

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-365-96>
УДК 536.5:621.373.826:678.4

СІДОРОВ ДМИТРО

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
<https://orcid.org/0000-0002-0341-8205>
e-mail: dmitrysidorov36@gmail.com

КОЗИК ДЕНИС

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
<https://orcid.org/myorcid?orcid=0009-0006-0489-6598>
e-mail: dkozik045@gmail.com

ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ РЕАКЦІЇ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ГУМ ПРИ ІМПУЛЬСНОМУ CO₂-ЛАЗЕРНОМУ ОПРОМІНЕННІ

В роботі наведено результати дослідження температурної реакції спеціалізованих еластомерних матеріалів серії Laserrubber при імпульсному CO₂-лазерному опроміненні. Виконано моделювання температурного відгуку спеціалізованих гум при імпульсному CO₂-опроміненні та визначено вплив тривалості імпульсу і теплофізичних властивостей матеріалів на формування зони термічного впливу. Встановлені закономірності зміни температури при тривалості імпульсу від наносекунд до сотень мікросекунд. Визначено ієрархію термічного навантаження матеріалів серії Laserrubber. Отримані апроксимуючі логарифмічні залежності з високими коефіцієнтами детермінації. Виявлені переходи між фізичними режимами іонізації, абляції, теплопровідного нагріву.

Ключові слова: CO₂-лазер, абляція, еластомер, гума, температурна реакція, термічний вплив.

SIDOROV DMITRO, KOZIK DENYS

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

PREDICTING THE TEMPERATURE RESPONSE OF SPECIALIZED RUBBERS UNDER PULSED CO₂ LASER IRRADIATION

This study addresses the problem of predicting the temperature response of specialized elastomeric materials under pulsed CO₂ laser irradiation, which is critical for optimizing laser engraving and surface modification processes. Despite extensive research on laser ablation of polymers, the thermal behavior of commercial laser rubbers under short-pulse irradiation remains insufficiently understood. The aim of this work is to perform numerical modeling of the thermal response of five Laserrubber materials (ECO, AERO, CLASSICO, OLIO, and TEMPO) subjected to pulsed CO₂ laser radiation with a wavelength of 10.6 μm. The modeling approach is based on solving the transient heat conduction equation in cylindrical coordinates, taking into account Gaussian beam intensity distribution and material-specific thermophysical properties, including thermal conductivity, heat capacity, density, and absorption coefficient. Simulations were conducted for pulse durations ranging from 100 ns to 200 μs at constant pulse energy, allowing analysis of peak surface temperatures and thermal penetration depth.

The results demonstrate that pulse duration is a key parameter controlling the dominant physical mechanisms of laser-material interaction. At nanosecond scales, extreme temperatures up to 4000 °C are reached, leading to plasma formation, shock wave generation, and minimal heat penetration. As pulse duration increases, peak temperatures significantly decrease, and the process transitions from plasma-dominated ablation to thermally controlled regimes with increased heat diffusion and broader heat-affected zones. At microsecond scales, moderate heating prevails, reducing the risk of carbonization but increasing the likelihood of bulk thermal modification.

A stable hierarchy of thermal response among the studied materials is established, with CLASSICO exhibiting the highest thermal loading and AERO and OLIO showing the greatest thermal stability. The obtained logarithmic approximations of temperature evolution enable predictive assessment of processing conditions.

The findings provide practical guidelines for selecting both material type and laser regime to control the depth of thermal damage and improve the quality of CO₂ laser processing of specialized rubbers.

Keywords: CO₂ laser, ablation, elastomer, rubber, temperature response, thermal effect.

