

УДК 539.422.52
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.3\(501\).5](https://doi.org/10.15589/znp2025.3(501).5)

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF VARIOUS LASER RADIATION SOURCES ON CARBON PROCESSING RESULTS

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ РІЗНИХ ДЖЕРЕЛ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА РЕЗУЛЬТАТИ ОБРОБКИ КАРБОНУ

Artemii V. Bernatskyi
bernatskyi@paton.kiev.ua
ORCID: 0000-0002-8050-5580

Mykola V. Sokolovskyi
m_sokolovskyi@paton.kiev.ua
ORCID: 0000-0003-3243-5060

Oleksandr V. Siora
siora_ov@ukr.net
ORCID: 0000-0003-1927-790X

Valentyna I. Bondarieva
laser-77@online.ua
ORCID: 0000-0002-4745-0995

Yurii Yu. Yurchenko
yuriyyurchenko14@gmail.com
ORCID: 0000-0001-9253-009X

А. В. Бернацький,
канд. техн. наук, старший дослідник

М. В. Соколовський,
доктор філософії, провідний інженер

О. В. Сіора,
науковий співробітник

В. І. Бондарєва,
заступник завідувача відділу

Ю. Ю. Юрченко,
аспірант, провідний інженер

E. O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv

Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона Національної академії наук України, м. Київ

Abstract. Purpose. The goal of the work is to determine the patterns of influence of geometric (incidence angle, beam spot diameter) and energy (power, duration of exposure) parameters of laser radiation on the intensity and nature of penetration of carbon fiber samples.

Method. The article presents the results of a comprehensive experimental study of the process of destruction of carbon plates with a thickness of 2.0 mm under the influence of fiber laser radiation and a detailed comparison with the efficiency of using a solid-state Nd:YAG laser. Within the experimental program, the power range from 1.0 to 3.0 kW, the duration of irradiation of 0.5–3.0 s and the diameter of the laser spot of 5.0–20.0 mm at radiation incidence angles of 90°, 60°, 45°, 30° were investigated.

Results. The results obtained indicate that the fiber laser demonstrates significantly higher efficiency, since it provides penetration of the material at significantly lower energy characteristics. In particular, at normal incidence of laser radiation, the difference in the values of energy parameters is 4–8 times in favor of the fiber laser, at an angle of 30° from 2 to 9.1 times, at 45° 3–6 times, and at 60° 2–6 times. It is shown that the smallest spread in power density is achieved at a right angle, which is explained by the minimum area of the material that requires processing. At the same time, the smallest spread in the values of energy exposure to laser radiation was obtained at an angle of incidence of 45°, which is due to a stable relationship between the increase in the volume of the processed material and the required energy consumption. The largest difference between the sources is observed at an angle of 30°, where the differences reach 9.1 times, which is explained by the increase in the interaction area and the peculiarities of the energy distribution in the profile of the laser beam.

Scientific novelty. The scientific novelty of the work lies in the first systematic analysis of the influence of the angle of incidence, power and time parameters of radiation on the efficiency of destruction of carbon-based plastics using different types of lasers. The established quantitative relationships make it possible to explain the mechanisms of the advantage of using fiber laser radiation over solid-state radiation and to determine critical processing modes that allow achieving maximum efficiency with minimal energy consumption.

Practical significance. The practical significance of the results obtained lies in the possibility of their application both in production technologies for processing composite materials (cutting, drilling, micromachining) and in the defense sector, in particular when creating systems to counter unmanned aerial vehicles. In the conditions of modern conflicts, where most drones are made of carbon-based structures, the development of optimal laser exposure modes allows

to increase the efficiency of their neutralization. Thus, the results of the study can become a scientific basis for the development of new technologies in the field of security, as well as serve as a reference for industrial and military applications where rapid and controlled destruction of carbon structures is required.

Key words: laser radiation; fiber laser; Nd:YAG laser; carbon; treatment modes; comparison.

Анотація. *Мета.* Метою роботи є визначення закономірностей впливу геометричних (кут падіння, діаметр плями пучка) та енергетичних (потужність, тривалість впливу) параметрів лазерного випромінювання на інтенсивність і характер пробиття вуглепластикових зразків.

Методика. У статті наведено результати комплексного експериментального дослідження процесу руйнування карбонових пластин товщиною 2,0 мм під дією випромінювання волоконного лазера та здійснено детальне порівняння з ефективністю застосування твердотільного Nd:YAG-лазера. У межах експериментальної програми було досліджено діапазон потужності лазерного випромінювання від 1,0 до 3,0 кВт, тривалість опромінення 0,5–3,0 с та діаметр лазерної плями 5,0–20,0 мм при кутах падіння випромінювання 90°, 60°, 45°, 30°.

Результати. Отримані результати свідчать, що волоконний лазер демонструє значно вищу ефективність, оскільки забезпечує пробиття матеріалу при значно нижчих показниках енергетичних характеристик. Зокрема, при нормальному падінні лазерного випромінювання різниця у значеннях енергетичних параметрів становить 4–8 разів на користь волоконного лазера, при куті 30° від 2 до 9,1 разів, при 45° у 3–6 разів, а при 60° у 2–6 разів. Показано, що найменший розкид густини потужності досягається під прямим кутом, що пояснюється мінімальною площею матеріалу, яка потребує обробки. Водночас найменший розкид величин енергетичної експозиції лазерного випромінювання отримано при куті падіння 45°, що зумовлено стабільним співвідношенням між приростом об'єму оброблюваного матеріалу та необхідними енергетичними витратами. Найбільша різниця між джерелами спостерігається при обробці під кутом 30°, де відмінності сягають 9,1 рази, що пояснюється зростанням площі взаємодії та особливостями розподілу енергії у профілі пучка лазерного випромінювання.

Наукова новизна. Наукова новизна роботи полягає у вперше здійсненому системному аналізі впливу кута падіння, потужності та часових параметрів випромінювання на ефективність руйнування вуглепластиків із застосуванням різних типів лазерів. Встановлені кількісні співвідношення дають можливість пояснити механізми переваги застосування випромінювання волоконного лазера над твердотільним і визначити критичні режими обробки, що дозволяють досягати максимальної результативності при мінімальних енергетичних витратах.

Практична значимість. Практична значимість отриманих результатів полягає у можливості їх застосування як у виробничих технологіях обробки композитних матеріалів (різання, свердління, мікрообробка), так і в оборонній сфері, зокрема при створенні систем протидії безпілотним літальним апаратам. В умовах сучасних конфліктів, де більшість дронів виготовлені з вуглепластикових конструкцій, розробка оптимальних режимів лазерного впливу дозволяє підвищити ефективність їх нейтралізації. Таким чином, результати дослідження можуть стати науковою основою для розробки нових технологій у сфері безпеки, а також слугувати орієнтиром для промислових і військових застосувань, де потрібне швидке й контрольоване руйнування конструкцій із карбону.

