

Аналітичний огляд сучасних підходів до забезпечення точності формоутворення елементів та плоских поверхонь виробів із текстолітів з металізованою поверхнею

Стрімкий розвиток високотехнологічних галузей, таких як телекомунікації, аерокосмічне будівництво та медичне приладобудування, висуває нові вимоги до точності формоутворення елементів із металізованих текстолітів. Специфічна гетерогенна структура цих матеріалів, що поєднує пластичний мідний шар із крихким і абразивним діелектриком, створює складний конфлікт фізико-механічних вимог під час обробки. Це часто призводить до деламінації композита, термічної деструкції полімерної матриці або утворення задирок на металевій поверхні. У роботі проведено аналітичне дослідження сучасних підходів до вирішення цих проблем, що дозволило систематизувати наявні технології та оцінити їхню ефективність у забезпеченні заданих параметрів якості.

Аналіз показав, що традиційне субтрактивне хімічне травлення має суттєві обмеження для виробів високої щільності через ефект ізотропного бокового підтравлювання. Хоча впровадження процесу прямої металізації (DM) дозволяє мінімізувати дефекти з'єднань і підвищити екологічність виробництва, цей підхід, як і більшість хімічних методів, залишається обмеженим виключно площинною обробкою. Аналогічна закономірність спостерігається і серед оптичних технологій: попри те, що пряме лазерне експонування (LDI) забезпечує роздільну здатність до 25 мкм, воно не задовольняє сучасні потреби у формуванні складної просторової геометрії деталей.

Саме обмеженість цих методів зумовлює перехід до детального розгляду механічної обробки, де фрезерування є безальтернативним та екологічно безпечним методом для поетапного знімання шарів і створення складних тривимірних (3D) профілів. Досліджено, що для успішного фрезерування та запобігання відриванню скляних волокон критично важливим є використання спеціалізованого твердосплавного інструменту з DLC-покриттям, збільшеною кількістю зубів та специфічною геометрією – малим кутом нахилу спіралі (близько 8°), що мінімізує підйомну силу під час різання. У підсумку встановлено, що, попри високу технологічність механічної обробки, головною перешкодою для широкого застосування залишається проблема забезпечення площинності під час базування тонких заготовок. Це дозволяє визначити розробку методів базування матеріалу як пріоритетний вектор для майбутніх наукових пошуків у напрямі забезпечення точності формоутворення функціональних елементів у виробів із металізованих текстолітів методом фрезерування.

Ключові слова: металізований текстоліт; точність формоутворення; композитні матеріали; механічна обробка; фрезерування; хімічне травлення; деламінація.

Актуальність теми. Сучасні методи обробки металізованих текстолітів, що забезпечують точність формоутворення, класифікуються за трьома основними напрямками: хімічним (травлення та пряма металізація), оптичним (безмаскова фотолітографія та пряме лазерне експонування LDI) та механічним (мікросвердління й фрезерування). Головною особливістю матеріалів цього типу є їхня складна гетерогенна структура. Поєднання пластичного металевого шару (переважно мідного) з надзвичайно крихким і високоабразивним діелектриком (композитом на основі бавовняної або склотканини з фенолформальдегідною чи епоксидною матрицею) спричиняє критичний конфлікт фізико-механічних вимог під час процесу обробки.

Режими різання, які є оптимальними для обробки металізованого шару, часто призводять до незворотної термічної деструкції полімерної матриці або глобальної деламінації (розшарування) композиту. Натомість параметри, сприятливі для збереження цілісності композитної основи, викликають інтенсивне налипання металу на різальний інструмент. Це спричиняє пластичну деформацію металізації, утворення задирок і, як наслідок, суттєве зниження якості та точності деталей.

Зважаючи на складність забезпечення якісних показників при обробці металізованих текстолітів, фахівцям потрібно глибоко розуміти специфіку наявних технологічних підходів, їхні переваги та обмеження. У цій роботі проведено систематизацію та комплексний порівняльний аналіз сучасних методів обробки, що робить її результати актуальними під час вибору оптимальної технології для виготовлення деталей із металізованих текстолітів у межах виконання різноманітних інженерних та наукових завдань.

