажу, лазерного паяння та корпусування виробів мікроелектронної техніки. У статті представлено результати комплексного дослідження сучасних технологій монтажу, паяння та корпусування мікроелектронних виробів у контексті зростаючих вимог до щільності інтеграції, надійності та енергоефективності електронних систем. У процесі дослідження проаналізовано сучасні тенденції розвитку SMT-технологій, лазерного паяння та методів корпусування типу system-in-package і тривимірної інтеграції. Обґрунтовано переваги використання волоконних і діодних лазерів для локалізованого теплового впливу, що дозволяє мінімізувати термічні деформації та деградацію матеріалів підкладок і контактних майданчиків. Запропоновано функціональну модель технологічного процесу, яка інтегрує послідовні етапи проектування, підготовки плат, SMT-монтажу, лазерного доопрацювання, корпусування, контролю та фінального тестування із застосуванням зворотних зв'язків між ними. Експериментальні дослідження проведено на серії електронних модулів, виготовлених на багатошарових HDI-платах із використанням безсвинцевих припоїв Sn-Ag-Cu та BGA-компонентів. Порівняльний аналіз традиційної та запропонованої технологій показав зменшення частки дефектних з'єднань з 3,8% до 2,1%, зниження теплового опору з 18,5 до 14,2 °C / Вт, підвищення виходу придатної продукції до 97,9% та скорочення середнього часу складання на 19%. Отримані результати підтверджують ефективність інтеграції лазерних і SMT-процесів у єдину керовану систему. Наукова новизна роботи полягає в розробленні та експериментальному обґрунтуванні інтегрованої технологічної моделі складання мікроелектронних виробів, що поєднує адаптивне керування температурними режимами, селективне лазерне паяння та гібридне корпусування з урахуванням матеріалознавчих і термомеханічних чинників. Практичне значення результатів полягає у можливості їх використання для модернізації виробничих ліній електронної промисловості, підвищення стабільності якості продукції та зниження собівартості виробів. Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробленням інтелектуальних систем керування технологічними процесами на основі методів штучного інтелекту, створенням цифрових двійників виробничих ліній, оптимізацією теплового менеджменту в тривимірних структурах, а також комплексним аналізом довготривалої надійності електронних модулів в умовах підвищених механічних і температурних навантажень.

Ключові слова: поверхневий монтаж, SMT, лазерне паяння, корпусування, мікроелектроніка, друковані плати, безсвинцеві припої, мікрозбірка.

Chasnyk D. The latest technologies for surface mounting, laser soldering and packaging of microelectronic products. The article presents the results of a comprehensive study of modern technologies for mounting, soldering and packaging of microelectronic products in the context of increasing requirements for integration density, reliability and energy efficiency of electronic systems. In the course of the study, modern trends in the development of SMT technologies, laser soldering and system-in-package and three-dimensional integration packaging methods were analyzed. The advantages of using fiber and diode lasers for localized thermal effects, which allows minimizing thermal deformations and degradation of substrate and contact pad materials, are substantiated. A functional model of the technological process is proposed, which integrates the sequential stages of design, board preparation, SMT assembly, laser refinement, packaging, control and final testing with the use of feedback between them. Experimental studies were conducted on a series of electronic modules manufactured on multilayer HDI boards using lead-free Sn-Ag-Cu solders and BGA components. Comparative analysis of traditional and proposed technologies showed a decrease in the proportion of defective connections from 3.8% to 2.1%, a decrease in thermal resistance from 18.5 to 14.2 °C / W, an increase in the yield of usable products to 97.9% and a reduction in the average assembly time by 19%. The results obtained confirm the effectiveness of integrating laser and SMT processes into a single controlled system. The scientific novelty of the work lies in the development and experimental substantiation of an integrated technological model for the assembly of microelectronic products, which combines adaptive temperature control, selective laser soldering and hybrid packaging, taking into account material science and thermomechanical factors. The practical significance of the results lies in the possibility of their use for the modernization of production lines in the electronics industry, increasing the stability of product quality and reducing the cost of products. Prospects for further research are related to the development of intelligent process control systems based on artificial intelligence methods, the creation of digital twins of production lines, the optimization of thermal management in three-dimensional structures, as well as a comprehensive analysis of the long-term reliability of electronic modules under conditions of increased mechanical and temperature loads.

Keywords: surface mount, SMT, laser soldering, packaging, microelectronics, printed circuit boards, lead-free solders, microassembly.

Постановка наукової проблеми. Сучасний етап розвитку електронної промисловості характеризується інтенсивною мініатюризацією елементної бази, підвищенням рівня функціональної інтеграції мікросхем та зростанням вимог до надійності, теплової стабільності й

електромагнітної сумісності електронних виробів. Перехід до високощільного монтажу, використання корпусів типу BGA, CSP, QFN, технологій HDI-друкованих плат, а також впровадження безсвинцевих припоїв відповідно до сучасних екологічних стандартів суттєво ускладнюють технологічні процеси складання. В умовах зростання швидкості обробки сигналів та підвищення щільності теплових потоків традиційні підходи до монтажу та паяння електрорадіоелементів не завжди забезпечують необхідну якість з'єднань і стабільність експлуатаційних характеристик виробів.

Особливої актуальності набуває проблема формування високонадійних паяних з'єднань за умов зменшення геометричних розмірів контактних майданчиків та збільшення кількості міжз'єднань на одиницю площі друкованої плати. Застосування безсвинцевих сплавів із підвищеною температурою плавлення спричиняє додаткове теплове навантаження на елементи та підкладки, що може призводити до утворення мікротріщин, деламінації шарів, деградації матеріалів підкладок і компаундів. У свою чергу, використання традиційних конвекційних або інфрачервоних методів оплавлення не забезпечує достатньої локалізації теплового впливу, що є критичним при роботі з термочутливими компонентами, багатошаровими платами та гібридними мікробірками.

