

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 539.422.52

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.1/01>**Бернацький А.В.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

Юрченко Ю.В.

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

Сіора О.В.

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

Соколовський М.В.

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

Сіора І.В.

Інститут хімії поверхні імені О.О. Чуйка Національної академії наук України

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА СКЛОВІСНІ КОМПОЗИТНІ МАТЕРІАЛИ

Стаття присвячена вивченню поведінки склотекстоліту під дією лазерного випромінювання високої потужності, для визначення оптимальних параметрів руйнування цього композитного матеріалу. Використання лазерної зброї проти безпілотних літальних апаратів, виготовлених з композитів на основі скловолокна, є актуальним завданням, тому дослідження впливу параметрів лазерного променя, таких як потужність, діаметр плями і кут падіння, на ефективність руйнування матеріалу має важливе практичне значення. Для проведення експериментів використано Nd:YAG-лазер із потужністю випромінювання до 4,4 кВт і довжиною хвилі 1,06 мкм. Листи склотекстоліту розмірами 1000×500×2 мм піддавалися лазерній обробці з варіацією таких параметрів, як потужність (1–4 кВт), діаметр пучка (5–20 мм), кути падіння випромінювання (30°, 45°, 60°, 90°), а також швидкості переміщення лазерного пучка (0,5–2 м/хв). З'ясовано, що найбільш ефективне руйнування матеріалу спостерігалось при нормальному падінні пучка (90°) і потужності 1 кВт з мінімальною експозицією 0,5 с. Зі зменшенням кута падіння променя до 30°, час експозиції для гарантованого руйнування зростає до 1 с, що пояснюється збільшенням площі пучка і зниженням щільності потужності. Збільшення діаметра пучка до 10 мм вимагало довшого часу експозиції для досягнення руйнування, зокрема до 3 с при куті 30°. Діаметр 15 мм потребував збільшення потужності до 2–4 кВт для ефективного руйнування. Досліджено, що при потужності 4 кВт та швидкості переміщення променя до 1,5 м/хв руйнування не спостерігалось, що вимагає ретельної оптимізації параметрів для різних умов. Доведено, що для гарантованого руйнування матеріалу при товщині склотекстоліту 2 мм необхідно забезпечити енергетичну експозицію не менше 2500–3500 Дж/см². При енергетичних експозиціях менших за 2500 Дж/см² гарантованого руйнування зразка не відбувалося. Крім того, встановлено, що енергетична експозиція слабо залежить від зміни діаметра пучка. Наприклад, для потужностей 1–2 кВт ці показники залишаються на рівні 2500 Дж/см², але з підвищенням потужності до 4 кВт знижуються до 2250 Дж/см². Визначено, що при потужностях від 1 кВт і вище для пробиття склотекстоліту товщиною 2 мм необхідно досягти густини потужності 2000 Вт/см². При зниженні потужності до 0,5 кВт вимоги до густини різко зростають, що вимагає використання або більш точних оптичних систем для фокусування пучка, або збільшення потужності лазера, що ускладнює технологію та підвищує її вартість. Загалом, за результатами дослідження встановлено оптимальні параметри лазерної обробки склотекстоліту, які можуть бути використані для розробки стратегій боротьби з БПЛА, виготовленими з композитних матеріалів.

Ключові слова: БПЛА, композитні матеріали, склотекстоліт, лазерне випромінювання, термічний вплив, випаровування, руйнування.

Постановка проблеми. З розвитком сучасних технологій авіаційна галузь усе більше орієнтується на використання композитних матеріалів, серед яких скловмісні матеріали, зокрема склотекстоліт, посідають провідне місце. Завдяки своїм високим механічним характеристикам і стійкості до високих температур, склотекстоліт став незамінним матеріалом для виготовлення дронів, які активно використовуються як в цивільній, так і у військовій авіації [1]. Проте поява нових загроз, таких як лазерна зброя, ставить питання щодо надійності цих матеріалів у бойових умовах [2]. Лазерне випромінювання може стати серйозним фактором руйнування структури композитних матеріалів, тому необхідність дослідження поведінки склотекстоліту під дією високопотужних лазерів є актуальним. Такі дослідження дозволять не тільки глибше зрозуміти механізми руйнування, а й розробити ефективну стратегію боротьби з БПЛА за допомогою лазерного випромінювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На початку розвитку виробництва склопластику, він був найпоширенішим армуючим матеріалом. Це був революційний період, коли він успішно замінив метал у високотехнологічних галузях машинобудування [1, 3]. Навіть незважаючи на значний розвиток графену або вуглецевих волокон, на виробництво скловолокна все ще припадає понад чотири п'ятих ринку полімерних композитних матеріалів. Підрахунки стверджують, що 85% скла, яке виробляється у світі щороку, використовується для армування пластмас [1]. Одним з поширених представників цього класу композитних матеріалів є склопластик FR-4 (склотекстоліт), якості якого повністю виправдовують і сприяють його переважанню на ринку композитів: він має дуже хорошу міцність на розрив (близько 4,6 ГПа), а також стійкість до стиснення і ударних навантажень, стабільність розмірів і корозійну стійкість; пластичний і відносно легко переробляється у волокна; має дуже конкурентоспроможну питому міцність (оскільки має низьку щільність – близько $2,5 \times 10^{-3}$ кг/м³); низька ціна в порівнянні з іншими композитами; для багатьох застосувань також важливо, що він негігроскопічний (не поглинає вологу з навколишнього середовища) та не розкладається і не горить [4–5].

