

ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСІВ ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ПАКУВАЛЬНОЇ ПРОДУКЦІЇ

Савченко О.М.

к.т.н., доцент, кафедра поліграфічних технологій та пакувань, Інститут поліграфії та медійних технологій НУ «ЛП»

***Анотація.** Вивчення новітніх технологій виготовлення пакувальної продукції методами лазерної обробки з дерево-волокнистих матеріалів (фанери та ХДФ), підбір режимів та устаткування, виявлення технологічних закономірностей лазерного розрізування та гравіювання, які використовуються при виготовленні пакувальної продукції.*

***Ключові слова:** ПАКОВАННЯ, ЛАЗЕРНА ОБРОБКА, ЛАЗЕРНЕ РОЗРІЗУВАННЯ, ЛАЗЕРНЕ ГРАВІЮВАННЯ, ДЕРЕВО-ВОЛОКНИСТІ МАТЕРІАЛИ.*

Вступ

Пакування віддзеркалює традиції, менталітет та смаки суспільства у конкретний період, змінюючись у різні епохи характером та функціями. У процесі зміни пакування різні суб'єкти ринку висувають до нього різні вимоги. Виробники товару приділяють увагу збереженню якості впродовж максимально великого терміну, а також покращенню дизайну і функціональності пакувальної продукції. Споживачі товару бажають довго зберігати його високу якість за легкого розпаковування. Держава в свою чергу більше опікується можливістю утилізації без шкоди для довкілля. Виробники товару при виборі оптимального пакування висувають такі вимоги:

- забезпечення захисту товару від хімічного і фізичного пошкодження;
- зручність пакування під час транспортування;
- мінімалізація габаритів пакування;
- можливість ефективного розміщення реклами;
- відповідність пакування іміджу виробника;
- підвищення вартості товару за рахунок відповідного пакування [1].

Останні десятиріччя свідчать про виокремлення пакувального дизайну України у спеціалізовану галузь дизайну та проектування. Як зазначає автор [2], за всі роки свого існування людство поки що не знайшло кращого інформаційного комунікатора для продажу продукції, ніж її упаковка. Глобальна модель сталого розвитку суспільства визначає баланс трьох складових: людина/екологія/економіка, серед яких людина-споживач виходить на перше місце, а задоволення її потреб та покращення її життя стають найліпшими індикаторами ринкових відносин, які залежать від багатьох факторів. Тому першочерговим завданням виробників пакувальної продукції є впровадження нових пакувальних матеріалів і сучасних технологій виробництва з врахуванням

усіх супутніх чинників для створення якісного конкурентноспроможного пакування, яке б відповідало усім закладеним вимогам.

На актуальність досліджень у пакувальній галузі вказують численні публікації науковців. Стаття [3] присвячена дослідженню теоретичних засад і розробці практичних рекомендацій щодо удосконалення процесу управління фінансовою стійкістю як складової забезпечення стійкого функціонування підприємств пакувальної галузі. Визначено, що фінансовий стан підприємства треба систематично й усебічно оцінювати з використанням різних методів, прийомів та методик аналізу. У роботі [4] проаналізовано сутність, функції та вимоги до упаковки, виконано відповідну систематизацію підходів, визначено роль пакування у процесі інноваційної діяльності та управління розподілом товарів. За результатами виконаного дослідження на основі критичного аналізу існуючих підходів щодо розроблення упаковки запропоновано власний методичний інструментарій, який поєднує роботу не лише виробників (конструкторів, дизайнерів), а й маркетологів з удосконаленням форми технічного завдання.

Значна увага виробників пакувальної продукції направлена на виготовлення екологічно чистої тари. У статті [5] науковцями розглянуто перспективи розвитку, а також особливості функціонування «зеленого» виробництва на прикладі відомих брендів. Визначено доцільність виробництва, використання та перспективи розвитку екологічно чистих пакувальних матеріалів, проблем і перспектив екологічного маркування. Визначено основні стратегії, які можна використати у бізнесі для оптимізації сталого розвитку під час переходу на екологічне виробництво. Наведено основні напрями, які можуть допомогти компаніям змінити ставлення та поведінку потенційного споживача екологічно чистої упаковки товарів.