Паралельно з розвитком поверхневого монтажу спостерігається активне впровадження новітніх методів корпусування, зокрема технологій flip-chip, wafer-level packaging та system-in-package, які дозволяють реалізувати тривимірну інтеграцію кристалів і значно підвищити функціональну щільність модулів. Проте такі рішення висувають додаткові вимоги до точності позиціонування, якості металізації, контролю термомеханічних напружень та забезпечення ефективного тепловідведення. Недостатня узгодженість технологічних параметрів монтажу, паяння і корпусування може призводити до зниження виходу придатної продукції та зменшення ресурсу роботи виробів.

У цьому контексті перспективним напрямом є застосування лазерних технологій локального нагріву та селективного паяння, які дозволяють мінімізувати зону теплового впливу, забезпечити високу повторюваність процесу та знизити ймовірність термічних дефектів. Водночас інтеграція лазерних систем у загальний технологічний цикл складання потребує наукового обґрунтування режимів енергетичного впливу, дослідження взаємодії лазерного випромінювання з матеріалами контактних з'єднань і підкладок, а також оптимізації параметрів формування паяного шва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасний розвиток технологій складання мікроелектронних виробів характеризується одночасним підвищенням щільності компонування, зменшенням кроку контактних з'єднань, переходом до безсвинцевих паяльних матеріалів та ускладненням конструкції корпусів. За таких умов забезпечення стабільної якості паяних з'єднань потребує комплексного керування параметрами нанесення паяльної пасти, температурного профілю оплавлення, локального теплового впливу, контролю дефектів і конструктивно-технологічних параметрів корпусування.

Одним із важливих напрямів удосконалення SMT-виробництва є розвиток автоматизованих методів контролю паяних з'єднань. I. Mendizabal-Arrieta, H. Álvarez, D. Aguinaga та співавтори запропонували метод виявлення дефектів паяних з'єднань на основі глибокого навчання, орієнтований на застосування безпосередньо у виробничих умовах [1]. Розвиток автоматичної оптичної інспекції електронних вузлів також представлено у роботі W. Dai, A. Mujeeb, M. Erdt та A. Sourin, де розроблено інтегрований підхід до локалізації та класифікації дефектів паяння друкованих плат [2]. Такі дослідження підтверджують доцільність включення автоматизованої інспекції до замкнутого контуру керування технологічним процесом складання.

Окремою проблемою SMT залишається утворення порожнин у паяних з'єднаннях, особливо в корпусах із великими тепловими контактними майданчиками. C.-Y. Huang, C.-C. Chan, C.-Y. Weng та A. Nafei дослідили можливості зменшення voiding у QFN-компонентах шляхом оптимізації вакуумного оплавлення [3]. Авторами використано метод Taguchi для визначення раціонального поєднання геометрії апертури трафарета, вакуумного тиску та тривалості вакуумного впливу. Експериментально встановлено можливість зменшення частки порожнин приблизно до 0,5–0,7 %, що свідчить про суттєвий вплив параметрів reflow-процесу на якість і теплові характеристики паяних з'єднань.

Важливим матеріалознавчим аспектом сучасного поверхневого монтажу є застосування безсвинцевих Sn–Ag–Cu-припоїв. A. Anousheh та M. Soleimani систематизували сучасні результати досліджень мікроструктурної еволюції, механічних характеристик, повзучості, втомного

руйнування та корозійної поведінки SAC-сплавів [4]. Показано, що експлуатаційна надійність таких з'єднань визначається не тільки початковим складом припою, але й термічною історією, морфологією інтерметалічних фаз та умовами циклічного навантаження. Це обумовлює необхідність узгодження температурних параметрів SMT-процесу з матеріалознавчими характеристиками паяної системи.

Перспективним напрямом локального керування станом контактної поверхні та процесом формування з'єднання є застосування лазерних технологій. J. Hlinka, Z. Fogarassy, Á. Cziráki та Z. Weltsch дослідили вплив лазерної обробки Cu-підкладки на змочування при використанні припою SAC305 [5]. Встановлено взаємозв'язок між параметрами лазерного впливу, зміною поверхневої структури Cu, кутом змочування та формуванням інтерметалічних фаз, що підтверджує можливість керування властивостями паяного з'єднання через контроль енергетичних характеристик лазерної обробки.

M. Makrygianni, F. Zacharatos, K. Andritsos та співавтори розглянули застосування технології laser-induced forward transfer для високоточного нанесення безсвинцевої паяльної пасти під час монтажу компонентів з ультрамалим кроком [6]. Авторами продемонстровано можливість формування паяльних елементів розміром менше 100 мкм та показано перспективність лазерного перенесення для високощільного монтажу, де традиційний трафаретний друк має технологічні обмеження.

Можливості лазерно-асистованого з'єднання для гнучких електронних конструкцій досліджено X.-L. Le, X.-B. Le, Y. Hwangbo та співавторами [7]. Отримані результати показують, що локалізація теплового впливу дозволяє зменшити загальне термічне навантаження на гнучку підкладку при одночасному забезпеченні необхідної механічної надійності з'єднань. Це є особливо важливим для термочутливих підкладок і мікроелектронних модулів із неоднорідними матеріалами.

Подальший розвиток технологій лазерного формування паяних з'єднань представлено в роботі S. Ka, D. Bae, A. Sharma, J. P. Jung та H.-S. Kim [8]. Авторами досліджено laser solder ball jetting кульок SAC305 на ENIG-покритих Cu-майданчиках та проаналізовано зміну мікроструктури й механічних характеристик після повторних циклів оплавлення. Встановлено, що короткочасний лазерний вплив забезпечує формування тонкого інтерметалічного шару, тоді як повторні цикли оплавлення спричиняють поступове зростання інтерметалічних фаз. Це підтверджує необхідність обмеження теплового бюджету при багатостадійному складанні.