Були проведені кілька досліджень, що стосуються впливу лазерного випромінювання на скловмісні композитні матеріали. Виявлено, що лазерне випромінювання призводить до швидкого локального нагрівання матеріалу, це спричиняє його

руйнування, зокрема спостерігаються процеси випаровування та розшарування. Товщина шару, що піддається випаровуванню, досягає 1–2 мм, залежно від часу експозиції і потужності лазера. При тривалому часі експозиції лазерного випромінювання матеріал повністю руйнується [6].

Оптичний зв'язок світла зі склопластиком у видимій і ближній інфрачервоній області залежить від товщини матеріалу, але також сильно змінюється залежно від довжини хвилі, через наявність специфічних для полімеру смуг поглинання в цьому спектральному діапазоні. При більшій довжині хвилі світло не проходить навіть через найтонший зразок, оскільки спочатку полімер, а потім і скловолокно стають непрозорими в середньому і далекому інфрачервоному спектрі. При довжині хвилі 1070 нм оптичний відгук зразків склопластику також залежить від температури аж до температури руйнування полімерної матриці, при якій відбувається утворення залишків вуглецю, що робить матеріал високопоглинаючим [7].

Використання лазера з безперервною дією є оптимальним варіантом для руйнування композитів зі склопластику. Однак ефективність випаровування лазера з безперервною дією була невисокою, через недостатній піроліз і горіння композитів на основі смол. Ці скловолокна і відповідні реакції із залишковим вуглецем утворювали SiC, який перешкодив подальшому горінню [8].

Постановка завдання. Мета роботи – вивчення поведінки склотекстоліту під дією лазерного випромінювання високої потужності, для визначення оптимальних параметрів руйнування цього композитного матеріалу.

Виклад основного матеріалу. Для проведення досліджень використовувався Nd:YAG-лазер «DY044» з потужністю випромінювання до 4,4 кВт та довжиною хвилі випромінювання $\lambda=1,06$ мкм, виробництва фірми «Rofin-Sinar» (виробництва Німеччини). В якості матеріалу цілі був використаний лист склотекстоліту 1000×500×2 мм. Параметри обробки наступні: час дії лазерного випромінювання 0,25 с, 0,5 с, 1 с, 2 с, 3 с; потужність лазерного випромінювання 1 кВт, 2 кВт, 3 кВт, 4 кВт; швидкість переміщення лазерного променя 0,5 м/хв, 0,75 м/хв, 1 м/хв, 1,5 м/хв, 2 м/хв; діаметр плями лазерного випромінювання 5 мм, 10 мм, 15 мм, 20 мм; кути падіння лазерного променя відносно поверхні матеріалу 30°, 45°, 60°, 90°. В зону обробки направлявся потік повітря під тиском, для видалення продуктів руйнування.

За результатами проведених експериментів було виявлено, що для гарантованого руйнування матеріалу під кутом 90° з потужністю лазерного випромінювання 1 кВт та діаметра пучка 5 мм, необхідний час експозиції становить 0,5 с (рис. 1, а).

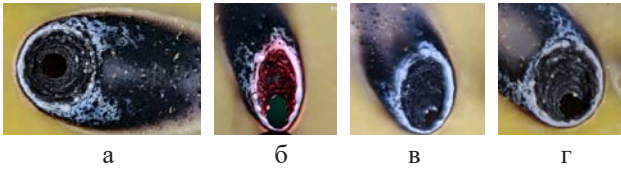


Рис. 1. Отвори утворені в результаті дії лазерного випромінювання потужністю 1 кВт та діаметром плями 5 мм: а – кут 90° , $t = 0,5$ с; б – кут 30° , $t = 1$ с; в – кут 45° , $t = 0,5$ с; г – кут 60° , $t = 0,5$ с

Але вже при кутах падіння лазерного випромінювання 30° , 45° , 60° відносно матеріалу, час експозиції зростає через збільшення площі лазерного пучка, та як результат, меншої густини потужності та більшого розсіювання тепла. Дана закономірність виконується також для інших потужностей та кутів падіння лазерного випромінювання. Так для гарантованого руйнування матеріалу при потужності лазерного випромінювання 1 кВт та діаметром пучка 5 мм під кутами 30° , 45° , 60° , час експозиції становить 1 с, 0,5 с, 0,5 с відповідно (рис. 1, б, в, г). При збільшенні діаметру плями до 10 мм, для гарантованого руйнування матеріалу з потужністю лазерного випромінювання 1 кВт, мінімально необхідний час експозиції для кута 30° становив 3с (рис. 2, а), а для кутів 45° , 60° , 90° – 2 с (рис. 2 б, в, г).