Мета та задачі дослідження

Надзвичайно великий асортимент товарів, специфічні вимоги споживачів до пакувальної продукції спонукають до розроблення нових конструкцій пакувань, які б враховували призначення та виконання основних функцій (захисної, інформаційної, дозуючої, експлуатаційної, логістичної, маркетингової, нормативно-законодавчої та екологічної). В останні роки зростає актуальність використання лазерів у пакувальній промисловості, а найбільш актуальними є розробка технологій, що ґрунтуються на застосуванні лазерів та обладнання для таких технологічних процесів. Метою роботи є вивчення новітніх технологій виготовлення пакувальної продукції методами лазерної обробки з дерево-волокнистих матеріалів, підбір режимів та устаткування, виявлення технологічних закономірностей лазерного розрізування та гравіювання, які використовуються при виготовленні пакувальної продукції.

Основна частина

Починаючи з 1960-их років від винайдення першого лазера, концепція його швидко розвивається і сьогодні використовується для багатьох цілей. Лазерне світло застосовується в інформаційних технологіях, медичній практиці і, звичайно ж, у матеріальній обробці. Його унікальні властивості – висока пікова потужність в ультракоротких імпульсах, коротка довжина хвилі в діапазоні піко- і фемтосекунд та малі розміри у нанометровому діапазоні демонструють високу роздільну здатність вимірювання та виражений колір. У матеріальній обробці лазерні процеси ще не досягли свого піку. Сучасне виробництво неможливо уявити без такої унікальної технології генерування енергії, як лазер – надзвичайно потужне джерело випромінювання та інструмент безконтактної обробки різноманітних матеріалів. Далеко неповний перелік сфер застосування наведений на рис. 1.

Наука	Військова справа	Медицина
Спектроскопія	Лазерна зброя	Хірургія
Вимірювання відстаней	Електрооптичні перешкоди	Косметологія
Фотохімія	Цілевказівники	Гінекологія
Намагнічування	Лазерний приціл	Дерматологія
Інтерферометрія	Розвідка	Точкове зварювання тканин
Голографія		Діагностика
Термоядерний синтез	Промисловість і побут	
Як якісні джерела монохроматичного когерентного світла	Розрізування, гравіювання, маркування, зварювання, наплавлення	
	CD, DVD-програвачі, принтери, дисплеї	
	Фотолітографія, нанесення штрихкодів	
	Оптичний зв'язок, системи навігації	
	Маніпуляції мікрооб'єктами	

Рисунок 1 – Сфери застосування лазерного випромінювання

Всі лазери складаються з трьох основних частин:

- активного (робочого) середовища;
- системи накачування (джерело енергії);
- оптичного резонатора (може бути відсутнім, якщо лазер працює в режимі підсилювача).

Кожна з них в роботі лазера виконує свою певну функцію.

Існує чотири загальноприйнятих класифікації лазерів, які розрізняються за активним середовищем, вихідною потужністю, режимом роботи та шириною імпульсу. Відповідно до активного середовища лазери високої потужності можна розділити на газові, рідинні, твердотільні, на парах металів та інші типи лазерів (рис. 2).

Види лазерів	
Газові: <ul style="list-style-type: none">- вуглекислотний (CO₂)- аргонний- криптонний- ксеноновий- азотний- фтористо-водневий- киснево-йодний- на монооксиді вуглецю (CO)- ексимерний- гелій-неоновий- хімічний лазер на кисневій і йодовій	Твердотільні: <ul style="list-style-type: none">- оптоволоконний- рубіновий- алюмо-ітрієвий з легуванням неодимом, тулієм, ітербієм, гольмієм- на фториді ітрію-літію- на ванадаті ітрію- на неодимовому склі- титан-сапфіровий- церій-легований літій-стронцій (або кальцій)-алюмо-фторидний- на олександриті з легуванням хромом- на фториді кальцію, легуваному ураном
На парах металів: <ul style="list-style-type: none">-гелієво-кадмієвий-гелієво-ртутний-гелієво-селеновий-на парах міді-на парах золота	Інші типи: <ul style="list-style-type: none">- напівпровідниковий лазерний діод- на барвниках- на вільних електронах- псевдо-нікелево-самарієвий- Лазер на центрах забарвлення

Рисунок 2 – Класифікація типів лазерів

Класифікація за активним середовищем (робочою речовиною): середовище підсилення лазера включає газ, рідину та тверду речовину, а специфічне середовище підсилення визначає довжину хвилі лазера, вихідну потужність і область застосування. Газові CO₂-лазери є типовими для газу, а рубінові, напівпровідникові, волоконні та YAG-лазери – для твердих тіл.