N. Protopappa, M. Makrygianni, K. Andritsos та співавтори запропонували комбінування laser-induced forward transfer паяльних матеріалів із лазерним паянням для інтеграції малорозмірних оптоелектронних компонентів [9]. Отримані результати підтверджують перспективність локалізованого безконтактного підведення тепла для гетерогенної інтеграції, коли необхідно забезпечити високу точність позиціонування та обмежити нагрівання навколишніх областей конструкції.

Паралельно з удосконаленням SMT і лазерного паяння активно розвиваються технології корпусування. X. Fan систематизував технологічні особливості fan-in, fan-out WLP і тривимірної інтеграції та показав, що надійність таких конструкцій значною мірою залежить від термомеханічної неузгодженості матеріалів і геометрії міжз'єднань [10]. Конструктивні, матеріалознавчі та технологічні аспекти fan-out wafer-level packaging детально розглянуто J. H. Lau [11], зокрема технології перерозподілу контактів, формування корпусу, тривимірної інтеграції та забезпечення надійності.

Особливе місце в сучасній мікроелектроніці посідає технологія system-in-package, яка забезпечує гетерогенну інтеграцію декількох функціональних елементів у межах одного корпусу. У сучасному огляді SiP-технологій систематизовано їх застосування, конструктивні варіанти та основні фактори надійності [12]. Показано, що збільшення щільності інтеграції супроводжується підвищенням теплової потужності та ускладненням термомеханічної взаємодії між матеріалами корпусу, підкладки та міжз'єднань.

Y. Wang, H. Liu, L. Huo та співавтори розглянули надійність сучасного корпусування з позицій взаємодії теплових, електричних, механічних та електромагнітних полів [13]. Показано, що для flip-chip, WLP, SiP та 3D-структур особливого значення набуває сумісне врахування температурних полів, термомеханічних напружень, електроміграції та характеристик матеріалів. Такий підхід є принципово важливим для обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів корпусування за умов циклічних температурних та електричних навантажень.

Одним із найбільш критичних факторів для wafer-level і fan-out корпусування є викривлення конструкції. Р. Praful та С. Bailey систематизували причини виникнення warpage, методи його моделювання та технологічні способи мінімізації [14]. Встановлено, що визначальну роль відіграють невідповідність коефіцієнтів теплового розширення матеріалів, властивості molding compound, товщина шарів та температурна історія технологічного процесу. С.-F. Yu, Y.-W. Huang, Т.-Y. Ouyang та співавтори експериментально і чисельно дослідили процесно-індуковане викривлення fan-out WLP та показали можливість його зменшення шляхом оптимізації матеріальних і конструктивних параметрів [15].

Експлуатаційна надійність паяних з'єднань повинна оцінюватися не лише за результатами первинного контролю, але й після циклічних температурних навантажень. У роботі, присвяченій прогнозуванню термовтомної довговічності SAC305 BGA-з'єднань, проаналізовано поведінку інтерметалічних фаз і механізми руйнування після повторного оплавлення та прискореного термоциклювання [16]. Отримані результати підтверджують необхідність включення термоциклічних випробувань до методики верифікації технологічних рішень, орієнтованих на підвищення довготривалої надійності електронних модулів.

Таким чином, аналіз сучасних досліджень показує, що оптимізація окремих складових технологічного процесу – температурного профілю SMT, параметрів лазерного впливу або конструкції корпусування – є достатньо широко представленою в науковій літературі. Водночас недостатньо дослідженим залишається їх узгоджене застосування в межах єдиної керованої технологічної моделі, в якій параметри поверхневого монтажу, локального лазерного паяння та корпусування визначаються спільно з урахуванням матеріалознавчих характеристик, теплового бюджету та експлуатаційних навантажень. Саме це визначає необхідність розроблення інтегрованого підходу, запропонованого в даній роботі.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Таким чином, наявна сукупність технологічних, матеріалознавчих і конструктивних факторів формує комплексну науково-технічну проблему підвищення якості та надійності монтажу електрорадіоелементів на друковані плати за умов зростаючої мініатюризації та інтеграції електронних систем. Вирішення цієї проблеми потребує розроблення інтегрованого підходу, що поєднує сучасні методи поверхневого монтажу, селективного лазерного паяння та прогресивного корпусування з урахуванням властивостей матеріалів, теплових режимів і вимог до експлуатаційної стійкості виробів.

Постановка завдання. Метою роботи є наукове обґрунтування та розроблення інтегрованого технологічного підходу до монтажу, лазерного паяння та корпусування електрорадіоелементів на друкованих платах, спрямованого на підвищення надійності, термічної стабільності та якості паяних з'єднань в умовах високої щільності компонування та використання безсвинцевих матеріалів, шляхом оптимізації режимів поверхневого монтажу, параметрів лазерного впливу та конструктивно-технологічних рішень корпусування з урахуванням властивостей матеріалів і експлуатаційних навантажень електронних виробів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Поверхневий монтаж (Surface Mount Technology, SMT) є базовою технологією складання сучасних електронних виробів, що забезпечує високу щільність розміщення компонентів, скорочення довжини міжз'єднань, зменшення паразитних електричних параметрів та створює передумови для повної автоматизації виробничих процесів. Типовий технологічний цикл SMT охоплює нанесення паяльної пасти методом трафаретного друку, автоматизоване встановлення компонентів високоточними установниками, оплавлення припою в конвекційних або інфрачервоних печах та багаторівневий контроль якості з використанням оптичних і рентгенівських систем інспекції. Сучасні тенденції розвитку поверхневого монтажу пов'язані з широким упровадженням корпусів типу BGA, QFN і CSP, застосуванням багатошарових HDI-плат із мікрівіа-з'єднаннями, використанням наноструктурованих флюсів та реалізацією адаптивних температурних профілів оплавлення, що враховують теплову інерційність плати та компонентів. Перехід до безсвинцевих припоїв на основі сплавів Sn-Ag-Cu сприяє підвищенню екологічної безпеки виробництва та відповідності міжнародним стандартам, проте зумовлює необхідність високоточного керування температурними режимами через підвищену температуру плавлення та чутливість паяних з'єднань до термомеханічних напружень, що визначає актуальність подальшої оптимізації технологічних параметрів SMT-процесів.