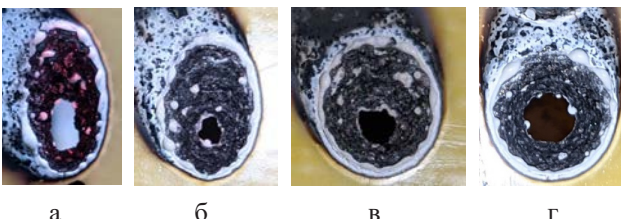


Рис. 2. Отвори утворені в результаті дії лазерного випромінювання потужністю 1 кВт та діаметром плями 10 мм: а – кут 30° , $t = 3$ с; б – кут 45° , $t = 2$ с; в – кут 60° , $t = 2$ с; г – кут 90° , $t = 2$ с

При збільшенні діаметра плями до 15 мм, потужності 1 кВт під кутами 30° – 90° і експозиції 3 с вже не вистачало для гарантованого руйнування матеріалу. Було вирішено збільшити потужність до 2 кВт. Для гарантованого руйнування на даній потужності, мінімально необхідна експозиція для руйнування матеріалу становила 3 с для всіх кутів (рис. 3).

При збільшенні діаметра плями до 20 мм, при потужності лазерного випромінювання 2 кВт не вистачило для гарантованого руйнування матеріалу.

Тому потужність збільшили до 3 кВт. За даної потужності вдалося досягти руйнування лише при куті падіння лазерного випромінювання 90° і експозиції 3 с (рис. 4, а).

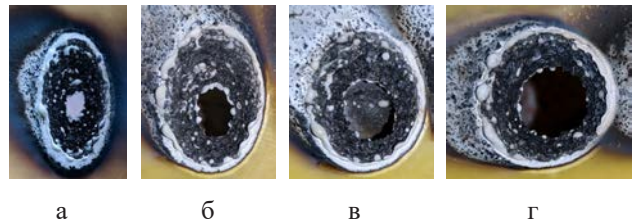


Рис. 3. Отвори утворені в результаті дії лазерного випромінювання потужністю 2 кВт, з діаметром плями 15 мм та експозицією 3 с: а – кут 30° ; б – кут 45° ; в – кут 60° ; г – кут 90°

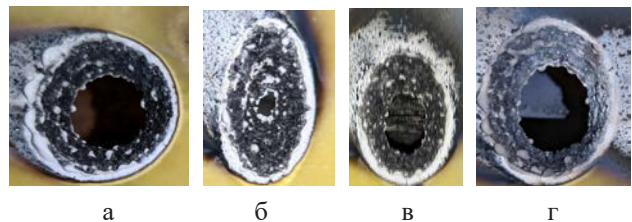


Рис. 4. Отвори утворені в результаті дії лазерного випромінювання потужністю 3–4 кВт, з діаметром плями 20 мм та експозицією 3с: а – кут 30° ; б – кут 45° ; в – кут 60° ; г – кут 90°

Для руйнування матеріалу під іншими кутами потужність підняли до 4 кВт та експозиція становила 3 с (рис. 4, б, в, г).

Також проводились дослідження руйнування під час переміщення лазерного випромінювання відносно поверхні матеріалу. Діаметри пучка лазерного випромінювання становили 5 мм та 10 мм за потужності 2–4 кВт. Так для гарантованого руйнування матеріалу при падінні лазерного випромінювання під кутом 30° , діаметрі пучка 5 мм та потужності 2 кВт, мінімальна швидкість переміщення становила 0,5 м/хв (рис. 5, а). При збільшенні потужності до 3–4 кВт та швидкості переміщення до 0,75–1 м/хв також відбувалося руйнування матеріалу. Але при потужності 4 кВт та швидкості переміщення 1,5 м/хв гарантоване руйнування не спостерігалось (рис. 5, б).