Метою статті є аналітичне дослідження сучасних методів забезпечення точності формоутворення елементів та плоских поверхонь виробів із текстолітів з металізованою поверхнею.

Викладення основного матеріалу. Текстоліти з металізованою поверхнею – це група композитних шаруватих матеріалів, в основі яких лежить склотканина з епоксидною або термореактивною зв'язкою, яка з одного або з двох боків має мідні металізовані поверхні. Вони вирізняються унікальним комплексом фізико-механічних та експлуатаційних властивостей.

Згідно з технічними специфікаціями промислових зразків [1], цей тип матеріалів характеризується високим комплексом фізико-механічних властивостей, зокрема механічною міцністю, зносостійкістю та еластичністю. Матеріал вирізняється високими електроізоляційними показниками, діелектричною стабільністю, а також гідротермічною стійкістю у широкому експлуатаційному діапазоні температур від -60 до +155 °С. Крім того, ця група матеріалів є технологічною: вони піддаються різним видам обробки, зокрема й механічній, такий як розрізання, свердління, штампування, фрезерування та інші.

Основні фізико-механічні властивості матеріалів цієї групи, на прикладі її основного представника FR-4, наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Фізико-механічні властивості металізованого текстоліту FR-4

Найменування	Значення
Коефіцієнт теплопровідності	3 Вт/(м*К)
Робоча температура	від -60 до +85 °С
Модуль Юнга	330 гПа
Щільність	18 г/см ²
Твердість	150 HV
Ударна в'язкість	35 кДж/ м ²

З огляду на зазначені фізико-механічні властивості та високу практичну значущість металізованих текстолітів, ключовим завданням постає вибір оптимальних методів їх обробки. Оскільки сучасні виробничі технології охоплюють широкий спектр підходів, подальший аналіз у цій роботі для зручності систематизації структуровано за трьома основними напрямками: хімічним, оптичним та механічним.

Хімічні методи обробки. Найчастіше серед хімічних методів застосовують процес хімічного травлення (або фотохімічної обробки) – це субтрактивний метод, який є основним підходом у виробництві друкованих плат із металізованих текстолітів [3, 4]. Процес виготовлення провідників за цим методом складається з таких кроків: спочатку на мідний шар наноситься фоточутливий полімер (сухий плівковий фоторезист) [4, 2]. Після проявлення полімеру на платі залишаються захищені ділянки, що відповідають майбутній формі провідників, тоді як інша частина мідного шару залишається відкритою [2]. Далі плата піддається впливу хімічного розчину (найчастіше це хлорид міді (II), хлорид заліза (III) або лужні аміачні розчини), який розчиняє незахищені ділянки металу [2, 3]. Наприклад, при використанні хлориду міді відбувається реакція мідного шару з утворенням хлориду міді (I) за рівнянням:



Після завершення травлення захисний фоторезист змивається спеціальним лужним розчином, залишаючи лише мідні елементи [4, 2]. Основні переваги та недоліки такого методу наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Переваги та недоліки хімічного травлення металізованих текстолітів

Переваги	Недоліки
Висока точність формоутворення (допустимі відхилення не більше 10 % від товщини мідного шару) [3, 2]	Ізотропність процесу (хімічний розчин розчиняє метал не лише в глибину, але й убік) [2]
Низька собівартість (не потрібно купувати дорогі обладнання) [2]	Обмеження для форм високої щільності (через ефект бокового підтравлювання, що критично важливо при передачі високочастотних сигналів) [2, 4]
Висока продуктивність (хімічні сполуки забезпечують високу швидкість травлення) [3, 2]	Пасивація поверхні (на поверхні міді можуть миттєво утворюватися нерозчинні плівки) [2]
Фізичні властивості матеріалу [2]	Екологічні ризики та токсичність (відпрацьовані розчини є надзвичайно корозійними та належать до категорії небезпечних відходів) [3]

Окрім хімічного субтрактивного методу обробки, основою якого є травлення матеріалу, застосовують також обернений до нього процес (PCB) прямої металізації (Direct Metallization – DM). Здійснюючи порівняння обох підходів, автори дослідження [5] наголошують, що технологія прямої металізації дозволяє підвищити надійність мікрівіа-отворів (Micro Via Hole – MVH), що є критично важливим для сучасної електроніки високої щільності (HDI). Розкриваючи проблематику особливості методу, зазначається, що традиційний процес хімічного міднення є досить складним 6-етапний процесом, який використовує хімічні реакції для створення провідного шару міді. А також через створення додаткового шару між базовою міддю та електроосадженою міддю, цей метод часто призводить до дефектів з'єднань (ICD), розшарування (D-Sep) та утворення мікро- й нанопустот. Основні причини цих дефектів – захоплення водню, який утворюється під час хімічної реакції, складності з рухом розчину в малих отворах та побічні реакції.