Ключові слова: лазерне випромінювання; волоконний лазер; Nd:YAG-лазер; карбон; режими обробки; порівняння.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Активне впровадження карбон-композитів у сучасному авіа-, космічному та транспортному машинобудуванні актуалізує необхідність пошуку оптимальних методів їх обробки, оскільки унікальні властивості цього матеріалу (висока питома міцність, мала густина, стійкість до втомних навантажень), поєднуються з підвищеною чутливістю до локалізованих термічних впливів. Лазерні технології обробки матеріалів розглядаються як один із найбільш ефективних методів, здатних забезпечити високу точність, мінімальні розміри та часові значення результатів впливу. Водночас, різноманіття існуючих джерел лазерного випромінювання (від волоконних і твердотільних до діодних, хімічних та газових), формує складність у виборі оптимального варіанта для роботи з вуглепластиком. Кожне джерело має власні фізичні характеристики, такі як довжина хвилі, режим генерації, форма імпульсу та енергетична

щільність, що визначають специфіку його взаємодії з матеріалом. У зв'язку з цим постає наукова проблема, яка полягає у відсутності цілісного уявлення про відмінності впливу різних типів лазерного випромінювання на структуру і властивості вуглепластику. Без такого порівняльного аналізу неможливо сформулювати обґрунтовані рекомендації для промислових технологій, а також оцінити потенційні ризики чи переваги застосування лазерних систем у сфері безпеки та оборони.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Останні дослідження у сфері протидії безпілотним літальним апаратам за допомогою лазерного випромінювання демонструють зростаючу увагу до вразливості їхніх конструкційних матеріалів, зокрема карбон-композитів, що широко застосовуються у сучасних БПЛА [1–3]. Багато робіт доводять, що

саме композитні матеріали, попри їхню високу міцність і низьку масу, мають обмежену стійкість до дії концентрованих енергетичних потоків, особливо у випадку локалізованого лазерного нагріву [4–6]. Встановлено, що лазерне ураження може призводити до поверхневого обвуглення, розшарування матриці та поступового руйнування несучих волокон, що знижує несучу здатність конструкцій БПЛА [7–9]. Значна частина експериментальних публікацій акцентує увагу на впливі довжини хвилі та режиму генерації: короткоімпульсні лазери забезпечують швидке локальне пошкодження без значного поширення теплових ефектів, тоді як безперервні режими спричиняють глибше прогрівання і більші зони руйнування [10–12]. Особливий інтерес становлять дослідження, де аналізується залежність ефективності лазерного ураження від кута падіння променя: показано, що при косому опроміненні зона пошкодження стає еліптичною, а розподіл енергії у матеріалі зменшує глибину ураження, що потребує оптимізації траєкторій наведення променя для рухомих цілей [13–15]. Дослідження також виявили, що накопичений ефект від багатократних імпульсів може бути більш руйнівним, ніж одноразова дія високої потужності, що відкриває можливості для використання лазерів середньої енергії у режимах повторного сканування. Публікації останніх років підкреслюють важливість урахування анізотропних властивостей вуглепластику: руйнування поширюється вздовж волокон швидше, ніж через матрицю, що формує характерні траєкторії пошкоджень у крилах та фюзеляжі БПЛА [16–18]. Значний інтерес становить поєднання лазерного впливу з механічними чи аеродинамічними факторами, де доводиться, що навіть часткове термічне ослаблення карбон-композиту здатне призвести до катастрофічного виходу з ладу апарата у польоті. У ряді робіт також вказано на необхідність оптимізації спектрального діапазону випромінювання з урахуванням коефіцієнтів поглинання карбону, що дозволяє мінімізувати втрати енергії і підвищити швидкість ураження. Узагальнюючи, сучасні публікації демонструють, що найбільш перспективними є імпульсні та волоконні лазерні системи, здатні забезпечувати баланс між точністю наведення, швидкістю руйнування та мінімальними енергетичними затратами. Водночас, досі бракує систематизованих досліджень, які б уніфіковано порівнювали різні джерела лазерного випромінювання саме в умовах протидії БПЛА, що залишає простір для подальших розвідок у цьому напрямі.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

У даній роботі, на відміну від розглянутих робіт, загальна задача, яку ставить ця стаття, полягає у здійсненні комплексного порівняльного аналізу впливу різних джерел лазерного випромінювання

(волоконного та твердотілого лазерів, які працюють у режимі неперервної генерації лазерного випромінювання), на результати обробки карбону. Реалізація цього завдання передбачає інтегроване дослідження ефективності джерел за ключовим критерієм, а саме досягнення гарантованого наскрізного руйнування карбонової пластини у зоні дії лазерного випромінювання. Виконання такого дослідження дозволило встановити взаємозв'язок між параметрами випромінювання і якістю обробки, а також виявити найбільш раціональні режими взаємодії для кожного типу лазера. Наукова значущість розв'язання цієї задачі полягає у поглибленні розуміння фізичних механізмів руйнування вуглепластику під дією лазерного випромінювання з різними характеристиками джерел генерації. Практична ж цінність зосереджена у можливості формування науково-обґрунтованих рекомендацій для організацій, що працюють з композитними матеріалами, а також у підвищенні ефективності застосування лазерних систем у сфері протидії безпілотним літальним апаратам.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даної роботи є порівняльний аналіз впливу різних джерел лазерного випромінювання на результати обробки карбону.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

При виконанні програми експериментальних досліджень використовувалась карбонова пластина чорного кольору з матовою поверхнею, розміром 500×500 мм та товщиною 2,0 мм, виготовлена за технологією 3K Twill. В якості джерел лазерного випромінювання використовували: волоконний лазер «MAX MFSC-6000M» з потужністю до 6,0 кВт та довжиною хвилі випромінювання $\lambda = 1070$ нм, виробництва компанії «Maxphotonics» (Китай); твердотільний Nd:YAG-лазер «DY044» з потужністю випромінювання до 4,4 кВт та довжиною хвилі випромінювання $\lambda = 1064$ нм, виробництва фірми «Rofin-Sinar» (Німеччина). Параметри режимів обробки змінювали дискретно: потужність лазерного випромінювання 1,0 кВт, 2,0 кВт, 3,0 кВт; кути падіння лазерного променя відносно поверхні матеріалу 30° , 45° , 60° , 90° ; час впливу лазерного випромінювання на матеріал зразка 0,25 с, 0,5 с, 1,0 с, 2,0 с, 3,0 с; діаметр плями лазерного випромінювання на поверхні карбонової пластини складав 5,0 мм, 10,0 мм, 15,0 мм, 20,0 мм (згідно рис.1). В зону обробки подавали стиснене повітря, для видалення продуктів руйнування.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

На рис. 2 наведено графік залежності необхідної для пробиття енергетичної експозиції (E) від потужності (P) лазерного випромінювання, при обробці під кутом 90° (згідно схемі, що наведено на рис. 1).