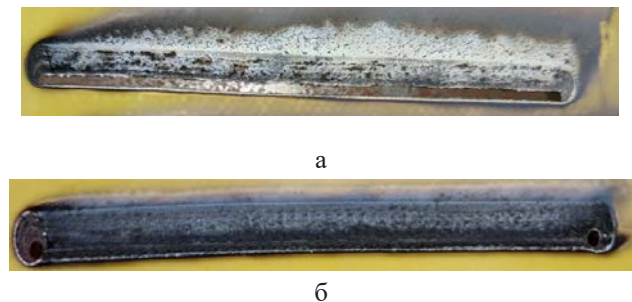


Рис. 5. Результат опромінення лазерним випромінюванням під кутом 30° , з діаметром плями 5 мм: а – $P = 2$ кВт, $V = 0,5$ м/хв; б – $P = 4$ кВт, $V = 1,5$ м/хв

При збільшенні діаметра пучка до 10 мм, потужності 4 кВт і швидкістю переміщення 0,5 м/хв гарантованого руйнування не спостерігалося (рис. 6).

При збільшенні кута падіння лазерного випромінювання до 45°, для гарантованого руйнування матеріалу, мінімальні параметри обробки становлять: потужність лазерного випромінювання 2 кВт, швидкість переміщення 0,75 м/хв, діаметр пучка 5 мм (рис. 7, а). Але при збільшенні швидкості до 1 м/хв руйнування не спостерігається (рис. 7, б).

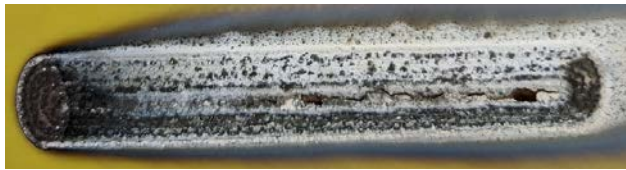


Рис. 6. Результат опромінення лазерним випромінюванням під кутом 30°, з діаметром плями 10 мм, потужністю 4 кВт і швидкістю переміщення 0,5 м/хв



а



б

Рис. 7. Результат опромінення лазерним випромінюванням під кутом 45°, з діаметром плями 5 мм, потужністю 2 кВт: а – $V = 0,75$ м/хв; б – $V = 1$ м/хв

При збільшенні потужності лазерного випромінювання до 3–4 кВт, відбувалося гарантоване руйнування включно до швидкості 1 м/хв (рис. 8, а), але вже на швидкості 1,5 м/хв руйнування не спостерігалося при потужності 3–4 кВт (рис. 8, б)



а



б

Рис. 8. Результат опромінення лазерним випромінюванням під кутом 45°, з діаметром плями 5 мм: а – $P = 3$ кВт, $V = 1$ м/хв; б – $P = 4$ кВт, $V = 1,5$ м/хв

При збільшенні діаметра лазерного променя до 10 мм, гарантоване руйнування матеріалу від-

бувалося тільки при потужності 4 кВт та швидкості переміщення 0,5 м/хв (рис. 9).

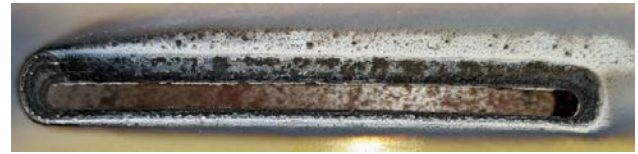


Рис. 9. Результат опромінення лазерним випромінюванням під кутом 45°, з діаметром плями 10 мм, $P = 3$ кВт, $V = 0,5$ м/хв

При збільшенні кута падіння лазерного випромінювання до 60°, для гарантованого руйнування матеріалу, мінімальні параметри обробки становлять: потужність лазерного випромінювання 2 кВт, швидкість переміщення 0,75 м/хв, діаметр пучка 5 мм (рис. 10, а). Також руйнування спостерігається при потужностях 3–4 кВт на швидкостях переміщення до 1–1,5 м/хв (рис. 10, б, в, г).



а



б



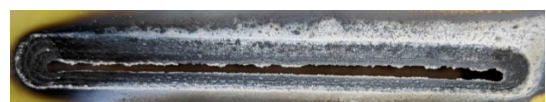
в

Рис. 10. Результат опромінення лазерним випромінюванням під кутом 60°, з діаметром плями 5 мм: а – $P = 2$ кВт, $V = 0,75$ м/хв; б – $P = 3$ кВт, $V = 1$ м/хв; в – $P = 4$ кВт, $V = 1,5$ м/хв

При збільшенні діаметра лазерного променя до 10 мм, гарантоване руйнування матеріалу відбувалося при потужності 3–4 кВт та швидкості переміщення 0,5–0,75 м/хв (рис. 11).



а



б

Рис. 11. Результат опромінення лазерним випромінюванням під кутом 60°, з діаметром плями 10 мм: а – $P = 3$ кВт, $V = 0,5$ м/хв; б – $P = 4$ кВт, $V = 0,75$ м/хв

При збільшенні кута падіння лазерного випромінювання до 90° , для гарантованого руйнування матеріалу, мінімальні параметри обробки становлять: потужність лазерного випромінювання 2 кВт, швидкість переміщення 0,75 м/хв, діаметр пучка 5 мм (рис. 12, а). При збільшенні потужності до 3–4 кВт та швидкості до 1–1,5 м/хв теж спостерігається руйнування (рис. 12, б, в).