Стаття надійшла до редакції / Received 17.03.2026
Прийнята до друку / Accepted 14.04.2026
Опубліковано / Published 28.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Сідоров Дмитро, Козік Денис

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Лазерна обробка технічних та спеціалізованих гум є одним з найбільш ефективних сучасних методів формоутворення та поверхневої модифікації полімерних матеріалів [1]. Сучасні технології CO₂-лазерної обробки еластомерних матеріалів, зокрема спеціалізованих гравіювальних гум, широко застосовуються у прецизійному машинобудуванні, штемпельному виробництві та інших галузях. Водночас якість лазерної обробки безпосередньо залежить від характеру термічних процесів, що виникають у приповерхневому шарі матеріалу під дією імпульсного випромінювання. Недостатній контроль температурної реакції призводить до утворення деструктивного шару, карбонізації, мікротріщин та інших дефектів, що знижують експлуатаційні характеристики виробів.

У промисловості все ширше застосовуються спеціальні види лазерних гум – ECO, AERO, CLASSICO, OLIO, TEMPO компанії Trodat, які були розроблені для роботи саме для CO₂-лазерного гравіювання. На відміну від механічних методів різання, лазерне гравіювання гум не створює навантаження на інструмент, не спричиняє його зношування, забезпечує високу точність і дозволяє отримувати складні за геометрією структури. CO₂-лазери з довжиною хвилі біля 10,6 мкм є оптимальним вибором для обробки еластомерів, оскільки ці матеріали характеризуються майже повним поглинанням інфрачервоного випромінювання в зазначеному діапазоні [2].

Незважаючи на наявність значної кількості досліджень у сфері лазерної абляції полімерів, специфіка термічного відгуку спеціалізованих гум при короткоімпульсному CO₂-лазерному опроміненні залишається недостатньо вивченою. Існуючі моделі переважно орієнтовані на термопласти або композитні матеріали і не враховують у повному обсязі впливу індивідуальних характеристик гум, на формування температурних полів та зони термічного впливу. Температура абляції гуми залежить від її хімічного складу. Для більшості типів гуми початок термічного розкладу зазвичай починається при 250°C. При цій температурі гума стає м'якою, виділяє горючі пари та починає втрачати масу. Активна фаза деструкції триватиме до 475°C. Високотемпературна абляція деяких гум відбувається при екстремальних температурах від 1000°C до 2000°C і вище. У таких умовах поверхня гуми перетворюється на керамічний захисний шар (шар коксу), який сповільнює подальше руйнування [3].

У зв'язку з цим виникає науково-прикладна проблема відсутності достовірних розрахункових підходів і чисельних моделей, що дозволяють прогнозувати температурну реакцію спеціалізованих гум залежно від параметрів імпульсного CO₂-лазерного опромінення. Розв'язання цієї проблеми є необхідним для обґрунтованого вибору режимів лазерної обробки, мінімізації дефектів та забезпечення високої якості і точності формоутворення поверхонь.

Аналіз досліджень та публікацій

Загальні тенденції та передові досягнення у сфері різання полімерних матеріалів за допомогою CO₂-лазерів ґрунтовно висвітлені в сучасних оглядових наукових працях [4].

CO₂-лазери, що генерують випромінювання з довжиною хвилі близько 10,6 мкм, є оптимальним вибором для обробки еластомерів, оскільки ці матеріали характеризуються майже повним поглинанням інфрачервоного випромінювання в зазначеному діапазоні. У сучасній промисловості, зокрема у штемпельному виробництві та прецизійному машинобудуванні, все ширше застосовуються спеціальні види лазерних гум. До таких належать матеріали серії Laserrubber (ECO, AERO, CLASSICO, OLIO, TEMPO від компанії Trodat [6]), які були синтезовані спеціально для високоточного CO₂-лазерного гравіювання. Успішне застосування цих матеріалів на практиці забезпечується наявністю сучасного комерційного обладнання, такого як вітчизняні лазерні верстати лінійки LaserBot-900 [4].