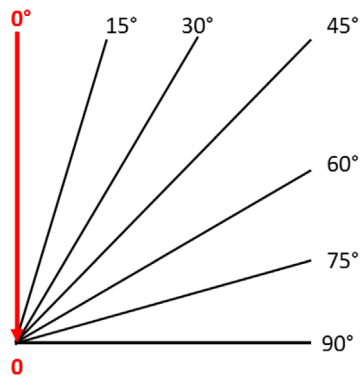


Рис. 1. Схема вимірювання кутів падіння лазерного випромінювання на зразок

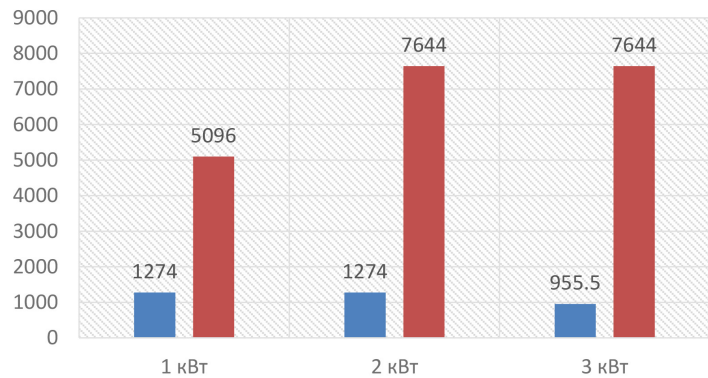


Рис. 2. Графік залежності необхідної для пробиття енергетичної експозиції (E) від потужності (P) лазерного випромінювання

Можна відмітити, що при використанні волоконного лазера зі збільшенням потужності лазерного випромінювання величина необхідної для пробиття енергетичної експозиції падає. В той же час, ця величина зростає при використанні твердотільного лазера. Це свідчить про необхідність використання висококонцентрованого пучка лазерного випромінювання, що знижує цю величину для волоконних лазерів відносно твердотільних, оскільки лазерне випромінювання, згенероване волоконним лазером, має у 12–16 разів вищу інтенсивність у порівнянні з твердотільним лазером, що використовувався у даному порівнянні. Різниця у величинах між лазерами є 4...8-кратною (див. табл. 1).

Таблиця 1. Порівняння необхідної для пробиття енергетичної експозиції (E) від потужності (P) лазерного випромінювання

Потужність лазерного випромінювання P, кВт	Волоконний лазер	Твердотільний лазер	Відношення E_2/E_1
	E_1 , Дж/см²	E_2 , Дж/см²	
1 кВт	1274	5096	4
2 кВт	1274	7644	6
3 кВт	955,5	7644	8

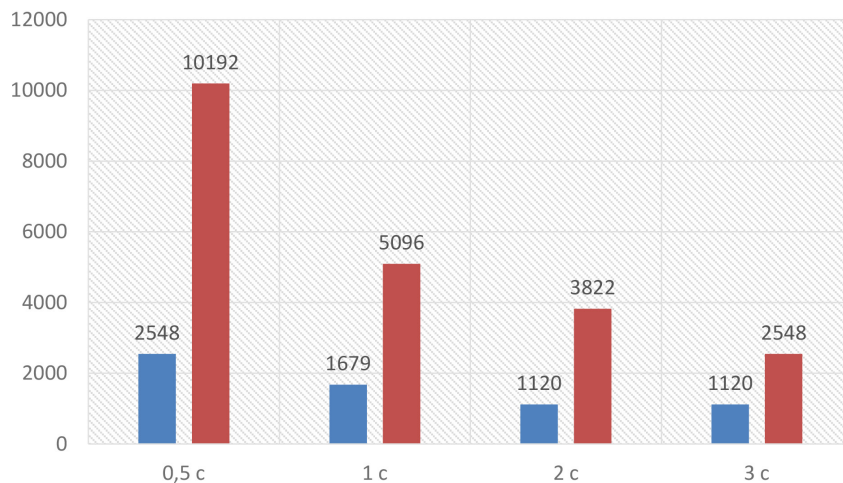


Рис. 3. Графік залежності необхідної для пробиття густини потужності (Q) від часу обробки (T)

Таблиця 2. Порівняння необхідних для пробиття складових робочих режимів (енергетичної експозиції E та густини потужності Q) від часу обробки (T)

Час впливу, T, с	Волоконний лазер		Твердотільний лазер		Відносне значення	
	Q ₁ , Вт/см²	E ₁ , Дж/см²	Q ₂ , Вт/см²	E ₂ , Дж/см²	Q ₂ /Q ₁	E ₂ /E ₁
0,5 с	2548	1274	10 192	5096	4	4
1 с	1679	1679	5096	5096	3,03514	3,03514
2 с	1120	1274	3822	7644	3,4125	6
3 с	1120	1911	2548	7644	2,275	4

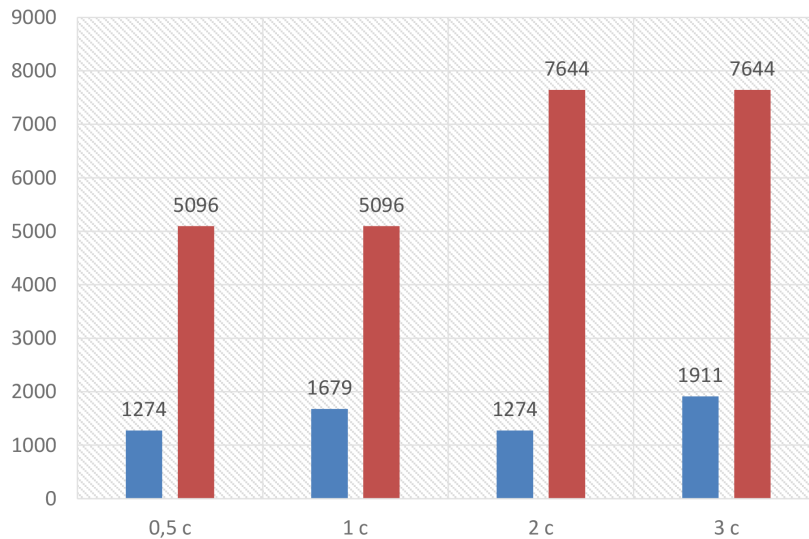


Рис. 4. Графік залежності необхідної для пробиття енергетичної експозиції (E) від часу обробки (T)

Дані, наведені на таблиці 1, візуалізовано на рис. 2.

Можна спостерігати стабільне зниження величин густини потужності при збільшенні часу обробки (рис. 3 та табл. 2). Відносно твердотілого лазера, при використанні волоконного лазера величина необхідної густини потужності зменшується у 3...6 разів.