З огляду на викладене, автори праці [5] обґрунтовано визначають метод прямої металізації як більш раціональний та технологічно стабільний процес порівняно з традиційними підходами. Процес прямої металізації DM (найчастіше на основі колоїдного вуглецю або графіту) значно простіший і складається лише з 3 етапів: кондиціонування, адсорбції провідного колоїду та мікротравлення. Головна перевага полягає в тому, що DM не створює додаткового проміжного шару, забезпечуючи високу адгезію основи та мідного шару. А також має переваги, порівняно із попередньо описаним методом:

- підвищена надійність мікрівіа-отворів. Завдяки відсутності проміжного шару та відсутності газотворення в процесі, пряма металізація майже повністю усуває ризики утворення пустот та розшарувань, роблячи структуру стійкішою до термічних та механічних навантажень;
- можливість візуального контролю. Видимість вуглецевого / графітового покриття (AOI) використовується виробниками для контролю якості продукції, що дозволяє виявляти залишки бруду або дефекти на контактних площадках ще до етапу металізації.
- екологічність. Пряма металізація споживає менше води та електроенергії, генерує менше відходів і не використовує шкідливих хімікатів (таких як формальдегід чи ціанід) або дорогоцінних металів, таких як паладій, які потрібні для хімічного міднення.

Таким чином, згідно з результатами роботи [5], пряма металізація є безпечним, екологічним та надійним вибором для виготовлення сучасних виробів із металізованих текстолітів.

Оптичні методи. Серед сучасних оптичних методів найпоширенішим є метод безмаскової фотолітографії з використанням негативного сухого плівкового фоторезисту [7]. Технологічний процес складається з кількох послідовних етапів і є дешевішою, простішою та безпечнішою альтернативою традиційним підходам, оскільки передбачає використання звичайного проектора замість небезпечних джерел ультрафіолетового або рентгенівського випромінювання.

Для виготовлення виробів за цим методом мідну заготовку спочатку відрізають у розмір, полірують пастою для металу та знежирюють 70 % розчином спирту. На підготовлену поверхню наносять негативний сухий плівковий фоторезист (наприклад, марки DuPont T215 або аналогічний). Далі використовують DLP-проектор (наприклад, InFocus IN114A), який встановлюють на спеціальну підставку об'єктивом донизу. Проектор, виконуючи функцію джерела світла, проектує зображення (топологию схеми) безпосередньо на відкритому фоторезистом поверхню. Процес експонування триває близько 4 хвилин.

Оскільки фоторезист є високочутливим до світлового випромінювання, ділянки під впливом світло-синього кольору вступають у хімічну реакцію, тоді як зони, перекриті чорним кольором (без освітлення), не реагують. Після завершення експонування заготовка проходить фінальні стадії проявлення та травлення. Серед основних переваг такого методу обробки автори [7] вирізняють такі:

- високу гнучкість процесу, що дозволяє виготовляти широку номенклатуру деталей без додаткових витрат часу на переналадження обладнання;
- високу роздільну здатність, яка забезпечує створення функціональних ліній шириною до 100 мкм;
- високу точність формоутворення (з допустимим відхиленням до 5 мкм);
- відсутність залишкових механічних напружень у структурі матеріалу.

Водночас дослідники [7] наголошують на наявності супутніх екологічних ризиків, що є суттєвим стримувальним фактором для широкого промислового застосування цього методу.