Значний масив сучасних наукових публікацій зосереджений на фундаментальному вивченні термічних процесів, що супроводжують взаємодію лазерного випромінювання з полімерними матрицями. Дослідники активно вивчають теплофізичні аспекти абляції полімерів, зокрема поліметилметакрилату (ПММА), під дією безперервного CO₂-лазера з використанням методів попередньої чи супутньої термообробки поверхні [5]. Крім того, детально аналізується кінетика абляції тонких композитних матеріалів з низькою теплопровідністю за допомогою як імпульсних, так і безперервних лазерних пучків [6]. Розширення спектра застосовуваних інструментів відображено в працях, що досліджують вплив високочастотної фемтосекундної лазерної обробки на комерційні полімери з різними тепловими властивостями [7]. Особливу увагу вчені приділяють питанням підвищення експлуатаційної надійності матеріалів, вивчаючи абляційну стійкість полімерних покриттів, модифікованих металами та керамікою, до руйнівної дії високоенергетичних лазерів [8].

Використання лазерної абляції для цілеспрямованої функціональної модифікації поверхні еластомерів є перспективним технологічним напрямком. За допомогою прецизійного лазерного впливу вдається створювати магнітні еластomers із супергідрофобними та суперолеофільними властивостями [9], а також проводити селективну металізацію термопластичних еластомерів на основі лазерно-індукованої активації поверхні [10]. Лазерне гравіювання буферних шарів з еластомерів довело свою високу ефективність у вирішенні складних контактних проблем при конструюванні багатошарових ємнісних діелектричних датчиків [11]. Також досліджуються фундаментальні механічні та теплофізичні явища, як-от вплив товщини еластомерних плівок на динаміку лазерно-індукованої поведінки мікрочастинок [12].

Дослідження [13] присвячені проблемам якості при обробці розповсюджених полімерних матеріалів, таких як поліолефіни та ПММА і не торкаються еластомерів. В роботі [14] дослідження зосереджені на визначенні якості гравіювання при CO₂-лазерному опроміненні за критерієм величини залишкового деструктивного шару.

Попри широкий спектр досліджень, пропонованих узагальнених висновків і детальних рекомендацій щодо лазерної обробки деяких полімерів, саме лазерна обробка еластомерів є відносно новим об'єктом для дослідження. Особливості хімічного складу та структури різних технічних гум визначають потребу дослідження процесів їхньої лазерної обробки.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є визначення температурної реакції спеціалізованих гум при імпульсному CO₂-опроміненні та визначення впливу тривалості імпульсу і теплофізичних властивостей матеріалів на режими обробки та формування зони термічного впливу.

Поставлена мета реалізована через систему розрахунків та порівняльного аналізу п'яти типів матеріалів ECO, AERO, CLASSICO, OLIO, TEMPO лінійки Laserrubber компанії Trodat.

Виклад основного матеріалу

Для опису процесу застосовано симетричну модель в циліндричних координатах, як найбільш економічну та фізично адекватну. Такий підхід відповідає реальній геометрії сфокусованого лазерного променя та дозволяє коректно врахувати радіальний розподіл температури. Радіальний розподіл інтенсивності випромінювання приймався як нормальний розподіл за Гаусом:

$$I(r) = I_0 \exp\left(-2 \frac{r^2}{w^2}\right), \quad (1)$$

де $I(r)$ та I_0 – інтенсивність випромінювання (Вт/см²) на відстані r (см) та пікова інтенсивність у центрі променя відповідно; w – радіус фокальної плями (см).

Поглинання енергії імпульсу враховувалося у приповерхневому шарі матеріалу.

Моделювання виконано для режиму, що відповідає умовам роботи CO₂-лазера LaserBot-900 з довжиною хвилі 10,6 мкм у промисловому процесі гравіювання [4]: потужність при навантаженні 80 % – 64 Вт; енергія імпульсу $E = 1,28 \times 10^{-6}$ Дж; радіус фокальної плями $w = 25$ мкм; середня щільність енергії в імпульсі тривалістю 20 нс складає $H \approx 0,065$ Дж/см² при максимумі до 163 Дж/см² у центрі променя.

Зазначені параметри забезпечують локалізований інтенсивний тепловий вплив із мінімальною глибиною теплового проникнення протягом часу дії імпульсу.