Дані, наведені на табл. 2, візуалізовано на рис. 3 та рис. 4.

Спостерігається відносна стабільність величини енергетичної експозиції в залежності від часу обробки. Це свідчить про те, що для обробки карбонової пластики під даним кутом основним фактором є саме кількість енергії, доведеної до зони обробки. При використанні волоконного лазера величина необхідної енергетичної експозиції зменшується у 3...6 разів відносно такої, що необхідна при використанні твердотілого лазера.

На рис. 5 наведено графік залежності необхідної для пробиття енергетичної експозиції (E) від потужності (P) лазерного випромінювання, при обробці під кутом 30° (згідно схеми, що наведено на рис. 1). При використанні волоконного лазера величина критичних точок енергетичної експозиції, що гарантовано забезпечують пробиття матеріалу, зменшується у 2...4 рази відносно випромінювання, згенерованого твердотілим лазером (див. табл. 5).

Дані, наведені на таблиці 3, візуалізовано на рис. 5.

Дані, наведені на табл. 4, візуалізовано на рис. 6 та рис. 7. На графіку можна спостерігати падіння необхідної густини потужності при збільшенні часу обробки. Однак, треба відмітити, що це падіння відбувається на 0,5 с раніше при використанні волоконного лазера.

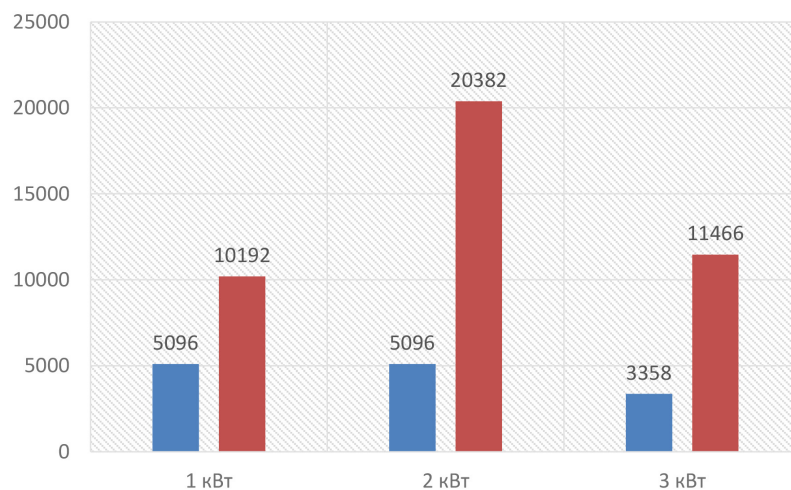


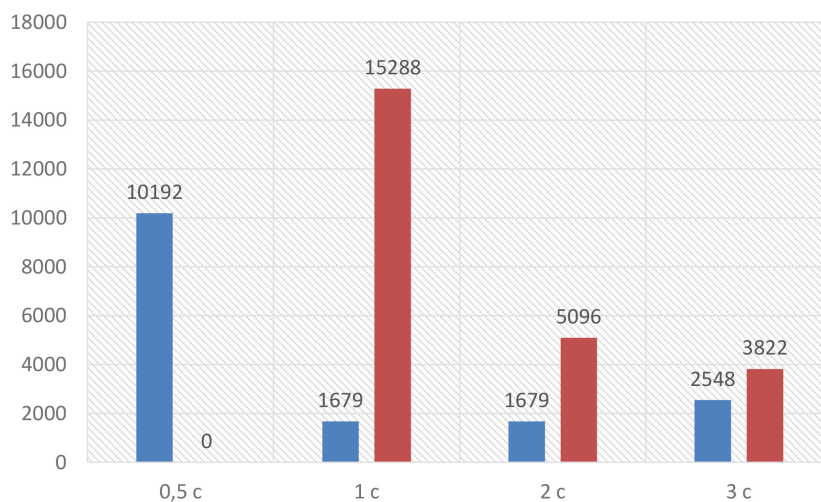
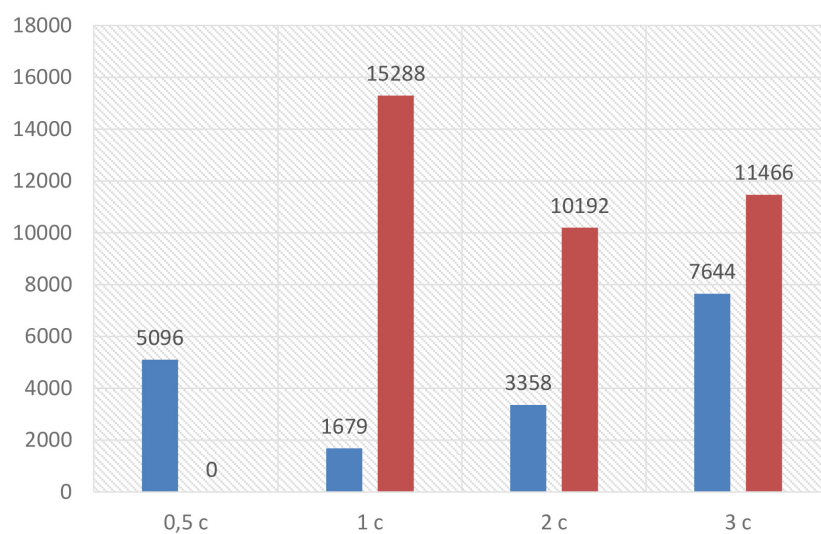
Рис. 5. Графік залежності необхідної для пробиття енергетичної експозиції (E) від потужності (P) лазерного випромінювання

Таблиця 3. Порівняння необхідної для пробиття енергетичної експозиції (E) від потужності (P) лазерного випромінювання

Потужність лазерного випромінювання P , кВт	Волоконний лазер	Твердотільний лазер	Відносне значення E_2/E_1
	E_1 , Дж/см ²	E_2 , Дж/см ²	
1 кВт	5096	10 192	2
2 кВт	5096	20 382	4
3 кВт	3358	11 466	3,415

Таблиця 4. Порівняння необхідних для пробиття складових робочих режимів (енергетичної експозиції E та густини потужності Q) від часу обробки (T)

Час впливу, T , с	Волоконний лазер		Твердотільний лазер		Відносне значення	
	Q_1 , Вт/см ²	E_1 , Дж/см ²	Q_2 , Вт/см ²	E_2 , Дж/см ²	Q_2/Q_1	E_2/E_1
0,5 с	10192	5096	0	0	0	0
1 с	1679	1679	15288	15288	9,10542	9,10542
2 с	1679	3358	5096	10192	3,03514	3,03514
3 с	2548	7644	3822	11466	1,5	1,5

**Рис. 6.** Графік залежності необхідної для пробиття густини потужності (Q) від часу обробки (T)**Рис. 7.** Графік залежності необхідної для пробиття енергетичної експозиції (E) від часу обробки (T)

Необхідно відзначити нехарактерне зростання необхідної енергетичної експозиції для лазерного випромінювання, згенерованого волоконним лазером, при зростанні часу обробки, а також те, що при заданому діапазоні характеристик робочих режимів твердотільний лазер не зміг пробити карбонну пластину при часі обробки у 0,5 с.