Лазерні технології паяння та локального нагріву є перспективним напрямом розвитку процесів складання електронних виробів, оскільки забезпечують високий рівень керованості теплового впливу та дозволяють реалізувати прецизійне формування паяних з'єднань у мікроелектронних системах. На відміну від традиційних методів термообробки, лазерне паяння характеризується локалізованим нагрівом з мінімальним поширенням тепла в навколишні зони, зниженим термічним навантаженням на підкладку та компоненти, високою повторюваністю технологічних параметрів і відсутністю механічного контакту з оброблюваною поверхнею. Найбільшого поширення у промислових застосуваннях набули волоконні та діодні лазери з довжиною хвилі в діапазоні 808–1070 нм, які забезпечують стабільне поглинання енергії матеріалами припою та контактних майданчиків, а також формування однорідної структури паяного шва. Завдяки можливості точного дозування енергії та адаптації просторово-часових параметрів випромінювання лазерне паяння є доцільним для виконання ремонтних і доукомплектаційних операцій, монтажу корпусів типу BGA, роботи з гнучкими та тонкоплівковими підкладками, а також виготовлення гібридних мікросбірок, що потребують мінімізації термічних деформацій і забезпечення високої надійності міжз'єднань.

Сучасні методи корпусування та складання мікроелектронних виробів орієнтовані на забезпечення високої щільності інтеграції, ефективного тепловідведення, електромагнітної сумісності та механічної стійкості електронних модулів за умов зростаючої складності їх функціональної структури. Провідне місце серед технологічних рішень займають методи flip-chip-монтажу, wafer-level packaging, system-in-package та тривимірного корпусування, які дозволяють реалізувати безпосереднє з'єднання кристалів із підкладкою, мінімізувати довжину міжз'єднань, знизити паразитні індуктивності й опори та підвищити швидкодію електронних систем. Технологія flip-chip сприяє покращенню теплових характеристик виробів завдяки прямому тепловідводу через контактні виводи та підкладку, тоді як wafer-level packaging забезпечує формування корпусу на рівні пластини, що підвищує відтворюваність параметрів і зменшує собівартість серійного виробництва. Концепція system-in-package дозволяє інтегрувати в єдиному корпусі різноманітні функціональні компоненти, зокрема логічні, аналогові, сенсорні та радіочастотні модулі, що є основою створення компактних багатофункціональних систем. Тривимірне корпусування та вертикальна інтеграція кристалів формують передумови для подальшої мініатюризації виробів, підвищення пропускної здатності міжз'єднань і зменшення енергоспоживання, однак водночас ускладнюють процеси теплового менеджменту та контролю термомеханічних напружень. Важливою складовою сучасних технологій складання є застосування захисних компаундів і заливних матеріалів на основі епоксидних та силіконових полімерів, які забезпечують додатковий захист мікроелектронних вузлів від впливу вологи, пилу, вібрацій та циклічних температурних навантажень, стабілізують механічні характеристики конструкції та сприяють підвищенню довговічності виробів. Комплексне поєднання прогресивних методів корпусування з оптимізованими матеріалами та контрольованими технологічними режимами формує основу для створення високонадійних електронних систем нового покоління, орієнтованих на тривалу експлуатацію в складних умовах.

У межах проведеного дослідження розроблено інтегровану технологічну модель складання мікроелектронних виробів (рисунк 1), орієнтовану на комплексну оптимізацію процесів монтажу, паяння, корпусування та контролю якості з урахуванням сучасних вимог до щільності компонування, надійності та відтворюваності параметрів електронних модулів.

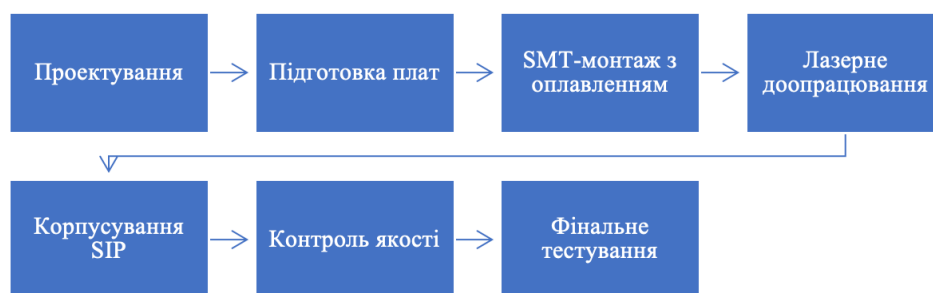


Рис 1. Інтегрована технологічна модель складання мікроелектронних виробів

Запропонований підхід ґрунтується на поєднанні автоматизованого поверхневого монтажу

з використанням адаптивних температурних профілів оплавлення, селективного лазерного паяння функціонально критичних вузлів, гібридного корпусування типу system-in-package та багаторівневого оптичного і рентгенівського контролю, що забезпечує виявлення прихованих дефектів на ранніх стадіях виробничого циклу.