Основні теплофізичні характеристики гум Laserrubber перебувають у таких діапазонах [2]: теплопровідність $k = (0,19-0,28)$ Вт/(м·К); питома теплоємність $C_p = (1500-1850)$ Дж/(кг·К); коефіцієнт поглинання $A = 0,89-0,96$; коефіцієнт температуропровідності $\alpha = (0,9 \dots 1,33) \cdot 10^{-7}$ м²/с

Саме співвідношення між коефіцієнтами A та α визначає основний баланс між швидкістю накопичення тепла та інтенсивністю його відведення в об'єм матеріалу.

Чисельне розв'язання рівняння теплопровідності виконано в середовищі MATLAB при дії одиночного імпульсу однакової енергії для теплофізичних параметрів кожного матеріалу. Розглядалася температурна реакція матеріалу при імпульсах тривалістю 100 нс, 1 мкс, 10 мкс, 100 мкс та 200 мкс. Час спостереження відповідав подвійному часу імпульсу.

Температурна реакція матеріалів Laserrubber при імпульсі CO₂-лазера тривалістю 100 нс має наступні особливості.

При таких інтенсивностях опромінування (приблизно 10^9 Вт/см²) число Старка St стає значно нижчим за одиницю. Більша частина енергії імпульсу витрачається не на нагрів поверхні зразка, а на іонізацію та кінетичну енергію розширення плазмової хмари. Тоді температура плазми оцінюється за балансом між поглинанням лазерного випромінювання (гальмівне поглинання) та її радіаційним охолодженням. Отже, число Бугера Bu тут описує вже не матеріал, а саму плазму. Оскільки в цих умовах $Bu \gg 1$, то реалізується режим так званої оптично товстої плазми. Відбувається створення «плазмового дзеркала» або повне поглинання променя у факелі. Це практично відсікає поверхню зразка від променя лазера, призупиняючи її подальший нагрів.

Нагрівання в такому режимі відбувається за законом:

$$T(t) = T_0 + \frac{2A \cdot I \cdot \sqrt{t}}{\sqrt{\pi \cdot k \cdot \rho \cdot C_p}} \quad (2)$$

Одночасно, охолодження:

$$T(t) = T_0 + \frac{2A \cdot I}{\sqrt{\pi \cdot k \cdot \rho \cdot C_p}} (\sqrt{t} - \sqrt{t - \tau}), \quad (3)$$

де: $I = H/\tau$; τ – час дії імпульсу, с.

На рис. 1 показані результати розрахунку температури приповерхневого шару для осереднених значень теплофізичних властивостей гум Laserrubber у режимі $Bu \gg 1$. Такий режим відбувається у центрі променя. Оскільки число Старка St тут мінімальне, то це призводить до інтенсивного перевипромінювання енергії плазмою у режимі «плазмового дзеркала».

Гradient температури у цій зоні (рис. 1) надзвичайно крутий, що створює ударну хвилю.

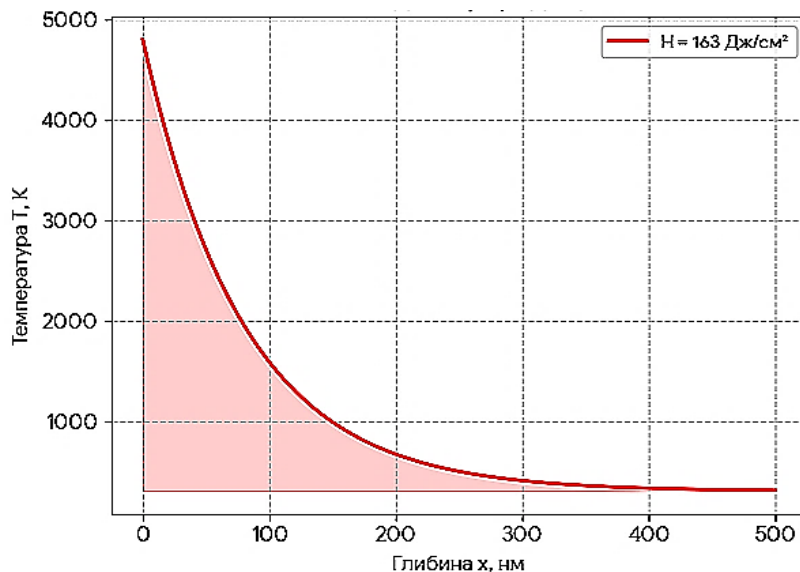


Рис. 1. Температури приповерхневого шару для осереднених значень теплофізичних властивостей гум Laserrubber у режимі $Bu \gg 1$.