Відносно твердотільного лазера, при використанні волоконного лазера величина критичних точок, що гарантовано забезпечують пробиття матеріалу, зменшується у 1,5...9 разів. Така висока різниця пояснюється високою складністю обробки під таким кутом через різке збільшення площі оброблюваного матеріалу.

На рис. 8 наведено графік залежності необхідної для пробиття енергетичної експозиції (E) від потужності (P) лазерного випромінювання, при обробці під кутом 45° (згідно схемі, що наведено на рис. 1).

Таблиця 5. Порівняння необхідної для пробиття енергетичної експозиції (E) від потужності (P) лазерного випромінювання

Потужність лазерного випромінювання P , кВт	Волоконний лазер	Твердотільний лазер	Відносне значення E_2/E_1
	E_1 , Дж/см ²	E_2 , Дж/см ²	
1 кВт	2548	10 192	4
2 кВт	2240	10 192	4,55
3 кВт	1679	7644	4,55

Дані, наведені на таблиці 5, візуалізовано на рис. 8.

Для обох лазерів характерним є падіння необхідного значення енергетичної експозиції при рості потужності лазерного випромінювання. Дані, наведені на таблиці 6, візуалізовано на рис. 9 та рис. 10. Важливо відмітити різке падіння необхідної для пробиття густини потужності при лазерній обробці при збільшенні часу обробки. Однак, важливо зазначити, що для волоконного лазера стабілізація необхідного рівня густини потужності відбувається на 1 с раніше, ніж для твердотільного лазера.

Відмічено відносну стабільність величини енергетичної експозиції в залежності від часу обробки. Це свідчить про те, що для обробки карбонової пластини під даним кутом основним фактором є саме кількість

Таблиця 6. Порівняння необхідних для пробиття складових робочих режимів (енергетичної експозиції E та густини потужності Q) від часу обробки (T)

Час впливу, T , с	Волоконний лазер		Твердотільний лазер		Відносне значення	
	Q_1 , Вт/см ²	E_1 , Дж/см ²	Q_2 , Вт/см ²	E_2 , Дж/см ²	Q_2/Q_1	E_2/E_1
0,5 с	5096	2548	15288	7644	3	3
1 с	1679	1679	10192	10 192	6,07028	6,07028
2 с	956	1911	3822	7644	3,99791	4
3 с	1120	3360	3822	11 466	3,4125	3,4125

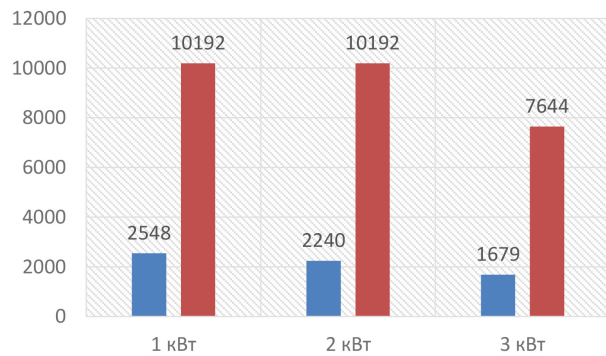


Рис. 8. Графік залежності необхідної для пробиття енергетичної експозиції (E) від потужності (P) лазерного випромінювання

енергії, доведеної до зони обробки. Відносно твердотільного лазера, при використанні волоконного лазера величина критичних точок, що гарантовано

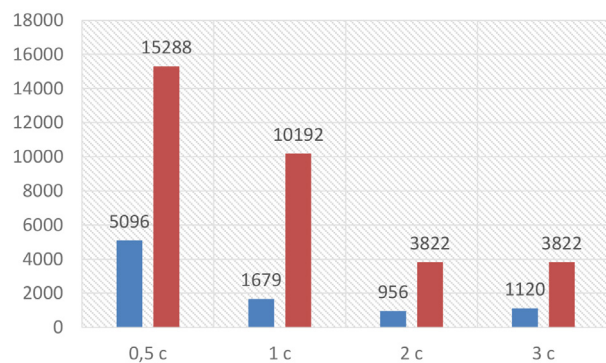


Рис. 9. Графік залежності необхідної для пробиття густини потужності (Q) від часу обробки (T)

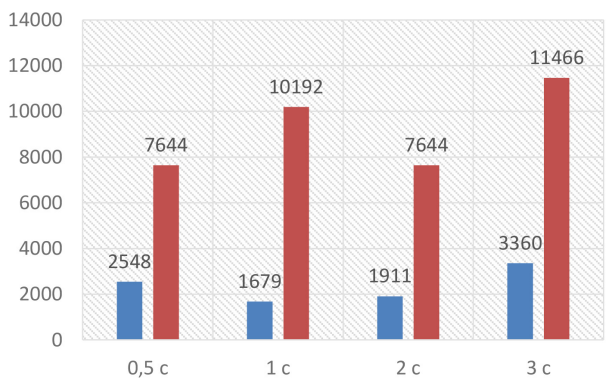


Рис. 10. Графік залежності необхідної для пробиття енергетичної експозиції (E) від часу обробки (T)

забезпечують пробиття матеріалу, зменшується у 3...6 разів.

Дані, наведені на таблиці 7, візуалізовано на рис. 11. На рис. 11 наведено графік залежності необхідної для пробиття енергетичної експозиції (E) від потужності (P) лазерного випромінювання, при обробці під кутом 60° (згідно схемі, що наведено на рис. 1). Можна відмітити різке падіння необхідної енергетичної експозиції для лазерного випромінювання, згенерованого волоконним лазером, при зростанні потужності лазерного випромінювання до 3 кВт.

Таблиця 7. Порівняння необхідної для пробиття енергетичної експозиції (E) від потужності (P) лазерного випромінювання

Потужність лазерного випромінювання P , кВт	Волоконний лазер	Твердотільний лазер	Відносне значення E_2/E_1
	E_1 , Дж/см ²	E_2 , Дж/см ²	
1 кВт	0	5096	0
2 кВт	2240	7644	3,4125
3 кВт	955,5	7644	8

Відносно твердотільного лазера, при використанні волоконного лазера величина критичних точок, що

гарантовано забезпечують пробиття матеріалу, зменшується у 3...8 разів.

Дані, наведені на таблиці 8, візуалізовано на рис. 12 та рис. 13.