Технологія прямого лазерного експонування (Laser Direct Imaging – LDI) є одним із найсучасніших методів обробки металізованих текстолітів [6]. Цей метод розроблено у відповідь на стійку виробничу потребу в мініатюризації електроніки, і нині він широко застосовується для виготовлення плат із високою щільністю з'єднань (HDI). Основний принцип роботи LDI полягає у формуванні топології схеми безпосередньо на металізованому шарі текстоліту без застосування традиційних фотошаблонів чи масок.

Технологічний процес передбачає нанесення фоторезисту на металізований шар, після чого поверхню обробляє сфокусований лазерний промінь. Його увімкнення та вимкнення автоматично регулюється комп'ютерною системою управління відповідно до заданого електронного креслення. Для цього зазвичай застосовують ультрафіолетовий (УФ) лазер, який є оптимальним для більшості поширених фоторезистів і

дозволяє формувати лінії шириною менше ніж 50 мкм. Точне фокусування променя на робочій площині забезпечується спеціальним об'єктивом типу F-Theta (з фокусною відстанню 100 мм).

За результатами експериментальних досліджень авторами [6] встановлено, що оптимальна швидкість сканування (експонування) становить 5 см/с. Саме за таких параметрів утворюються чіткі лінії з рівними краями без дефектів. При зменшенні швидкості краї поверхні стають нерівномірними («рваними»), тоді як її перевищення призводить до того, що фоторезист отримує недостатню дозу енергії. Як наслідок, це спричиняє небажане змивання струмопровідних доріжок на етапі проявлення.

Головні переваги методу LDI:

- скорочення кількості етапів виробництва: підвищення технологічності процесу за рахунок зменшення кількості технічних операцій для отримання готового виробу;
- усунення дефектів: зникають проблеми, пов'язані з пошкодженням фотошаблонів, зміною їхніх розмірів через коливання температури й вологості, а також проблемами з контактом маски та плати;
- підвищення роздільної здатності: метод дозволяє створювати елементи розміром 50/50 мкм, а при використанні спеціальних лазерних фоторезистів – навіть 25/25 мкм, що технологічно неможливо досягти попередньо описаними методами.

Методи механічного оброблення. Механічне оброблення металізованих текстолітів історично розвивається у двох основних напрямках. Першим із них є формування отворів, або мікросвердління, – складний технологічний процес, що вимагає високої точності та застосування спеціалізованого інструментарію. Цей метод використовується для створення отворів надмалого розміру (діаметром від 0,1 до 0,3 мм) у виробках, які є базовими компонентами сучасних електронних пристроїв [8].

Основним інструментальним матеріалом для мікросвердл є твердий сплав – композит, що складається переважно з порошку карбіду вольфраму (WC, 91–94 %) та металевого кобальту (Co, 6–9 %) [8, 9]. Геометрія таких інструментів суттєво відрізняється від класичної: для забезпечення стійкості в робочих умовах кут при вершині становить 130°, а кут нахилу гвинтової лінії – 42°. Оскільки мікросвердла діаметром менше 0,3 мм вкрай складно переточувати, вони зазвичай є одноразовими [8].

Процес мікросвердління вимагає використання шпинделів із надвисокою частотою обертання – від 80 000 до 200 000 об/хв [10], при цьому в експериментальних дослідженнях швидкості можуть сягати 295 000–300 000 об/хв. Оптимальні параметри подачі та швидкості підбираються індивідуально залежно від властивостей оброблюваного матеріалу. Процес супроводжується стрімким і значним тепловиділенням: якщо температура від тертя на відкритій поверхні може досягати 80 °С, то безпосередньо всередині мікроотвору вона є значно вищою [8].

Під час роботи інструмент піддається постійному зношуванню двох основних типів: абразивному (через високу твердість скловолокна та наповнювачів) та адгезійному (внаслідок налипання смоли на різальні кромки та у гвинтові канавки свердла) [8]. Основною перевагою методу є висока точність і продуктивність обробки, проте необхідність забезпечення надвисоких швидкостей обертання обмежує його широке застосування через високу вартість відповідного обладнання.

Другим і водночас найбільш ефективним методом механічної обробки металізованих текстолітів є фрезерування. Цей процес переважно застосовують для поетапного зняття металізованого шару з діелектричної основи та, рідше, для наскрізного прорізання матеріалу [11]. Ключовим і найбільш складним етапом є базування заготовки на робочому столі верстата. Навіть мінімальна похибка площинності (на рівні 0,1 мм) здатна спричинити критичні дефекти: нерівномірність зняття металізації, пошкодження полімерної основи через нестабільність глибини різання та загальні дефекти формування [11].