Швидкість фронту плазми може бути оцінена або через її температуру (3), або на основі моделі Зельдовича-Райзера через щільність енергії (4):

$$v \cong \sqrt{\frac{\gamma \cdot Z \cdot k_B \cdot T_p}{m_i}}, \tag{4}$$

$$v \cong \sqrt[3]{\frac{2 \cdot (\gamma^2 - 1) \cdot A \cdot H}{\rho \cdot \tau}}, \tag{5}$$

де: $\gamma = (1,25 \dots 1,65)$ – показник адиабати плазми; $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К стала Больцмана; Z – середня кратність іонізації; $m_i = 20$ а.е.м для середньої густини гум Laserrubber 1275 кг/м³.

На рис. 2 наведені модельні залежності температури приповерхневої зони в центрі лазерної плями для матеріалів Laserrubber ECO ($\alpha = 1,11 \cdot 10^{-7}$ м²/с), AERO ($\alpha = 1,33 \cdot 10^{-7}$ м²/с), CLASSICO ($\alpha = 9,09 \cdot 10^{-8}$ м²/с), OLIO ($\alpha = 1,30 \cdot 10^{-7}$ м²/с) та TEMPO ($\alpha = 1,21 \cdot 10^{-7}$ м²/с) при імпульсі CO₂-лазера тривалістю 100 нс.

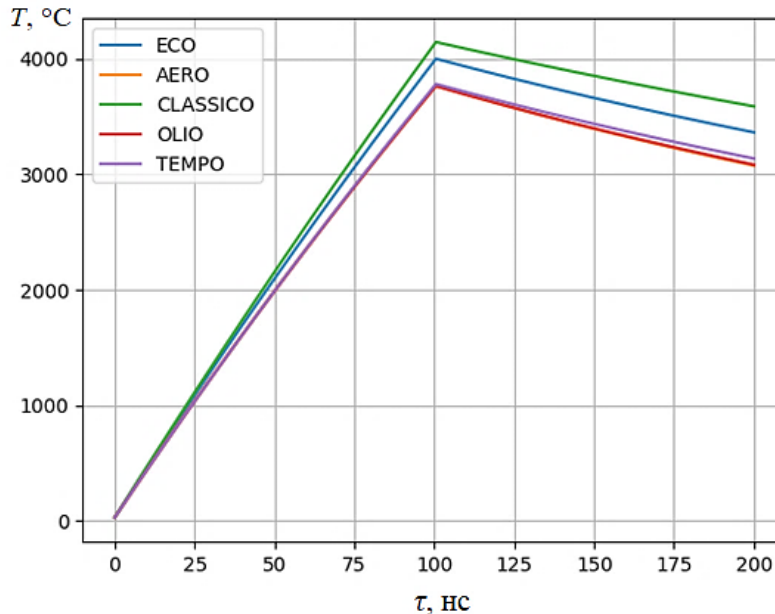


Рис. 2. Модельні залежності температури приповерхневої зони в центрі лазерної плями для матеріалів Laserrubber при імпульсі CO₂-лазера тривалістю 100 нс.

Оцінка швидкості розширення визначається значенням біля 10⁴ м/с. За 100 нс плазмовий фронт віддаляється від поверхні на 1,5 мкм. Це значно більше за глибину теплового прогріву матеріалу (0,1 мкм). Вже за 10 нс плазма стає оптично щільною ($Bu > 1$). Це означає, що залишок енергії лазера поглинається у факелі, розігріваючи його ще сильніше, замість того, щоб гріти поверхню.