Газовий лазер є першим лазером, який реалізував своє застосування в промисловості. Прикладами газових лазерів є CO₂-лазер, He-Ne-лазер, аргонний лазер та інші. Вуглекислотний CO₂-лазер виявився найбільш корисним джерелом для різних способів оброблення матеріалів, що вимагають високої потужності (кВт),

серед них: зварювання, різання і свердління. Лазери на рідинних середовищах, у тому числі лазери на барвниках, налаштовуються у широкому спектральному діапазоні у видимій і близькій ІЧ області. Вони є найбільш поширеними джерелами в спектроскопії.

Твердотільні лазери, особливо YAG:Nd³⁺, є найбільш корисними джерелами лазерного випромінювання для застосувань, що вимагають менших значень потужності, в порівнянні з CO₂-лазерами: маркування, гравіювання, відновлення провідників і шаблонів (масок). Твердотільні лазери компактніші, ніж газові, їх оптичні системи засновані на поширених складових. YAG-лазери можуть працювати в неперервному, імпульсному режимі, у режимі модуляції добротності і у режимі синхронізації мод, при цьому тривалість імпульсів випромінювання лежить у межах від пікосекунд до мілісекунд. Гнучкість YAG-лазерів зумовила їх широке використання, а здатність багатьох ефективних нелінійних кристалів працювати із властивими ним робочими частотами зробила їх найпоширенішими серед інших типів лазерів [6].

За довжиною хвилі лазерного випромінювання його можна розділити на інфрачервоний лазер, лазер видимого діапазону, ультрафіолетовий лазер тощо (рис.3). Матеріали з різною структурою можуть поглинати різні довжини хвиль світла. Наприклад, метали мають вищу швидкість поглинання ближнього інфрачервоного світла, а неметали краще поглинають довжини хвиль (10,6 мкм), що випромінюється CO₂-лазерами.

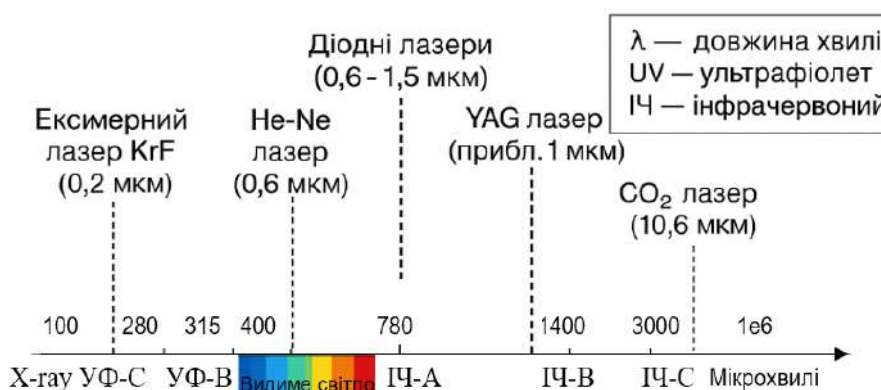


Рисунок 3 – Спектр електромагнітного випромінювання лазерів

Довжини хвилі лазерів:

- Ексімерний лазер KrF (0.2 мкм);
- He-Ne лазер (0.6 мкм);
- Діодні лазери (0.6–1.5 мкм);
- YAG лазери (прибл. 1 мкм);
- CO₂ лазер (10.6 мкм).

За вихідною потужністю лазери поділяються на низьку потужність (нижче 1000 Вт), середню потужність (1000-3000 Вт) і високу потужність (вище 3000 Вт); Однак діапазон потужності, визначений різними виробниками, також відрізняється, і в галузі немає єдиних специфікацій. Різні лазери з різною потужністю підходять для різних сфер застосування.

За режимом роботи його можна розділити на безперервний і імпульсний лазер. Безперервний лазер випромінює на постійній основі, тобто, світловий промінь не змінюється протягом усього часу роботи. Характеризується стабільною роботою та високим тепловим ефектом. Імпульсний лазер – це тип лазера, який генерує повторювані імпульси світла з високою піковою потужністю і малим тепловим ефектом.