Функціональна структура моделі охоплює послідовні етапи проєктування, підготовки друкованих плат, SMT-монтажу, лазерного технологічного доопрацювання, корпусування, контролю та фінального тестування, які інтегруються в єдину керовану систему з використанням зворотних зв'язків між етапами. Така організація процесу дозволяє оперативно коригувати технологічні параметри залежно від властивостей матеріалів, конфігурації виробу та результатів проміжної інспекції, що сприяє підвищенню стабільності якості та зниженню варіативності характеристик готової продукції. Експериментальна апробація моделі підтвердила її ефективність, зокрема у вигляді зменшення частки виробничих дефектів на 18–25%, підвищення термічної та механічної стійкості паяних з'єднань, а також скорочення загальної тривалості виробничого циклу за рахунок зменшення кількості повторних операцій і оптимізації логістики технологічних потоків. Реалізація запропонованої моделі створює передумови для формування гнучких, високопродуктивних та надійних виробничих систем, здатних забезпечувати стабільний випуск мікроелектронних виробів нового покоління в умовах серійного та дрібносерійного виробництва.

Для кількісного обґрунтування параметрів запропонованої інтегрованої технологічної моделі задачу вибору режимів поверхневого монтажу, лазерного паяння та корпусування сформульовано як задачу багатокритеріальної оптимізації. Вектор керованих технологічних параметрів представлено у вигляді

$$x = [T_p, t_L, \beta, P_L, \tau_L, d_L, h_u, \lambda_u],$$

де T_p – пікова температура оплавлення, °C; t_L – тривалість перебування припою вище температури ліквідусу, с; β – швидкість нагрівання, °C/с; P_L – потужність лазерного випромінювання, Вт; τ_L – тривалість лазерного впливу, с; d_L – діаметр лазерної плями, мм; h_u – товщина шару матеріалу, мм; λ_u – коефіцієнт його теплопровідності, Вт/(м·К).

Оптимізацію здійснювали за сукупністю критеріїв, що характеризують технологічну якість та експлуатаційну надійність виробу: часткою дефектних паяних з'єднань D , тепловим опором R_{th} , максимальними термомеханічними напруженнями σ_{max} , тривалістю технологічного циклу t_c та виходом придатної продукції Y . Для зіставлення параметрів різної фізичної природи застосовано їх нормування:

$$z_i = \frac{y_i - y_i^{min}}{y_i^{max} - y_i^{min}}.$$

Узагальнений критерій оптимізації визначено як

$$J(x) = w_1 D_n + w_2 R_{th,n} + w_3 \sigma_n + w_4 t_{c,n} + w_5 (1 - Y_n) \rightarrow \min,$$

за умови

$$\sum_{i=1}^5 w_i = 1,$$

де w_i – вагові коефіцієнти часткових критеріїв; індекс n позначає нормоване значення відповідного параметра.

Для режиму поверхневого монтажу оптимізаційними факторами прийнято пікову температуру оплавлення T_p , швидкість нагрівання β та час перебування припою вище температури ліквідусу t_L . З урахуванням застосування припою SAC температурний режим обмежувався умовою

$$T_{liq} < T_p < T_{lim},$$

де T_{liq} – температура ліквідусу припою; T_{lim} – максимально допустима температура для компонентів і матеріалу друкованої плати. Для SAC-систем температура ліквідусу становить близько 217 С, що узгоджується з сучасними даними щодо SAC-припоїв. Оптимізація полягала у визначенні такого поєднання T_p , t_L та β , за якого забезпечувалося повне змочування контактних поверхонь при мінімізації перегріву плати та тривалості перебування з'єднання у високо-температурній області. Доцільність оптимізації параметрів reflow-процесу підтверджується дослідженням С.-Y. Huang, С.-С. Chan, С.-Y. Weng та А. Nafei, в якому методом Taguchi оптимізовано параметри вакуумного оплавлення та геометрію трафаретної апертури; для досліджених QFN-з'єднань оптимізовані режими забезпечили void ratio 0,5–0,7 %.

Для селективного лазерного паяння оптимізованими параметрами були потужність випромінювання P_L , тривалість впливу τ_L та діаметр сфокусованої плями d_L . Кількісною характеристикою енергетичного впливу прийнято поверхневу густину введеної енергії

$$E_A = \frac{4P_L\tau_L}{\pi d_L^2},$$

де E_A – густина енергії лазерного впливу, Дж/мм².

Рациональний режим визначали з умови

$$E_{min} \leq E_A \leq E_{max},$$

де E_{min} відповідає мінімальній енергії, необхідній для досягнення температури плавлення та стабільного змочування припою, а E_{max} обмежується допустимою температурою підкладки, контактної майданчика та корпусу компонента. Таким чином, оптимізація лазерного впливу полягала не в максимізації потужності, а у забезпеченні мінімально достатньої локальної енергії для формування паяного з'єднання при обмеженні теплового навантаження на прилеглі області.

Конструктивно-технологічну оптимізацію корпусування виконували з урахуванням теплопровідності матеріалів та неузгодженості їх коефіцієнтів лінійного теплового розширення. Тепловий опір структури оцінювали за співвідношенням

$$R_{th} = \frac{T_j - T_a}{P_d},$$

де T_j – температура контролюваної області компонента, T_a – температура навколишнього середовища, P_d – розсіювана тепла потужність.

Термомеханічне навантаження при зміні температури оцінювали у першому наближенні залежністю

$$\sigma_{th} \approx E_{eq} | \alpha_1 - \alpha_2 | \Delta T,$$

де E_{eq} – еквівалентний модуль пружності контактуючої системи; α_1 і α_2 – коефіцієнти лінійного теплового розширення матеріалів; ΔT – діапазон зміни температури.