Така швидкість руху фронту генерує тиск віддачі на поверхню порядку (10⁹ ... 10¹⁰) Па. Це призводить до формування ударної хвилі, яка йде вглиб матеріалу швидше за тепло. Навіть якщо теплопровідність мала і тепловий градієнт охоплює лише (50 ... 100) нм, механічна ударна хвиля може спричинити розтріскування та механічні руйнування на глибині в кілька мікрон.

Глибину кратера h можна оцінити через закон збереження енергії, використовуючи розв’язок у вигляді:

$$h = \frac{H \cdot A \cdot n}{\rho \cdot (C_p \cdot T + L)}, \tag{6}$$

де: $L = (5 \cdot 10^6 \dots 2 \cdot 10^7)$ Дж/кг – питома теплота сублимації; $n = (0,2 \dots 0,4)$ ККД енергоефективності процесу.

При ідеальних умовах теоретичний максимум глибини кратера становить до 110 мкм, тоді як з урахуванням екранування глибина кратера оцінюється величиною $h = (18 \dots 28)$ мкм. Глибина прогріву при цьому складає лише 0,05 мкм, а радіус кратера – приблизно 30 мкм.

Профіль кратера (рис. 3) можна охарактеризувати рівнянням:

$$h(r) = h \cdot \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2}\right). \tag{7}$$

Через низьку теплопровідність краї кратера будуть дуже чіткими (мінімальна зона термічного впливу), що характерно для абляції гум і підтверджено експериментально [14].

Температури абляції досягаються вже до перших 10 нс, режим швидко набуває ознак іонізації і далі плазма переходить у стан оптично товстої плазми. Екстремальні температури приповерхневого шару у центральній зоні променя (рис. 2) набувають наступних значень: 3998 °C – ECO; 3764 °C – AERO; 4143 °C – CLASSICO; 3762 °C – OLIO; 3780 °C – TEMPO. За час спостереження 200 нс температура зменшується приблизно на 16 %.

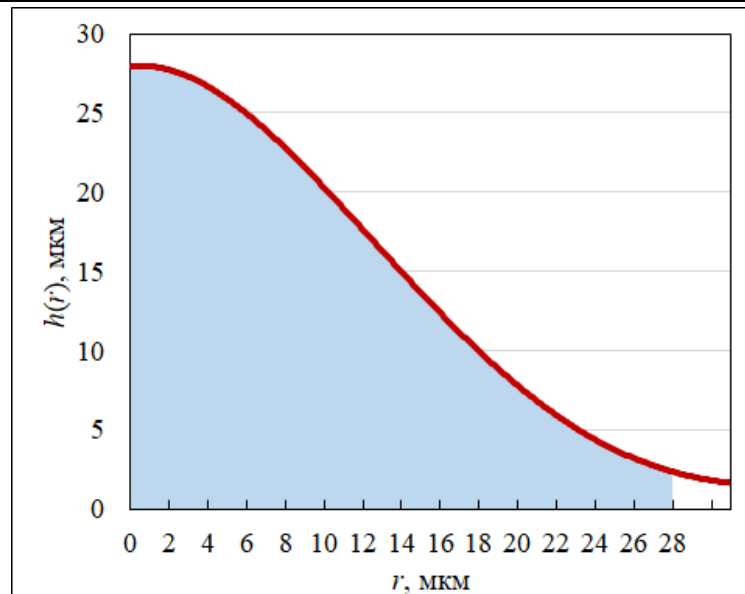
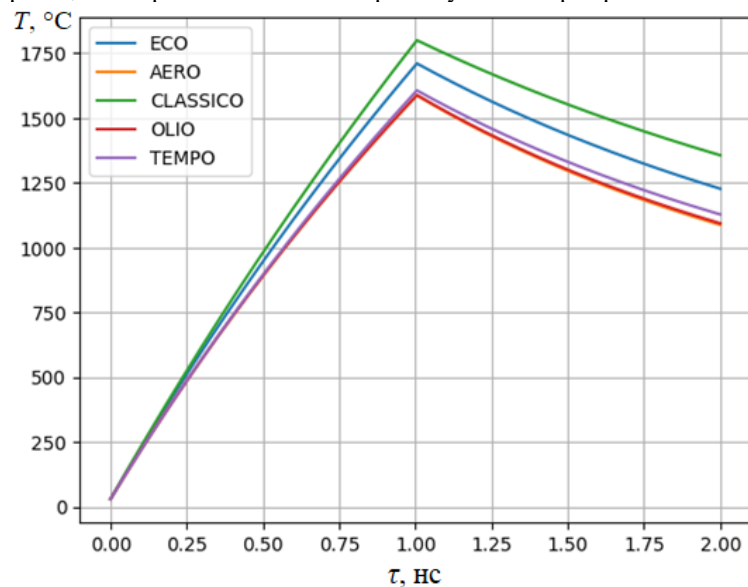