Найпростішим методом фіксації тонких заготовок є застосування тонкої двосторонньої клейкої стрічки, яка рівномірно наноситься на зворотний бік текстоліту. При цьому критично важливо уникати утворення повітряних зазорів під час притискання, оскільки локальні нерівності безпосередньо впливають на фактичну глибину занурення фрези та погіршують якість обробки.

На професійному обладнанні перевагу віддають системам вакуумного базування, де заготовка надійно фіксується на перфорованому столі за допомогою розрідження. Головними перевагами цього підходу є забезпечення рівномірного прилягання по всій площі без деформацій, відсутність адгезивних залишків та висока швидкість перевстановлення деталей. Традиційні механічні притискачі застосовуються обмежено або в комбінації з іншими методами, особливо для текстолітів товщиною 1–1,5 мм. Надмірне зусилля торцевого затискання провокує макродеформацію (вигинання) центральної частини заготовки, що унеможливує точне дотримання глибини фрезерування.

Окрім надійного базування, визначальне значення має вибір різального інструменту. Зважаючи на високу абразивність композитної структури (скловолокно у поєднанні з полімерною матрицею), стандартні інструменти зазнають інтенсивного зношування. Тому спеціалізовані фрези виготовляються виключно з твердих сплавів (суцільнотвердосплавний інструмент) та оснащуються зносостійкими покриттями, що забезпечує їхню стійкість за умов високошвидкісної обробки.

Для формування ізоляційних канавок між струмопровідними доріжками найчастіше застосовують V-подібні фрези (гравери) з кутом при вершині 30° або 60°. Інструмент із меншим кутом забезпечує тонший

та точніший різ, тоді як 60-градусні гравери ефективніше нівелюють локальні перепади висот. Використання граверів із діаметром вершини 0,2 мм дозволяє формувати елементи з шириною доріжок до 0,3 мм.

Для видалення суцільних ділянок металізації (вибірки кишень) та фрезерування зовнішніх контурів застосовують плоскі кінцеві фрези (переважно двозубі, діаметром від 0,1 до 6,0 мм). При цьому мікрофрези (від 0,1 мм) орієнтовані на прецизійну вибірку міді, а інструменти більшого діаметра (від 0,8 мм) – на контурну обробку. Зазвичай такі фрези мають прямий напрямок гвинтової лінії для ефективного відведення стружки, проте для мінімізації ризиків розшарування поверхневих шарів текстоліту доцільним є використання інструментів зі зворотною спіраллю.

Критичним фактором є наявність захисних покриттів інструменту, серед яких найефективнішим є алмазоподібне вуглецеве покриття DLC (Diamond-Like Carbon). Фрези з таким покриттям (наприклад, серії ECSSF) характеризуються мікротвердістю на рівні 3300–4200 HV. Вони забезпечують чисте різання без виривання волокон, запобігають деламінації та гарантують мінімальну шорсткість обробленої поверхні навіть за умов тривалої експлуатації. Натомість дослідження свідчать, що застосування стандартних покриттів (зокрема CrN) є вкрай неефективним під час обробки композитів. Їх використання призводить до значного зниження якості зрізу: відбувається відрив верхнього полімерного шару, неповне перерізання скляних волокон та пластичне змінання матеріалу основи.

Окрім матеріалу та покриття, на ймовірність виникнення деламінації суттєво впливає геометрія інструменту. Фрези загального призначення зазвичай мають великий кут нахилу гвинтової лінії (30° або 45°), що під час обробки генерує значну підйомну (осьову) силу. Це спричиняє відрив непідкріпленого верхнього шару склотканини від матриці, що призводить до виривання волокон і локального розшарування. На противагу їм, спеціалізовані фрези для композитів мають мінімальний кут нахилу спіралі (близько 8°) та збільшену кількість різальних кромки (наприклад, 6 замість 2). Така конфігурація мінімізує підйомну силу та забезпечує чисте формоутворення без задирок.