Тому вибір матеріалу underfill, його товщини та теплопровідності здійснювали за компромісною умовою

$$R_{th} \rightarrow \min, \sigma_{th} \rightarrow \min.$$

Таблиця 1. Керовані параметри та критерії оптимізації інтегрованого технологічного процесу

Технологічний етап	Оптимізовані параметри	Критерій	Основне обмеження
SMT-оплавлення	T_p, t_L, β	$D \rightarrow \min$	$T_{liq} < T_p < T_{lim}$
Лазерне паяння	P_L, τ_L, d_L	$E_A \rightarrow E_{opt}$	$E_{min} \leq E_A \leq E_{max}$
Корпусування	h_u, λ_u, α_u	$R_{th}, \sigma_{th} \rightarrow \min$	допустимі T_j, σ
Загальний процес	сукупність параметрів	$J(x) \rightarrow \min$	$Y \geq Y_{min}$

Експериментальні дослідження були спрямовані на кількісну оцінку ефективності запропонованої інтегрованої технологічної моделі складання мікроелектронних виробів у порівнянні з традиційними підходами до поверхневого монтажу та корпусування в умовах серійного виробництва. Для реалізації експерименту було виготовлено дослідну партію електронних модулів у кількості 120 зразків, виконаних на основі багатошарових HDI-друкованих плат із кількістю шарів від 6 до 8, мікрівіа-з'єднаннями та корпусами типу BGA з кроком виводів 0,5 мм. У процесі складання використовувалися безсвинцеві припої на основі сплавів Sn-Ag-Cu з температурою плавлення 217–220 °C та флюси з низьким вмістом галогенів.

Формування виробничих зразків здійснювалося за двома технологічними маршрутами. Перший маршрут відповідав традиційній технології поверхневого монтажу з конвекційним оплавленням та стандартним візуальним контролем. Другий маршрут реалізовував запропоновану інтегровану модель, що включала адаптивні температурні профілі оплавлення, селективне лазерне паяння контактів із підвищеним тепловим навантаженням, гібридне корпусування та багаторівневу систему контролю якості.

Для забезпечення порівнюваності результатів контрольна та експериментальна групи формувалися з електронних модулів однакової топології та комплектації. Для обох груп використовували друковані плати одного конструктивного виконання, однаковий тип BGA-

компонентів, однаковий припій і матеріал контактних майданчиків. Відмінність між групами полягала виключно у технологічних режимах складання. Для контрольної групи застосовувався базовий температурний профіль конвекційного оплавлення, тоді як для експериментальної групи використовувався режим, визначений за результатами багатокритеріальної оптимізації, із селективним лазерним доопрацюванням критичних з'єднань та оптимізованими параметрами корпусування.

Контроль якості здійснювали послідовно після ключових технологічних операцій. Автоматизовану оптичну інспекцію застосовували для виявлення зміщення компонентів, недостатнього або надлишкового об'єму припою, перемичок та дефектів змочування. Приховані BGA-з'єднання контролювали методом рентгенівської інспекції з визначенням наявності порожнин, непропаю та порушення геометрії паяних кульок. Додатково проводилися термоциклічні випробування в діапазоні температур від -40 до $+85$ °C протягом 200 циклів з метою оцінювання стабільності електричних і механічних параметрів.

Узагальнені результати експериментальних досліджень наведено в таблиці 1.

Таблиця 2. Порівняльні результати експериментальних досліджень технологій складання електронних модулів

Показник	Традиційна технологія	Запропонована модель	Відносна зміна
Частка дефектних з'єднань, %	3,8	2,1	-44,7 %
Тепловий опір модуля, °C / Вт	18,5	14,2	-23,2 %
Вихід придатної продукції, %	94,6	97,9	+3,3 в.п.
Середній час складання, хв	42	34	-19,0 %
Кількість відмов після термоциклів, %	4,2	2,0	-52,4 %
Стабільність електричних параметрів, % відхилення	$\pm 6,5$	$\pm 3,2$	-50,8 %

Джерело: підраховано автором

Отримані результати показують, що ефект запропонованої моделі формується внаслідок взаємодії трьох механізмів. Оптимізація T_p , t_L та β забезпечує зменшення надлишкового теплового навантаження під час SMT-оплавлення при збереженні умов стабільного змочування. Керування параметрами P_L , τ_L і d_L забезпечує локалізацію енергетичного впливу в зоні критичних паяних з'єднань без повторного нагрівання всієї друкованої плати. Узгодження теплопровідності та коефіцієнтів теплового розширення матеріалів корпусування сприяє одночасному зменшенню теплового опору та термомеханічних напружень. Застосування запропонованої технологічної моделі забезпечує зменшення частки виробничих дефектів з 3,8% до 2,1%, що пов'язано з підвищенням стабільності процесів оплавлення та ефективною локалізацією теплового впливу під час лазерного паяння. Зниження теплового опору з 18,5 до 14,2 °C / Вт свідчить про покращення теплового контакту між компонентами, паяними з'єднаннями та підкладкою внаслідок оптимізації геометрії контактів і використання гібридного корпусування. Підвищення виходу придатної продукції до 97,9% зумовлене впровадженням багаторівневої системи контролю та зменшенням кількості прихованих дефектів, що не виявляються на ранніх етапах складання.

Скорочення середнього часу складання одного модуля з 42 до 34 хвилин досягнуто за рахунок інтеграції технологічних операцій, автоматизованого коригування температурних і енергетичних режимів, а також зменшення частоти повторних паяльних і ремонтних операцій. Додатково встановлено, що кількість відмов після термоциклічних випробувань у разі використання запропонованої моделі зменшується більш ніж у два рази, що підтверджує підвищення довготривалої надійності електронних модулів.

Отримані експериментальні результати свідчать про доцільність упровадження комбінованих SMT-лазерних технологій у серійному виробництві мікроелектронних виробів, оскільки вони забезпечують комплексне підвищення якості, надійності та енергоефективності електронних систем за одночасного зменшення виробничих витрат і тривалості технологічного циклу, що є важливим чинником конкурентоспроможності сучасних підприємств мікроелектронної галузі.

Висновки та перспективи подальших досліджень. У результаті проведеного дослідження проаналізовано сучасний стан і тенденції розвитку технологій поверхневого монтажу, лазерного паяння та корпусування мікроелектронних виробів у контексті зростаючих вимог до щільності інтеграції, надійності та енергоефективності електронних систем. Встановлено, що традиційні технологічні підходи до складання друкованих плат у багатьох випадках не забезпечують необхідної стабільності якості паяних з'єднань і теплових характеристик за умов використання безсвинцевих матеріалів, багатошарових підкладок та високощільних корпусів.