Рис. 3. Профіль кратера

Температурна реакція матеріалів Laserrubber при імпульсі лазера тривалістю 1 мкс (рис. 4) більш м'яка.

Рис. 4. Модельні залежності температури приповерхневої зони в центрі лазерної плями для матеріалів Laserrubber при імпульсі CO₂-лазера тривалістю 1 мкс

Максимальні температури приповерхневого шару у центральній зоні променю (рис. 4) більш ніж в два рази менші за попередній випадок і набувають наступних значень: 1711 °С – ECO; 1587 °С – AERO; 1800 °С – CLASSICO; 1589 °С – OLIO; 1607 °С – TEMPO. За час спостереження 2 мкс температура зменшується приблизно на 28 %. Значно зростає роль теплопровідності під час дії імпульсу. Процес переходить від режиму іонізованої хмари до режиму надшвидкої локалізованої абляції. Тиск віддачі на поверхню зменшується до порядків ($10^3 \dots 10^4$) Па. Інтенсивність руйнувань за рахунок дії ударної хвилі зменшується, однак набувають ознаки локального перегріву. Це змінює механізм формування деструктивного шару.

Температурна реакція матеріалів Laserrubber при імпульсі лазера тривалістю 10 мкс показана на рис. 5.

Зі збільшенням тривалості імпульсу до 10 мкс за сталої енергії пікова температура приповерхневого шару у центральній зоні променю (рис. 5) зменшується більш ніж у 6–7 разів порівняно з режимом 100 нс (рис. 2): 566,3 °С – ECO; 525,9 °С – AERO; 595,8 °С – CLASSICO; 526,5 °С – OLIO; 532,6 °С – TEMPO.

За час спостереження 2 мкс температура зменшується приблизно на 29 %. Реалізується режим помірного нагріву ($\approx (500 \dots 600) \text{ } ^\circ\text{C}$). Процес переходить у режим домінування теплопровідності вже під час нагріву. Температурні відмінності між матеріалами зберігаються, проте абсолютні значення значно знижуються.

Пікові температури перевищують температуру термодеструкції еластомерів та досягають температур абляційного випаровування. Формування деструктивного шару має переважно теплопровідний характер із суттєвим розширенням зони теплового впливу. Зменшується ризик миттєвої карбонізації, однак зростає ймовірність глибокого перегріву.