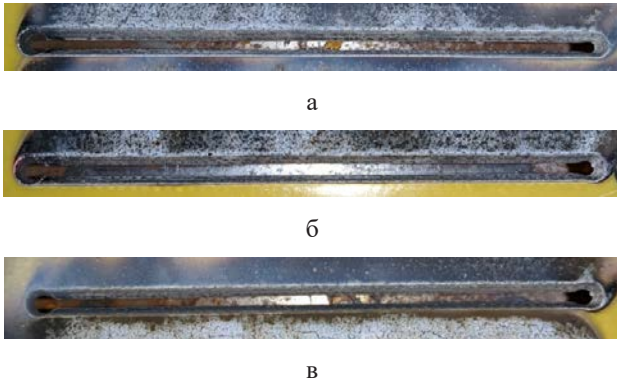


Рис. 12. Результат опромінення лазерним випромінюванням під кутом 90° , з діаметром плями 5 мм: а – $P = 2$ кВт, $V = 0,75$ м/хв; б – $P = 3$ кВт, $V = 1$ м/хв; в – $P = 4$ кВт, $V = 1,5$ м/хв

При збільшенні діаметра лазерного променя до 10 мм, гарантоване руйнування матеріалу відбувалося при потужності 3–4 кВт та швидкості переміщення 0,5–0,75 м/хв (рис. 13).

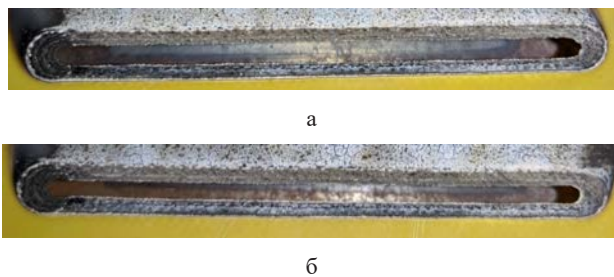


Рис. 13. Результат опромінення лазерним випромінюванням під кутом 90° , з діаметром плями 10 мм: а – $P = 3$ кВт, $V = 0,5$ м/хв; б – $P = 4$ кВт, $V = 0,75$ м/хв

За результатами досліджень були побудовані графіки для обробки отворів під кутом 90° на основі отриманих числових значень (рис. 14–17). Рисунок 14 відображає результати деструкції зразків склотекстоліту товщиною 2,0 мм, в залежності від співвідношення значень енергетичної експозиції (яка являє собою відношення енергії випромінювання до площі поверхні, яка опромінюється) та діаметру пучка на поверхні зразка, що обробляється. У верхній частині графіка 14 знаходиться область позначена зеленим кольором, у якій для

всіх значень вказаних параметрів, відбувається гарантоване руйнування зразку зі склотекстоліту товщиною 2,0 мм. У нижній частині рисунку 14 знаходиться область позначена червоним кольором, у якій для зазначених параметрів руйнування зразка зі склотекстоліту не було досягнуто взагалі. Посередині рисунку 14, між зеленою та червоною областями знаходиться частина позначена жовтим кольором. У жовтій області зафіксоване часткове (початкове) руйнування зразків зі склотекстоліту (без досягнення повного його пробиття).

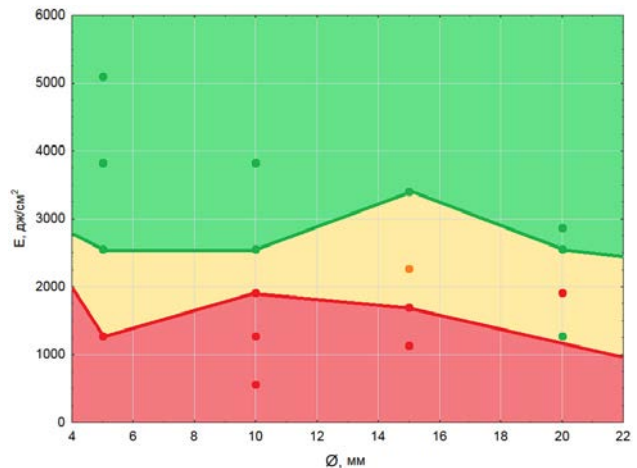


Рис. 14. Залежність результатів обробки від значень енергетичної експозиції та діаметру пучка лазерного випромінювання

Аналізуючи характер залежностей на рисунку 14, можна стверджувати, що гарантоване руйнування (пробиття) зразків з склотекстоліту товщиною 2,0 мм, вимагає одержання значень енергетичної експозиції не менше ніж 2500...3500 Дж/см² та слабо залежить від зміни діаметру лазерного пучка. При значеннях енергетичної експозиції менше 2500 Дж/см² руйнування зразка зі склотекстоліту товщиною 2,0 мм не може бути гарантованим.