Абразивна дія скловолна інтенсифікує зношування по задній поверхні інструменту. Швидкість деградації різальної кромки прямо залежить від адаптованості фрези до композитів: інструменти з покриттям CrN можуть зношуватися на 80 % швидше порівняно зі спеціалізованими фрезами з DLC-покриттям на ідентичній довжині шляху різання. Важливо зазначити, що зростанням зношування інструменту стрімко погіршуються всі висотні параметри шорсткості обробленої поверхні (Ra, Rz, Rt), що безпосередньо знижує експлуатаційну якість кінцевого виробу.

Незважаючи на технологічні складнощі етапу базування, фрезерування широко застосовується в різних галузях промисловості як практично безальтернативний метод забезпечення необхідних просторових геометричних параметрів деталей. Як і будь-яка інша технологія, цей метод характеризується низькою специфічних переваг та обмежень [11–13], які систематизовано в таблиці 3.

Таблиця 3

Переваги та недоліки фрезерної обробки металізованих текстолітів

Переваги	Недоліки
Відсутність хімічних сполук (процес не потребує використання хімічних розчинів)	Складність налаштування (насамперед через базування та підготовку інструменту)
Забезпечує високу точність	Необхідність точного базування
Якість зрізу (за правильних умов)	Високий знос інструменту
Технологічна можливість забезпечення тривимірних форм	Ризик деламінації (розшарування)

Висновки. На основі проведеного аналітичного огляду сучасних технологій обробки металізованих текстолітів встановлено, що вибір оптимального методу формоутворення визначається специфікою експлуатаційних вимог до кінцевого виробу. Проте для потреб високотехнологічних галузей – таких як телекомунікації (інфраструктура мереж 5G), аерокосмічне будівництво, медичне приладобудування та силова електроніка – найбільш перспективним і технологічно гнучким визначено метод фрезерування.

У ході дослідження сформульовано такі ключові положення:

1. **Геометрична універсальність.** Обґрунтовано, що фрезерування є безальтернативним методом для забезпечення прецизійних параметрів деталей. На відміну від хімічних та оптичних технологій, що функціонують виключно у двовимірній площині, механічна обробка дозволяє формувати складні тривимірні (3D) профілі, створювати канавки змінної глибини та здійснювати поетапне знімання металізованих шарів.

2. **Технологічна точність.** Встановлено перевагу фрезерування у вирішенні проблеми ізотропності обробки. Відсутність ефекту бокового підтравлювання, характерного для хімічних методів, дозволяє досягати високої якості країв провідників та стабільності геометричних розмірів, що є критично важливим для виробів із високою щільністю монтажу елементів.

3. **Екологічна безпека.** Підкреслено відповідність механічної обробки сучасним принципам сталого розвитку. Фрезерування як сухий механічний процес не потребує використання висококорозійних токсичних реагентів та не утворює небезпечних рідких відходів, що суттєво знижує екологічне навантаження виробництва.

Разом із тим за результатами аналізу виявлено критичний фактор – проблему забезпечення площинності під час базування та фіксації заготовки. Встановлено, що похибки базування спричиняють дефекти формоутворення та нерівномірність знімання металізації. З огляду на це, розглянуто розробку методів базування заготовок як пріоритетний вектор для майбутніх наукових пошуків у напрямі забезпечення точності формоутворення функціональних елементів у виробках із металізованих текстолітів методом фрезерування.

References:

1. UkrStarLine, *FR-4 Copper Clad Laminate*, [Online], available at: <https://ukrstarline.ua/plastmasy-ta-polimerni-materialy/sklotekstolit/sklotekstolit-folgovanyj/sklotekstolit-folgovanyj-fr-4>
2. Author, A. et al. (2025), «Characterization of PCB Dielectrics and Conductors», *Preprints*, [Online], available at: <https://www.preprints.org/manuscript/202511.0149>
3. Cakir, O. (2006), «Copper etching with cupric chloride and regeneration of waste etchant», *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 175, Issue 1–3, pp. 63–68, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.04.024.
4. He, H., Chen, J., Zhang, S. et al. (2017), «Fabrication and surface treatment of fine copper lines for HDI printed circuit board with modified full-additive method», *Circuit World*, Vol. 43, Issue 3, pp. 112–119, doi: 10.1108/CW-02-2017-0004.
5. SMTA, *Direct Metallization in Printed Circuit Board Manufacturing*, [Online], available at: <https://www.circuitinsight.com/uploads/2/direct-metallization-printed-circuit-board-manufacturing-smta.pdf>
6. Wolinski, W.L., Jankiewicz, Z. and Romaniuk, R.S. (ed.) (2007), *Laser Technology VIII: Applications of Lasers*, proc. of the conf., Szczecin, Poland, 2006, SPIE Proceedings, Vol. 6598, doi: 10.1117/12.726550.
7. Singh, R. et al. (2019), «Dry Film Photoresist Application to a Printed Circuit Board (Pcb) using a Maskless Photolithography Method», *ResearchGate*, [Online], available at: https://www.researchgate.net/publication/336911353_Dry_Film_Photoresist_Application_to_a_Printed_Circuit_Board_Pcb_using_a_Maskless_Photolithography_Method
8. Davim, J.P. et al. (2014), «Investigation of mechanical drilling of copper-clad plate», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 74, pp. 1–9, doi: 10.1007/s00170-014-6520-1.
9. Kyocera Precision Tools, *PCB Speeds and Feeds*, [Online], available at: <https://www.kyoceraprecisiontools.com/pcb/speeds-feeds/>
10. Union Tool Co, *Recommended Drilling Conditions for FR-4*, [Online], available at: https://www.uniontool.co.jp/en/product/drill_router/technical_info/drill_condi/fr4.html
11. Fab Academy (2026), *Electronics Production: Group Assignment*, Kochi, [Online], available at: https://fabacademy.org/2026/labs/kochi/group_assignments/week08/
12. Author, A. et al. (2023), «Sustainable Materials for Printed Circuit Board Production», *Sustainability*, Vol. 15, Issue 16, doi: 10.3390/su151612372.
13. Author, B. et al. (2022), «Surface Modification of FR-4 Laminates for Enhanced Adhesion», *Coatings*, Vol. 12, Issue 9, doi: 10.3390/coatings12091354.

Козяр Ярослав Анатолійович – аспірант кафедри механічної інженерії Державного університету «Житомирська політехніка», завідувач лабораторії мехатроніки.

<https://orcid.org/0000-0002-1468-1754>.

Наукові інтереси:

- CAD-, CAM-, CAE-системи;
- адитивні технології;
- сучасні технології металообробки;
- забезпечення точності обробки текстолітів із металізованими поверхнями.

Koziar Y.A.

An analytical review of modern approaches to ensuring the form accuracy of features and flat surfaces in metal-clad laminate components

With the advancement of modern high-tech industries, the requirements for their products are simultaneously increasing. The continuous process of improvement and innovation dictates the need to relentlessly develop the methods, approaches, and equipment necessary to support them. Aerospace engineering, telecommunications (particularly 5G network infrastructure), medical device manufacturing, automotive electronics, and intelligent systems are stimulating a growing demand for products with stringent requirements for quality, dimensional accuracy, and surface finish, specifically those made from metal-clad laminates.

Today's industry cannot exist without metal-clad laminates – this material serves as the foundation of technological progress. Its application as a base material in the manufacturing of circuit boards for various electronic devices, including industrial controllers, power electronics, telecommunications, and communication systems, makes it critically important.

At first glance, such a widely used material should have a strictly refined processing technology employing various methods and approaches. Indeed it does, but progress does not stand still. Different industries are continuously raising the requirements for the components themselves. For instance, the increase in operating frequencies of antennas made from laminates in the radio engineering sector leads to a reduction in the permissible tolerances for the geometric dimensions of the forming features and planes. This significantly complicates manufacturing processes and necessitates the implementation of new approaches.

For this reason, this study presents an analytical review of modern approaches utilized by both researchers and industry practitioners. The primary challenges in the machinability of metal-clad laminates are identified. Although the paper is largely dedicated to mechanical machining methods, it also encompasses and describes alternative methods, detailing their respective advantages and disadvantages.

Keywords: metal-clad laminate; form accuracy; composite materials; machining; milling; chemical etching; delamination.

Стаття надійшла до редакції 14.01.2026.