За тривалістю імпульсу імпульсні лазери можна розділити на мілісекунди, мікросекунди, наносекунди, пікосекунди та фемтосекунди. Загалом, чим коротший час імпульсу, тим вища енергія окремого імпульсу, тим вужча ширина імпульсу та вища точність обробки [7].

Типові характеристики лазерних систем наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Характеристики лазерних систем

Характеристика	Газовий CO ₂	Твердодільний Nd:YAG	Дисковий Yb:YAG	Волоконний Yb:YAG
Типовий параметр пучка (ВРР) (мм·мрад)	5	12	10	12
Типовий діаметр волокна (мкм)	–	400–1000	200	100–200
Типова максимальна вихідна потужність (кВт)	20	6	8	20
Ефективність (%)	5–8	10–20	10–20	20–30

Абревіатура YAG (Yttrium Aluminum Garnet (ітрій-алюмінієвий гранат) – кристал, що виступає активним середовищем лазера. Лазер Yb:YAG – ітрій-алюмінієвий гранат, легований іонами та тербію, який здатний генерувати лазерне випромінювання в ближньому інфрачервоному спектрі.

Різні типи лазерів використовують в якості робочої речовини різноманітні матеріали:

- газові лазери – газ;
- твердотільні – іони металів, які здатні виробляти стимульоване випромінювання. Зазвичай застосовують кристали: рубін, корунд, алюмінієвий гранат та інші;
- лазери на барвниках – розчин, який утворюється при розчиненні деяких органічних барвників в рідинах, таких як етанол, метанол або вода;
- напівпровідникові, також відомі як лазерні діоди, – напівпровідникові матеріали, наприклад арсенід галію, сульфід кадмію та інші;
- оптоволоконні лазери – скловолокно, леговане рідкоземельними елементами;
- ексимерні лазери – двохатомні ексимерні молекули (найчастіше аргон, ксенон чи криптон). Це короткоживучі сполуки атомів благородних газів один з одним, з галогенами або з киснем. Під дією напруги цей газ утворює нестійкі сполуки з галогенами – фтором чи хлором. У результаті розпаду молекул з'являється спрямований пучок УФ-випромінювання [8].

Пакування з дерево-волокнистих матеріалів, таких як фанера (рис. 4, а) і ХДФ (рис. 4, б) виготовляють методами лазерної обробки – лазерним розрізуванням (рис.4) і лазерним гравіюванням (рис. 5).



а



б

Рисунок 4 – Пакування з дерево-волокнистих матеріалів, виготовлене лазерним розрізуванням: а – фанера; б – ХДФ



а



б

Рисунок 5 – Пакування з дерево-волокнистих матеріалів, де виготовлення кришки здійснене лазерним гравіюванням: а – фанера; б – ХДФ

Лазерне розрізування – це один із безконтактних методів, що базується на процесах термоенергетичної обробки. Використовують для металів, таких як титан, нержавіюча сталь, алюміній та алюмінієві сплави, а також застосовується до неметалевих матеріалів, таких як деревина, скло, пластик, кераміка та композити у різних галузях промисловості. Наразі визнано три варіанти технології лазерного розрізування: розрізування плавленням в інертному газі, розрізування плавленням в реактивному газі та розрізування випаровуванням. Промислове лазерне розрізування здійснюється шляхом фокусування великої кількості енергії на певних ділянках. Під час процесу розрізування велика кількість тепла, що виробляється лазером, плавить або випаровує матеріал у робочій зоні. Щоб видалити матеріал, що утворюється в результаті взаємодії лазерного променя з заготовкою, використовуються захисні гази, такі як кисень, CO_2 , азот або гелій [9, 10].

Лазерне розрізування має безліч переваг, включаючи безконтактність, високу швидкість, гнучкість і здатність різати різні матеріали з мінімальними відходами. Процес контролюється комп'ютером, що забезпечує точність і зменшує втручання людини, а низькі експлуатаційні витрати та короткий час налаштування підвищують ефективність. Однак, лазерне розрізування має такі обмеження, як розрізування світло-відбиваючих металів, вплив тепла, що призводить до вузької зони термічного впливу, та відносно високі початкові

капітальні витрати. При обробці різноманітних матеріалів важливо визначити ідеальні параметри розрізування на основі взаємодії випромінювання, матеріалу заготовки та параметрів розрізування. Лазерне розрізування – це складний процес, який контролюється багатьма змінними, взаємодія яких непередбачувана. Вхідні параметри процесу лазерного розрізування можна розділити на три категорії: використовувана лазерна система, заготовка та параметри процесу.