На рис. 15 показаний графік залежності результатів обробки від значень енергетичної експозиції та потужності пучка лазерного випромінювання. Характер залежностей на рис.15 подібний до залежностей наведених на рис. 14. Так само, гарантоване руйнування (пробиття) зразків з склотекстоліту товщиною 2,0 мм, вимагає одержання певних значень енергетичної експозиції не менше ніж 2500...3500 Дж/см² та слабо залежить від зміни потужності пучка лазерного випромінювання. Як видно з графіку для потужностей 1–2 кВт ці значення знаходяться на одному рівні близько 2500 Дж/см², та знижується зі зростанням потужності лазерного випромінювання, що

використовується. Так для потужності 4 кВт вона зменшується до 2250 Дж/см².

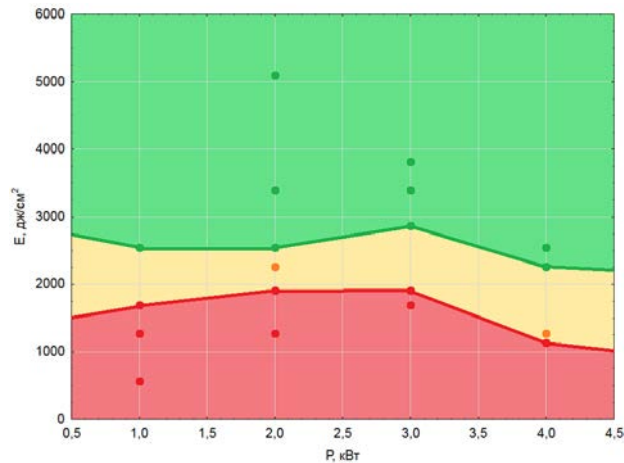


Рис. 15. Залежність результатів обробки від значень енергетичної експозиції та потужності лазерного випромінювання

На рис. 16 показаний графік залежності результатів обробки від значення енергетичної експозиції та часу обробки. Так само, як й для попереднього рисунку, характер залежностей на рис. 16 подібний до залежностей наведених на рис. 14 та рис. 15. Так само, гарантоване руйнування (пробиття) зразків з склотекстоліту товщиною 2,0 мм, вимагає одержання певних значень енергетичної експозиції не менше ніж 2250–2950 Дж/см² для всіх проміжків часу 0,25–3 секунди впливу на зразок, що обробляється.

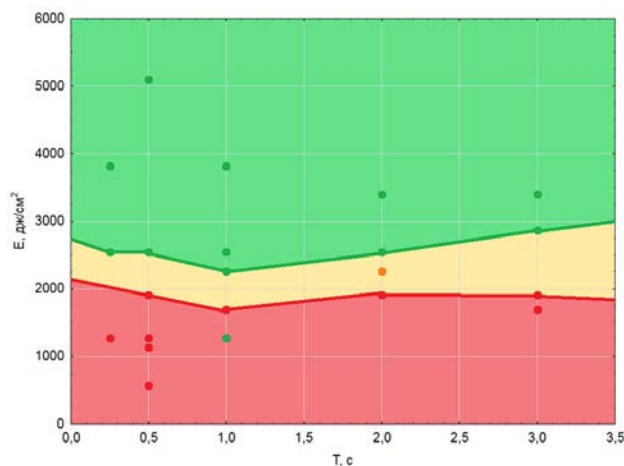


Рис. 16. Залежність результатів обробки від значень енергетичної експозиції та часу обробки

На рис. 17 показано характер залежностей результатів експерименту від густини потужності та часу обробки.

З рис. 17 видно, що практично відсутня «зона невизначеності» (яка позначена жовтим кольо-

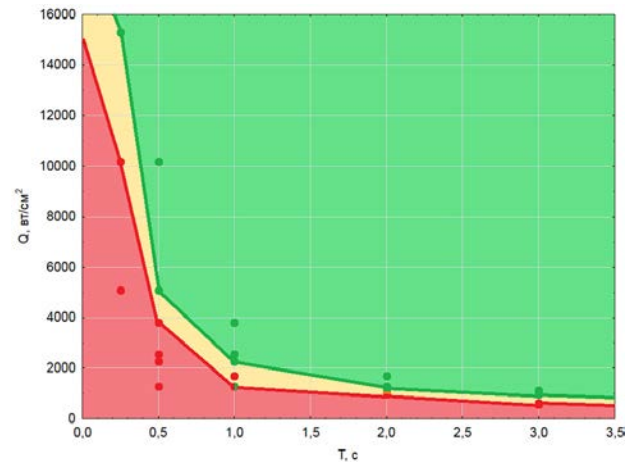


Рис. 17. Залежність результатів обробки від значень енергетичної експозиції та від густини потужності та часу обробки