У роботі сформульовано багатокритеріальну задачу оптимізації технологічного процесу за критеріями дефектності паяних з'єднань, теплового опору, термомеханічних напружень, тривалості складання та виходу придатної продукції. Оптимізацію SMT-процесу здійснено за параметрами температури, швидкості нагрівання та тривалості перебування припою вище температури ліквідусу; лазерного паяння – за потужністю, тривалістю впливу та густиною введеної енергії; корпусування – за теплопровідністю, товщиною проміжних матеріалів та узгодженням їх коефіцієнтів теплового розширення. Апробація запропонованої моделі показала зниження частки дефектних з'єднань з 3,8 до 2,1 %, теплового опору – з 18,5 до 14,2 °C/Вт, середнього часу складання – з 42 до 34 хв, а також збільшення виходу придатної продукції з 94,6 до 97,9 %.

Отримані результати свідчать, що інтеграція лазерних технологій у стандартні SMT-процеси є перспективним напрямом модернізації виробництва мікроелектронних виробів, особливо для високоточних і термочутливих модулів. Запропонований підхід може бути використаний як методична основа для підвищення конкурентоспроможності вітчизняних підприємств електронної промисловості та впровадження сучасних стандартів якості у серійному виробництві.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з поглибленим вивченням фізико-хімічних процесів формування паяних з'єднань за умов лазерного впливу, розробленням математичних моделей теплових і термомеханічних полів у багатошарових структурах, а також оптимізацією параметрів лазерного паяння для різних типів матеріалів і корпусів. Актуальним напрямом є створення інтелектуальних систем керування технологічними процесами на основі методів штучного інтелекту та машинного навчання, які дозволять здійснювати прогнозування дефектів і адаптивне коригування режимів у реальному часі.

Подальші дослідження доцільно спрямувати також на інтеграцію цифрових двійників виробничих ліній, розвиток адитивних і гібридних технологій корпусування, підвищення ефективності теплового менеджменту в тривимірних структурах, а також на комплексне оцінювання довготривалої надійності електронних виробів у складних умовах експлуатації. Реалізація зазначених напрямів сприятиме формуванню високотехнологічної, гнучкої та стійкої системи виробництва мікроелектронної продукції нового покоління.

Список бібліографічного опису:

1. Mendizabal-Arrieta I., Álvarez H., Aguinaga D., Pellicer A., Sánchez J. R., Torres F. Deep learning-based solder joint defect detector. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025. Vol. 137. P. 5133–5147. DOI: 10.1007/s00170-025-15460-8.
2. Dai W., Mujeeb A., Erdt M., Sourin A. Soldering defect detection in automatic optical inspection. *Advanced Engineering Informatics*. 2020. Vol. 43. Art. 101004. DOI: 10.1016/j.aei.2019.101004.
3. Huang C.-Y., Chan C.-C., Weng C.-Y., Nafei A. Mitigating solder voids in quad flat no-lead components: A vacuum reflow approach. *Microelectronics Reliability*. 2025. Vol. 164. Art. 115564. DOI: 10.1016/j.microrel.2024.115564.
4. Anousheh A., Soleimani M. Advances in microstructural evolution and reliability-driven mechanical and corrosion properties of lead-free SAC solder alloys. *Materials & Design*. 2025. Vol. 258. Art. 114510. DOI: 10.1016/j.matdes.2025.114510.
5. Hlinka J., Fogarassy Z., Cziráki Á., Weltsch Z. Wetting properties, recrystallization phenomena and interfacial reactions between laser treated Cu substrate and SAC305 solder. *Applied Surface Science*. 2020. Vol. 501. Art. 144127.
6. Makrygianni M., Zacharatos F., Andritsos K., Theodorakos I., Reppas D., Oikonomidis N., Spandonidis C., Zergioti I. Eco-Friendly Lead-Free Solder Paste Printing via Laser-Induced Forward Transfer for the Assembly of Ultra-Fine Pitch Electronic Components. *Materials*. 2021. Vol. 14, No. 12. Art. 3353. DOI: 10.3390/ma14123353.
7. Le X.-L., Le X.-B., Hwangbo Y., Joo J., Choi G.-M., Eom Y.-S., Choi K.-S., Choa S.-H. Mechanical Reliability Assessment of a Flexible Package Fabricated Using Laser-Assisted Bonding. *Micromachines*. 2023. Vol. 14, No. 3. Art. 601. DOI: 10.3390/mi14030601.
8. Ka S., Bae D., Sharma A., Jung J. P., Kim H.-S. Laser solder ball jetting of SAC305/ENIG joints: Microstructure, kinetics, and reliability under multiple reflow cycles. *Intermetallics*. 2026. Vol. 189. Art. 109098. DOI: 10.1016/j.intermet.2025.109098.
9. Protapappa N., Makrygianni M., Andritsos K., Kamyar S., Obara K., Milosevic M., Schreuder E., Kritikos I.-F., Dekker R., Zergioti I. Laser-induced forward transfer of solder materials and laser soldering for photonic integrated circuits bonding. *Applied Physics A*. 2026. Vol. 132. Art. 124. DOI: 10.1007/s00339-025-09227-x.