Можна відмітити, що різниця між величинами густини потужності та енергетичної експозиції різних лазерів є сталою у кратності. Це свідчить про стабільність режимів, що визначають дані величини.

При використанні волоконного лазера величина критичних точок, що гарантовано забезпечують пробиття матеріалу, зменшується у 2...6 разів відносно випромінювання, згенерованого твердотільним лазером.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ СТАТТІ

У ході експериментів із пробиття карбонової пластини товщиною 2,0 мм волоконним лазером у діапазоні потужності 1,0–3,0 кВт, тривалості впливу 0,5–3,0 с та діаметра пучка 5,0–20,0 мм встановлено, що енергетичні параметри, необхідні для забезпечення даного процесу, є у кілька разів нижчими порівняно з режимами, потрібними при застосуванні твердотільного Nd:YAG-лазера. Зокрема, при опроміненні під прямим кутом співвідношення енергетичних характеристик становить 4–8 разів, при куті 30° від вертикалі – 2–9,1 разів, при 45° – 3–6 разів, а при 60° – 2–6 разів на користь волоконного лазера.

Найменший діапазон коливання густини потужності зафіксовано при обробці під прямим кутом

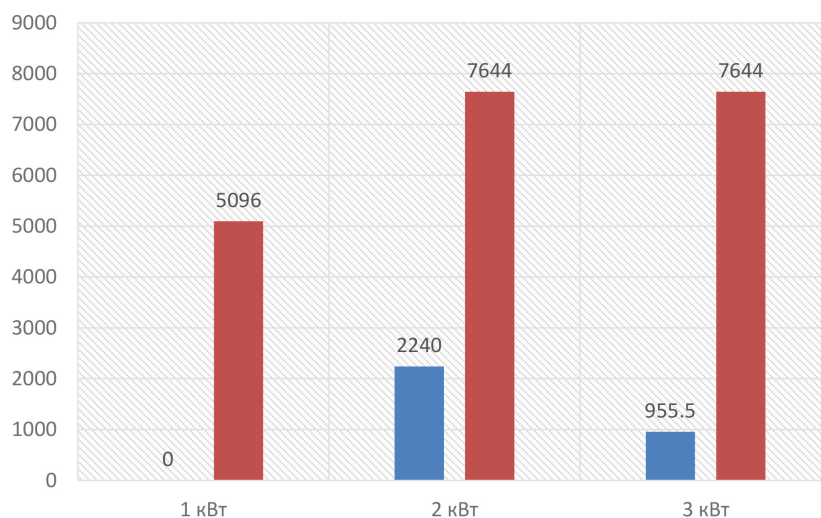


Рис. 11. Графік залежності необхідної для пробиття енергетичної експозиції (E) від потужності (P) лазерного випромінювання

Таблиця 8. Порівняння необхідних для пробиття складових робочих режимів (енергетичної експозиції E та густини потужності Q) від часу обробки (T)

Час впливу, T , с	Волоконний лазер		Твердотільний лазер		Відносне значення	
	Q_1 , Вт/см ²	E_1 , Дж/см ²	Q_2 , Вт/см ²	E_2 , Дж/см ²	Q_2/Q_1	E_2/E_1
0,5 с	1679	839,5	10192	5096	6,07	6,07
1 с	955,5	955,5	5096	5096	5,33	5,33
2 с	955,5	1911	3822	7644	4	4
3 с	1120	3360	2265	6795	2,02	2,02

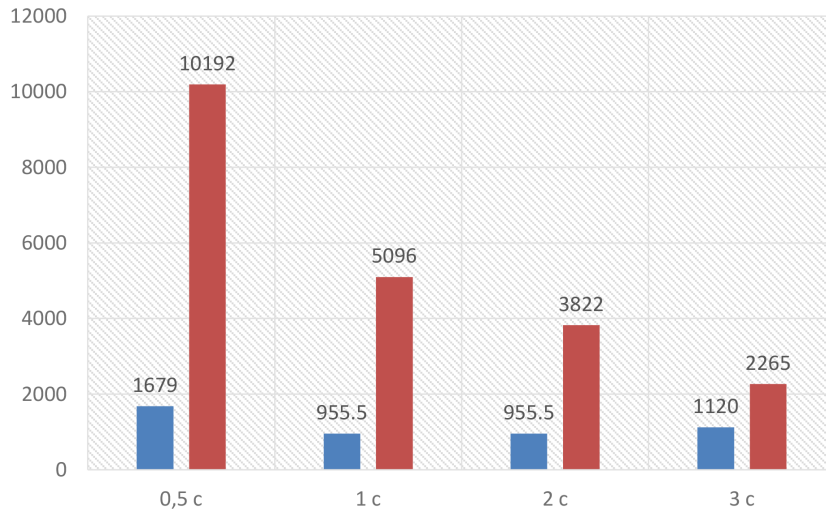


Рис. 12. Графік залежності необхідної для пробиття густини потужності (Q) від часу обробки (T)

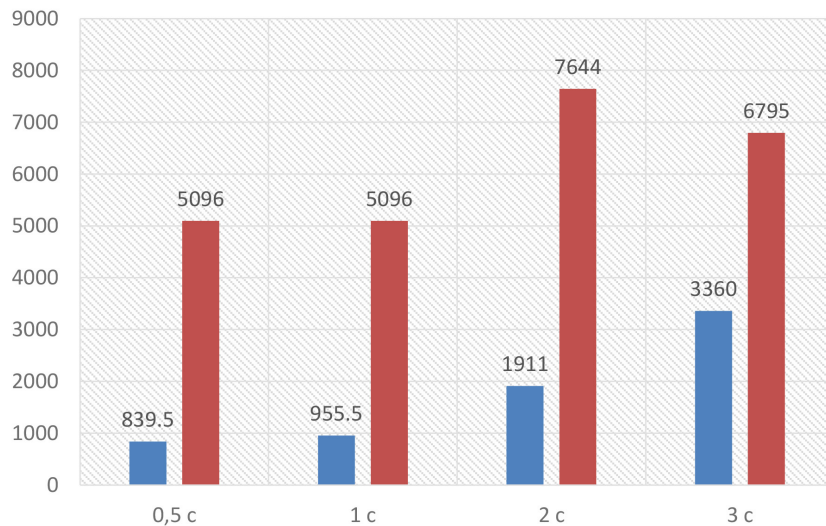


Рис. 13. Графік залежності необхідної для пробиття енергетичної експозиції (E) від часу обробки (T)

(2,23–4), що пояснюється найменшою площею матеріалу, яку необхідно нагріти для пробиття, а отже, й більшою ефективністю такого режиму. Водночас, найменший розкид величини енергетичної експозиції спостерігається при куті 45° (4–4,55), що пов'язано зі збереженням сталого співвідношення між приростом об'єму оброблюваного матеріалу та необхідною енергією, яка не потребує істотного збільшення.