ром), де пробиття не гарантоване. Це вказує, що матеріал гарно поглинає лазерне випромінювання зі зростанням часу впливу. Залежності мають гіперболічний характер. Для того щоб одержати гарантоване руйнування (пробиття) зразків з склотекстоліту товщиною 2,0 мм при використанні лазера з потужністю від 1,0 кВт та вище, достатньо досягнути густини потужності 2000 Вт/см². Відповідно зі зменшенням потужності лазерного випромінювання від 1,0 кВт до 0,5 кВт та нижче спостерігається різке збільшення вимог до значень густини потужності, при яких досягається повне пробиття матеріалу. Це може бути досягнуто або шляхом зменшення площі пучка на зразку, або збільшення потужності лазерного випромінювання. Перше вимагає використання складних оптико-механічних та оптико-електронних систем, а друге значно здорожчає реалізацію даного проекту.

Висновки. За результатами проведених експериментів було встановлено, що кут падіння лазерного випромінювання, діаметр пучка і потужність лазера мають значний вплив на час і ефективність руйнування композиційних скловмісних матеріалів. Для гарантованої деструкції склотекстоліту товщиною 2,0 мм при куті падіння лазерного випромінювання 90° і потужності 1 кВт, необхідний час експозиції становив лише 0,5 с, тоді як при менших кутах (30°, 45°, 60°) час експозиції збільшувався через зменшення щільності потужності пучка і розсіювання тепла. Наприклад, для кута 30° час експозиції зріс до 1 с. Збільшення діаметра пучка лазера до 10 мм при тих же параметрах призвело до необхідності збільшення часу експозиції до 3 с для кута 30°, і до 2 с для кутів

45°, 60°, і 90°. При збільшенні діаметра пучка до 15 мм і збереженні потужності на рівні 1 кВт, навіть тривала експозиція не призводила до гарантованого руйнування, що вимагало підвищення потужності до 2 кВт для досягнення потрібного результату. Дослідження також показало, що при потужності 3–4 кВт і швидкостях переміщення лазерного випромінювання до 1–1,5 м/хв забезпечується руйнування матеріалу. Однак при швидкості 1,5 м/хв і потужності 4 кВт руйнування не відбувалося. Таким чином, для різних кутів і діаметрів пучка необхідно коригувати потужність і швидкість лазера, щоб досягти гарантованого руйнування матеріалу.

Гарантоване руйнування зразків з склотекстоліту товщиною 2,0 мм, вимагає одержання значень енергетичної експозиції не менше ніж 2500...3500 Дж/см² та слабо залежить від зміни діаметру лазерного пучка. При значеннях енергетичної експозиції менше 2500 Дж/см² руйнування зразка зі склотекстоліту товщиною 2,0 мм не може бути гарантованим.

Гарантоване руйнування зразків з склотекстоліту товщиною 2,0 мм, вимагає одержання певних значень енергетичної експозиції не менше ніж 2500...3500 Дж/см² та слабо залежить від зміни потужності пучка лазерного випромінювання. Як видно з графіку для потужностей 1–2 кВт ці

значення знаходяться на одному рівні близько 2500 Дж/см², та знижується зі зростанням потужності лазерного випромінювання, що використовується. Так для потужності 4 кВт вона зменшується до 2250 Дж/см².

Для того щоб одержати гарантоване руйнування (пробиття) зразків з склотекстоліту товщиною 2,0 мм при використанні лазера з потужністю від 1,0 кВт та вище, достатньо досягнути густини потужності 2000 Вт/см². Відповідно зі зменшенням потужності лазерного випромінювання від 1,0 кВт до 0,5 кВт та нижче спостерігається різке збільшення вимог до значень густини потужності, при яких досягається повне пробиття матеріалу. Це може бути досягнуто або шляхом зменшення площі пучка на зразку, або збільшення потужності лазерного випромінювання. Перше вимагає використання складних оптико-механічних та оптико-електронних систем, а друге значно здорожчає реалізацію даного проекту.

Фінансування. Дослідження виконано за рахунок фінансування Національним фондом досліджень України проекту № 2023.04/0166 «Дослідження впливу лазерного пучка на матеріали деталей БПЛА та обґрунтування технічних параметрів лазерного обладнання мобільного комплексу для боротьби з ними» за договором грантової підтримки № 155/0166 від 01.08.2024.