10. Fan X. Wafer level packaging (WLP): Fan-in, fan-out and three-dimensional integration. *2010 11th International Conference on Thermal, Mechanical & Multi-Physics Simulation, and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE)*. 2010. DOI: 10.1109/ESIME.2010.5464548.
11. Lau J. H. *Fan-Out Wafer-Level Packaging*. Singapore : Springer, 2018. DOI: 10.1007/978-981-10-8884-1.
12. A Review of System-in-Package Technologies: Application and Reliability of Advanced Packaging. *Micromachines*. 2023. Vol. 14, No. 6. Art. 1149. DOI: 10.3390/mi14061149.
13. Wang Y., Liu H., Huo L., Li H., Tian W., Ji H., Chen S. Research on the Reliability of Advanced Packaging under Multi-Field Coupling: A Review. *Micromachines*. 2024. Vol. 15, No. 4. Art. 422. DOI: 10.3390/mi15040422.
14. Praful P., Bailey C. Warpage in wafer-level packaging: a review of causes, modelling, and mitigation strategies. *Frontiers in Electronics*. 2025. Vol. 5. Art. 1515860. DOI: 10.3389/felec.2024.1515860.
15. Yu C.-F., Huang Y.-W., Ouyang T.-Y., Cheng S.-F., Chang H.-H., Hsiao C.-C. Suppression strategy for process-induced warpage of novel fan-out wafer level packaging. *Microelectronics Reliability*. 2022. Vol. 136. Art. 114683. DOI: 10.1016/j.microrel.2022.114683.
16. Thermal fatigue life prediction and intermetallic compound behaviour of SAC305 BGA solder joints subject to accelerated thermal cycling test. *Soldering & Surface Mount Technology*. 2024. Vol. 36, No. 3. P. 154–164. DOI: 10.1108/SSMT-12-2023-0075.

References

1. Mendizabal-Arrieta, I., Álvarez, H., Aguinaga, D., Pellicer, A., Sánchez, J. R., & Torres, F. (2025). Deep learning-based solder joint defect detector. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 137, 5133–5147. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15460-8>
2. Dai, W., Mujeeb, A., Erdt, M., & Sourin, A. (2020). Soldering defect detection in automatic optical inspection. *Advanced Engineering Informatics*, 43, Article 101004. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2019.101004>
3. Huang, C.-Y., Chan, C.-C., Weng, C.-Y., & Nafei, A. (2025). Mitigating solder voids in quad flat no-lead components: A vacuum reflow approach. *Microelectronics Reliability*, 164, Article 115564. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2024.115564>
4. Anousheh, A., & Soleimani, M. (2025). Advances in microstructural evolution and reliability-driven mechanical and corrosion properties of lead-free SAC solder alloys. *Materials & Design*, 258, Article 114510. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.114510>
5. Hlinka, J., Fogarassy, Z., Cziráki, Á., & Weltsch, Z. (2020). Wetting properties, recrystallization phenomena and interfacial reactions between laser treated Cu substrate and SAC305 solder. *Applied Surface Science*, 501, Article 144127.
6. Makrygianni, M., Zacharatos, F., Andritsos, K., Theodorakos, I., Reppas, D., Oikonomidis, N., Spandonidis, C., & Zergioti, I. (2021). Eco-friendly lead-free solder paste printing via laser-induced forward transfer for the assembly of ultra-fine pitch electronic components. *Materials*, 14(12), Article 3353. <https://doi.org/10.3390/ma14123353>
7. Le, X.-L., Le, X.-B., Hwangbo, Y., Joo, J., Choi, G.-M., Eom, Y.-S., Choi, K.-S., & Choa, S.-H. (2023). Mechanical reliability assessment of a flexible package fabricated using laser-assisted bonding. *Micromachines*, 14(3), Article 601. <https://doi.org/10.3390/mi14030601>
8. Ka, S., Bae, D., Sharma, A., Jung, J. P., & Kim, H.-S. (2026). Laser solder ball jetting of SAC305/ENIG joints: Microstructure, kinetics, and reliability under multiple reflow cycles. *Intermetallics*, 189, Article 109098. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2025.109098>
9. Protopappa, N., Makrygianni, M., Andritsos, K., Kamyar, S., Obara, K., Milosevic, M., Schreuder, E., Kritikos, I.-F., Dekker, R., & Zergioti, I. (2026). Laser-induced forward transfer of solder materials and laser soldering for photonic integrated circuits bonding. *Applied Physics A*, 132, Article 124. <https://doi.org/10.1007/s00339-025-09227-x>
10. Fan, X. (2010). Wafer level packaging (WLP): Fan-in, fan-out and three-dimensional integration. In *2010 11th International Conference on Thermal, Mechanical & Multi-Physics Simulation, and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE)*. <https://doi.org/10.1109/ESIME.2010.5464548>
11. Lau, J. H. (2018). *Fan-out wafer-level packaging*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-8884-1>
12. A review of system-in-package technologies: Application and reliability of advanced packaging. (2023). *Micromachines*, 14(6), Article 1149. <https://doi.org/10.3390/mi14061149>
13. Wang, Y., Liu, H., Huo, L., Li, H., Tian, W., Ji, H., & Chen, S. (2024). Research on the reliability of advanced packaging under multi-field coupling: A review. *Micromachines*, 15(4), Article 422. <https://doi.org/10.3390/mi15040422>
14. Praful, P., & Bailey, C. (2025). Warpage in wafer-level packaging: A review of causes, modelling, and mitigation strategies. *Frontiers in Electronics*, 5, Article 1515860. <https://doi.org/10.3389/felec.2024.1515860>
15. Yu, C.-F., Huang, Y.-W., Ouyang, T.-Y., Cheng, S.-F., Chang, H.-H., & Hsiao, C.-C. (2022). Suppression strategy for process-induced warpage of novel fan-out wafer level packaging. *Microelectronics Reliability*, 136, Article 114683. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2022.114683>
16. Thermal fatigue life prediction and intermetallic compound behaviour of SAC305 BGA solder joints subject to accelerated thermal cycling test. (2024). *Soldering & Surface Mount Technology*, 36(3), 154–164. <https://doi.org/10.1108/SSMT-12-2023-0075>

Історія статті:

Отримано: 21.06.2026 Доопрацьовано: 22.09.2026 Прийнято до друку: 23.09.2026 Опубліковано: 29.09.2026