Найбільші відмінності зафіксовано при опроміненні під кутом 30° , де розрив між показниками сягає 9,1 рази на користь випромінювання волоконного лазера при тривалості впливу 1 с. Це зумовлено суттєвим збільшенням площі обробки при такій геометрії експерименту, а також різницею у розподілі інтенсивності енергії в поперечному профілі пучка: у волоконного лазера цей показник виявився на порядок вищим, що забезпечує більш концентроване та ефективне руйнування матеріалу.

ВИСНОВКИ

1. При пробитті карбонової пластини товщиною у 2,0 мм лазерним випромінюванням, згенерованим волоконним лазером, у діапазоні потужності лазера у 1,0–3,0 кВт, часу обробки 0,5–3,0 с та діаметру лазерного пучка у 5,0–20,0 мм, енергетичні характеристики режимів обробки, що забезпечують даний процес, є у декілька разів меншими у порівнянні з величинами, необхідними при використанні твердотілого Nd:YAG лазера. Так, під прямим кутом коефіцієнт різниці величин коливається у діапазоні 4...8, у випадку обробки під кутом 30 градусів від вертикалі – від 2 до 9,1, при обробці під кутом 45 градусів – 3...6, при обробці під кутом 60 градусів – 2...6 разів.

2. Найменший розкид величини густини потужності зустрічається при обробці матеріалу під прямим кутом – 2,23...4. Це пояснюється тим, що обробка під прямим кутом є найбільш оптимальним варіантом

через те, що вона забезпечує найменшу площу матеріалу, котрий необхідно обробити для пробиття матеріалу.

3. Найменший розкид величини енергетичної експозиції зустрічається при обробці матеріалу під кутом у 45 градусів – 4...4,55. Це пояснюється тим, що для пробиття карбонової пластини у всіх випадках було дотримано однакове співвідношення необхідної енергії, що пов'язано зі співвідношенням приросту кількості оброблюваного матеріалу без збільшення необхідності в необхідній енергії.

4. Найбільша різниця всіх величин зустрічається при обробці під кутом у 30 градусів від вертикали, де співвідношення доходить до 9,1 разів на користь волоконного лазера у випадку випромінювання на

протязі 1 с. Це пов'язано з великим зростанням площі, що оброблюється при роботі з даними кутами. Це пояснюється різницею у інтенсивності розподілу лазерної енергії по профілю пучка, котра є на порядок вищою при використанні волоконного лазера.

ФІНАНСУВАННЯ

Дослідження виконувались 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 № 8/0166 від 03.03.2025 р.

REFERENCES

- [1] Liu, W., Zhang, L., Wang, D., Meng, X., & Zhang, B. (2024). Application and key technologies of laser weapons in anti-UAV swarm operations. *Hangkong Xuebao/Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 45(12), 329457. <https://doi.org/10.7527/S1000-6893.2023.29457>
- [2] Mohsan, S. A. H., Khan, M. A., Noor, F., Ullah, I., & Alsharif, M. H. (2022). Towards the unmanned aerial vehicles (UAVs): A comprehensive review. *Drones*, 6(6), 147. <https://doi.org/10.3390/drones6060147>
- [3] Wolfrum, J., Eibl, S., Oeltjen, E., Osterholz, J., & Wickert, M. (2021). High-energy laser effects on carbon fiber reinforced polymer composites with a focus on perforation time. *Journal of Composite Materials*, 55(16), 2249–2262. <https://doi.org/10.1177/0021998320988885>
- [4] Bernatskyi, A., Lukashenko, V., Siora, O., & Sokolovskyi, M. (2024). Analysis of the application of lasers for counter-UAV purposes. *History of Science and Technology*, 14(2), 487–512. <https://doi.org/10.32703/2415-7422-2024-14-2-487-512>
- [5] Lyu, C., & Zhan, R. (2022). Global analysis of active defense technologies for unmanned aerial vehicle. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 37(1), 6–31. <https://doi.org/10.1109/MAES.2021.3115205>
- [6] Ahmed, S. A., Mohsin, M., & Ali, S. M. Z. (2021). Survey and technological analysis of laser and its defense applications. *Defence Technology*, 17(2), 583–592. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.02.012>
- [7] Yang, R., Wang, H., Chen, C., & Yan, D. (2024). Distributed collaborative allocation of multi-laser weapons for countering unmanned aerial vehicles. In *2024 43rd Chinese Control Conference (CCC)* (pp. 1879–1884). Kunming, China: IEEE. <https://doi.org/10.23919/CCC63176.2024.10661197>
- [8] Schleijpen, R., Van Binsbergen, S., Geljon, M., Meuken, D., Deiana, D., & van Leeuwen, B. (2020). 30kW laser experiments against drones. In *Technologies for Optical Countermeasures XVII; and High-Power Lasers: Technology and Systems, Platforms, Effects IV* (Vol. 11539, pp. 34–44). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2574461>
- [9] Zhang, W., Zhang, L., Yang, B., Gu, H., Wang, D., & Yang, K. (2018). The development of counter-unmanned aerial vehicle technologies. In *Global Intelligence Industry Conference (GIIC 2018)* (Vol. 10835, pp. 370–373). Beijing, China: SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2505628>
- [10] Liao, L., Huang, X., & Xie, F. (2023). Development status and operation analysis of laser weapon in anti-drone warfare. In *2023 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS)* (pp. 305–310). Hefei, China: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICUS58632.2023.10318249>
- [11] Shaohui, X., Ji, F., Baohua, W., Fengge, W., Yong, H., Jiajia, M., & Ye, W. (2023). Development of a shooting strategy to neutralize UAV swarms based on multi-shot cooperation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2460(1), 012035. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2460/1/012035>
- [12] Siora, O., Lukashenko, V., & Bernatskyi, A. (2025). An interdisciplinary study of the effect of laser radiation on carbon fiber-reinforced polymer, in the context of counteracting unmanned aerial vehicles. *History of Science and Technology*, 15(1), 195–215. <https://doi.org/10.32703/2415-7422-2024-15-1-195-215>
- [13] Lykou, G., Moustakas, D., & Gritzalis, D. (2020). Defending airports from UAS: A survey on cyber-attacks and counter-drone sensing technologies. *Sensors*, 20(12), 3537. <https://doi.org/10.3390/s20123537>
- [14] Taillandier, M., Peiffer, R., Colomer, B., Ortiz, R., Chalumeau, E., & Pommies, M. (2022). High-energy laser experiments for vulnerability studies in the context of the European TALOS program. In *High-Power Lasers and Technologies for Optical Countermeasures* (Vol. 12273, pp. 68–79). Berlin, Germany: SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2635076>
- [15] Lyu, C. Y., & Zhan, R. J. (2020). Research on the cutting-edge application of high energy laser C-UAS technology. In *International Conference on Optoelectronic and Microelectronic Technology and Application*, 11617, 291–304. <https://doi.org/10.1117/12.2585023>
- [16] Steinvall, O. (2021). The potential role of laser in combating UAVs: Part 2; laser as a countermeasure and weapon. In *Technologies for Optical Countermeasures XVIII and High-Power Lasers: Technology and Systems, Platforms, Effects V* (Vol. 11867, pp. 14–30). <https://doi.org/10.1117/12.2601755>