Вхідні параметри.

Лазерна система:

- максимальна вихідна потужність лазера;
- якість променя.

Параметри заготовки:

- тип матеріалу;
- товщина матеріалу.

Параметри обробки:

- потужність лазера;
- швидкість різання;
- тип і тиск газу;
- частота;
- позиція фокусу;
- діаметр фокусної точки;
- фокусна відстань;
- діаметр сопла та відстань.

Вихідні параметри:

- шорсткість поверхні;
- геометрія прорізу;
- цілісність поверхні;
- зона термічного впливу;
- швидкість знімання матеріалу [11].

Лазерне гравіювання – це метод нанесення зображення на предмет за допомогою сфокусованого лазерного променя. Світло від випромінювача передається на лінзу, яка фокусує його в найтонший промінь, за допомогою якого і відбувається процес гравіювання

Висновки

Дослідження, пов'язані з лазерами, активно сприяють впровадженню інноваційних виробничих технологій, які спрямовані на покращення якості продукції, проектування багатоматеріальних компонентів та підвищення економічних переваг. Різноманітність типів та застосувань лазерів призвела до різних дослідницьких зусиль, спрямованих на вивчення та оптимізацію впливу лазерів на матеріали.

На основі проведеного дослідження виявлено що:

- лазерна обробка поверхні покращує такі властивості матеріалів, як міцність, твердість та хімічна стійкість, і пропонує контрольований метод для покращення характеристик поверхні;
- лазерне розрізування пропонує переваги безконтактної обробки, високу швидкість та гнучкість, ефективність обробки твердих та високоміцних матеріалів. Важливо при цьому встановити відповідні параметри лазера для досягнення очікуваних механічних властивостей матеріалу, обробленого лазером;
- лазерне гравіювання знаходить універсальне застосування при оздобленні пакувальної продукції невеликими накладками при мінімальних затратах.

Список літератури.

1. Буторіна, В.Б. (2023). Розвиток ринку пакувальних матеріалів в Україні: товарознавчий аспект. Наукові праці Міжрегіональної академії управління персоналом. Економічні науки, 5 (72), 88-93. <https://doi.org/10.32689/2523-4536/72-13>.
2. Кохан, А.А., & Кривопляс-Володіна, Л.О. (2024). Перспектива застосування структурно-параметричного синтезу для проєктування функціональних модулів машин-автоматів пакування штучних харчових продуктів. Тренди Lean-виробництва та пакування харчової продукції. (с. 57-59).
3. Іванов, М. (2024). Управління фінансовою стійкістю підприємств пакувальної галузі в сучасних умовах: виклики та можливості. Вчені записки Університету «КРОК», 3(75), 156-164. <https://doi.org/10.31732/2663-2209-2024-75-156-164>.
4. Біловодська, О.А. (2016). Пакування в процесі інноваційної діяльності як складова управління розподілом товарів. Маркетинг і менеджмент інновацій, (4), 31-42. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mimi_2016_4_4.
5. Середницька, Л.П. (2019). Світовий досвід розвитку екологічно чистої упаковки товарів. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського, 30(69), 6, Ч.2, 94-97. <http://ir.vtei.edu.ua/card.php?id=26595>.
6. Шуайбов, О.К. (2009). Лазерні джерела випромінювання та їх застосування в мікроелектроніці. Навчальний посібник. https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/bitstream/lib/20030/1/Methodicka54_druc.pdf.
7. Класифікація лазерів. <http://ua.oem-laser.com/info/classification-of-lasers-83349866.html>.
8. Види лазерів у металообробці: принцип роботи, методи класифікації. <https://martensit-plus.com/vydy-lazerov/>.
9. Naresh, & Khatak, P. (2022). Laser cutting technique: A literature review. *Materials Today: Proceedings*, (56), 2484-2489. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.250>.
10. Wardhana, B.S., Anam, K., Ogana, R.M., & Kurniawan, A. (2019). Laser Cutting Parameters Effect on 316L Stainless Steel Surface. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, (494), 012041. IOP Science. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/494/1/012041>.
11. Anghel, C., Gupta, K., & Jen, T. (2020). A Review on Laser Beam Cutting. *Proceedings of the 5th NA International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 3168-3178.