Список літератури:

1. Wang X., Wu G., Xie P., Gao X., Yang W. Microstructure and properties of glass fiber-reinforced polyamide/nylon microcellular foamed composites. *Polymers*. 2020. № 12. 2368. <https://doi.org/10.3390/polym12102368>
2. Steinvall O. The potential role of laser in combating UAVs: part 2; laser as a countermeasure and weapon. *Technologies for Optical Countermeasures XVIII and High-Power Lasers: Technology and Systems, Platforms, Effects V*. 2021. №11867, 1186707. <https://doi.org/10.1117/12.2601755>
3. Săftoiu G.-V., Constantin C., Nicoară A.-I., Pelin G., Ficăi D., Ficăi A. Glass fibre-reinforced composite materials used in the aeronautical transport sector: A critical circular economy point of view. *Sustainability*. 2024. № 16(11). 4632. <https://doi.org/10.3390/su16114632>
4. Prabhu M., Murugan K., Kumar Solaiappan S., Solaiappan S. K., Raji A. P., Gnanasekaran R. K., et al. Design and multi-perspective based computational analyses of flying wing UAV for rescue applications at cryogenic environments. *AIAA AVIATION 2022 Forum*. Chicago, IL. 2022. <https://doi.org/10.2514/6.2022-3586>
5. Beziuk G., Baum T. C., Ghorbani K., Nicholson K. J. Structurally integrated radar in an aerospace composite laminate. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. 2021. № 11(11). P. 1835-1843. <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2021.3118108>
6. Kujawinska M., Kustron K., Siedlecki K., Malesa M. Investigations of high power laser beam interaction with composite materials by means of digital image correlation and thermography. *High-Power Lasers: Technology and Systems, Platforms, and Effects*. 2017. №10436. 104360H. <https://doi.org/10.1117/12.2281119>
7. Allheily V., Retailleau F., Jean T., Merlat L. Modelling the behaviour of UAVs structural materials under continuous laser irradiations. *High-Power Lasers and Technologies for Optical Countermeasures*. 2022. № 12273. 1227306. <https://doi.org/10.1117/12.2637845>
8. Jing Xi., Gang R., Rongjun G., Chunquan G., Yongjun X., Quanxi L., et al. Research on the ablation characteristics of combined lasers for glass fiber reinforced plastic composites. *Frontiers in Physics*. 2023. № 11. <https://doi.org/10.3389/fphy.2023.1230004>

Bernatskyi A.V., Yurchenko Yu.V., Siora O.V., Sokolovskyi M.V., Siora I.V. STUDY OF THE EFFECT OF LASER RADIATION ON GLASS-CONTAINING COMPOSITE MATERIALS

The article is devoted to the study of the behavior of fiberglass under the action of high-power laser radiation to determine the optimal parameters of destruction of this composite material. The use of laser weapons against unmanned aerial vehicles made of fiberglass-based composites is an urgent task, so the study of the effect of laser beam parameters, such as power, spot diameter, and angle of incidence, on the material destruction efficiency is of great practical importance. For the experiments, we used a Nd:YAG laser with a radiation power of up to 4.4 kW and a wavelength of 1.06 μm . Fiberglass sheets with dimensions of 1000 \times 500 \times 2 mm were laser processed with the variation of such parameters as power (1–4 kW), beam diameter (5–20 mm), angles of incidence (30°, 45°, 60°, 90°), and laser beam travel speed (0.5–2 m/min). It was established the most effective material destruction was observed at a normal beam incidence (90°) and a power of 1 kW with a minimum exposure of 0.5 s. With a decrease in the beam incidence angle to 30°, the exposure time for guaranteed destruction increased to 1 s, which is explained by an increase in the beam area and a decrease in power density. Increasing the beam diameter to 10 mm required a longer exposure time to achieve destruction, in particular, up to 3 s at an angle of 30°. A diameter of 15 mm required an increase in power to 2–4 kW for effective destruction. It was determined that no fracture was observed at a power of 4 kW and a beam speed of up to 1.5 m/min, which requires careful optimization of the parameters for different conditions. It is proved that for guaranteed destruction of the material at a fiberglass thickness of 2 mm, it is necessary to provide an energy exposure of at least 2500–3500 J/cm². At energy exposures of less than 2500 J/cm², guaranteed destruction of the sample did not occur. In addition, it was confirmed that the energy exposure is weakly dependent on changes in the beam diameter. For example, for powers of 1–2 kW, these indicators remain at the level of 2500 J/cm², but with an increase in power to 4 kW they decrease to 2250 J/cm². It has been found that at powers of 1 kW and above, to pierce fiberglass with a thickness of 2 mm, it is necessary to achieve a power density of 2000 W/cm². When the power is reduced to 0.5 kW, the density requirements increase dramatically, requiring the use of either more precise optical systems for focusing the beam or an increase in laser power, which complicates the technology and increases its cost. In general, the results of the study have established the optimal parameters of laser processing of fiberglass, which can be used to develop strategies to combat UAVs made of composite materials.

Key words: UAVs, composite materials, fiberglass, laser radiation, thermal effects, evaporation, fracture.