- [17] Nan, P., Shen, Z., Han, B., & Ni, X. (2019). The influences of laminated structure on the ablation characteristics of carbon fiber composites under CW laser irradiation. *Optics & Laser Technology*, 116, 224–231. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.03.015>
- [18] Schäffer, S., Reich, S., Heunoske, D., Lueck, M., Wolfrum, J., & Osterholz, J. (2024). Laser-induced decomposition and mechanical degradation of carbon fiber-reinforced polymer subjected to a high-energy laser with continuous wave power up to 120 kW. *Journal of Composites Science*, 8(11), 471. <https://doi.org/10.3390/jcs8110471>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Liu, W., Zhang, L., Wang, D., Meng, X., & Zhang, B. (2024). Application and key technologies of laser weapons in anti-UAV swarm operations. *Hangkong Xuebao/Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 45(12), 329457. <https://doi.org/10.7527/S1000-6893.2023.29457>
- [2] Mohsan, S. A. H., Khan, M. A., Noor, F., Ullah, I., & Alsharif, M. H. (2022). Towards the unmanned aerial vehicles (UAVs): A comprehensive review. *Drones*, 6(6), 147. <https://doi.org/10.3390/drones6060147>
- [3] Wolfrum, J., Eibl, S., Oeltjen, E., Osterholz, J., & Wickert, M. (2021). High-energy laser effects on carbon fiber reinforced polymer composites with a focus on perforation time. *Journal of Composite Materials*, 55(16), 2249–2262. <https://doi.org/10.1177/0021998320988885>
- [4] Bernatskyi, A., Lukashenko, V., Siora, O., & Sokolovskyi, M. (2024). Analysis of the application of lasers for counter-UAV purposes. *History of Science and Technology*, 14(2), 487–512. <https://doi.org/10.32703/2415-7422-2024-14-2-487-512>
- [5] Lyu, C., & Zhan, R. (2022). Global analysis of active defense technologies for unmanned aerial vehicle. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 37(1), 6–31. <https://doi.org/10.1109/MAES.2021.3115205>
- [6] Ahmed, S. A., Mohsin, M., & Ali, S. M. Z. (2021). Survey and technological analysis of laser and its defense applications. *Defence Technology*, 17(2), 583–592. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.02.012>
- [7] Yang, R., Wang, H., Chen, C., & Yan, D. (2024). Distributed collaborative allocation of multi-laser weapons for countering unmanned aerial vehicles. In 2024 43rd Chinese Control Conference (CCC) (pp. 1879–1884). Kunming, China: IEEE. <https://doi.org/10.23919/CCC63176.2024.10661197>
- [8] Schleijpen, R., Van Binsbergen, S., Geljon, M., Meuken, D., Deiana, D., & van Leeuwen, B. (2020). 30kW laser experiments against drones. In *Technologies for Optical Countermeasures XVII; and High-Power Lasers: Technology and Systems, Platforms, Effects IV* (Vol. 11539, pp. 34–44). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2574461>
- [9] Zhang, W., Zhang, L., Yang, B., Gu, H., Wang, D., & Yang, K. (2018). The development of counter-unmanned aerial vehicle technologies. In *Global Intelligence Industry Conference (GIIC 2018)* (Vol. 10835, pp. 370–373). Beijing, China : SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2505628>
- [10] Liao, L., Huang, X., & Xie, F. (2023). Development status and operation analysis of laser weapon in anti-drone warfare. In 2023 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS) (pp. 305–310). Hefei, China: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICUS58632.2023.10318249>
- [11] Shaohui, X., Ji, F., Baohua, W., Fengge, W., Yong, H., Jiajia, M., & Ye, W. (2023). Development of a shooting strategy to neutralize UAV swarms based on multi-shot cooperation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2460(1), 012035. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2460/1/012035>
- [12] Siora, O., Lukashenko, V., & Bernatskyi, A. (2025). An interdisciplinary study of the effect of laser radiation on carbon fiber-reinforced polymer, in the context of counteracting unmanned aerial vehicles. *History of Science and Technology*, 15(1), 195–215. <https://doi.org/10.32703/2415-7422-2024-15-1-195-215>
- [13] Lykou, G., Moustakas, D., & Gritzalis, D. (2020). Defending airports from UAS: A survey on cyber-attacks and counter-drone sensing technologies. *Sensors*, 20(12), 3537. <https://doi.org/10.3390/s20123537>
- [14] Taillandier, M., Peiffer, R., Colomer, B., Ortiz, R., Chalumeau, E., & Pommies, M. (2022). High-energy laser experiments for vulnerability studies in the context of the European TALOS program. In *High-Power Lasers and Technologies for Optical Countermeasures* (Vol. 12273, pp. 68–79). Berlin, Germany: SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2635076>
- [15] Lyu, C. Y., & Zhan, R. J. (2020). Research on the cutting-edge application of high energy laser C-UAS technology. In *International Conference on Optoelectronic and Microelectronic Technology and Application*, 11617, 291–304. <https://doi.org/10.1117/12.2585023>
- [16] Steinvall, O. (2021). The potential role of laser in combating UAVs: Part 2; laser as a countermeasure and weapon. In *Technologies for Optical Countermeasures XVIII and High-Power Lasers: Technology and Systems, Platforms, Effects V* (Vol. 11867, pp. 14–30). <https://doi.org/10.1117/12.2601755>
- [17] Nan, P., Shen, Z., Han, B., & Ni, X. (2019). The influences of laminated structure on the ablation characteristics of carbon fiber composites under CW laser irradiation. *Optics & Laser Technology*, 116, 224–231. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.03.015>
- [18] Schäffer, S., Reich, S., Heunoske, D., Lueck, M., Wolfrum, J., & Osterholz, J. (2024). Laser-induced decomposition and mechanical degradation of carbon fiber-reinforced polymer subjected to a high-energy laser with continuous wave power up to 120 kW. *Journal of Composites Science*, 8(11), 471. <https://doi.org/10.3390/jcs8110471>

© Бернацький А. В., Соколовський М. В., Сіора О. В., Бондарєва В. І., Юрченко Ю. Ю.

Дата надходження статті до редакції: 26.08.2025

Дата затвердження статті до друку: 09.09.2025

Опубліковано: 24.11.2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0