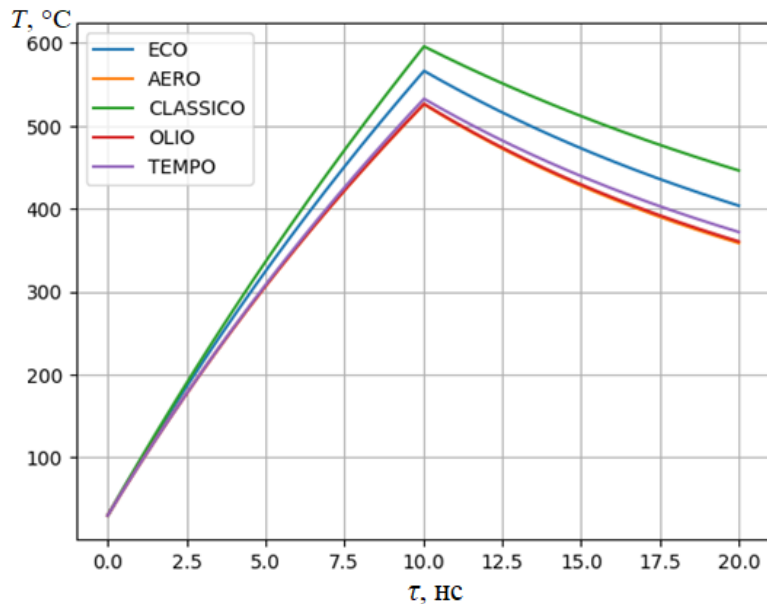


Рис. 5. Модельні залежності температури приповерхневої зони в центрі лазерної плями для матеріалів Laserrubber при імпульсі CO₂-лазера тривалістю 10 нс

За аналогією та для порівняння з рис. 1 розраховані температури приповерхневого шару для осереднених значень теплофізичних властивостей гум Laserrubber у режимі $Bu < 1$, $St > 1$ (рис. 6).

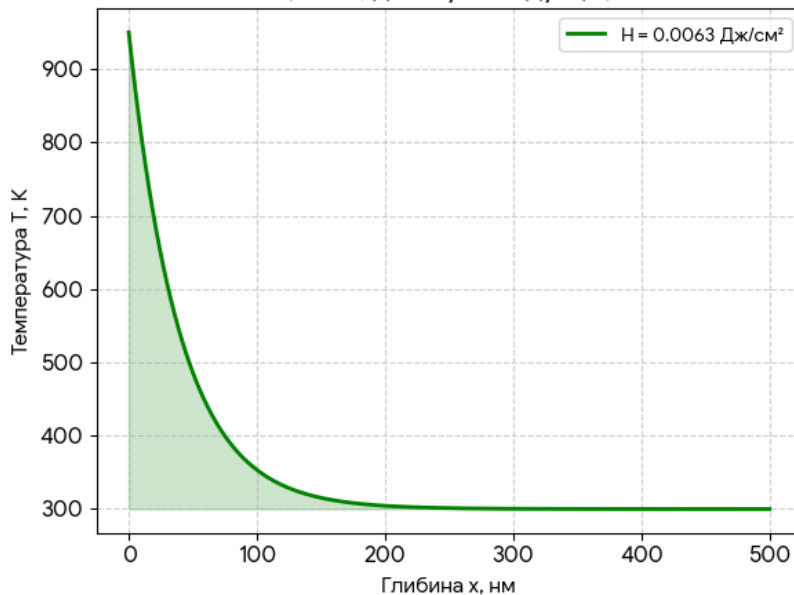


Рис. 6. Температури приповерхневого шару для осереднених значень теплофізичних властивостей гум Laserrubber у режимі помірного нагріву ($H = 0,0063$ Дж/см²)

Як видно з рис. 6, при $H = 0,0063$ Дж/см² нагрів помірний, що відповідає термодеструкції або плавленню без іонізації. Розподіл температури повністю визначається числом Бугера Bu (глибиною поглинання фотонів) та теплопровідністю. Система залишається в рамках класичної термодинаміки твердого тіла. Швидкість розширення парів становить всього біля 300 м/с. Тиск віддачі – близько одного МПа.

Температурна реакція матеріалів Laserrubber при імпульсі CO₂-лазера тривалістю 100 нс відображена на рис. 7.

Зі збільшенням тривалості імпульсу до 100 нс за сталої енергії пікова температура поверхні матеріалу у центральній зоні променя (рис. 7) зменшується більш ніж у 15 разів порівняно з режимом 100 нс (рис. 2): 254,2 °C – ECO; 227,2 °C – AERO; 281,1 °C – CLASSICO; 228,3 °C – OLIO; 235,1 °C – TEMPO. Ранжування матеріалів за величиною максимальної температури зберігається. Реалізується режим помірного нагріву ($\approx (220 \dots 280)$ °C). Теплопровідність повністю домінує над ефектом локального перегріву. Процес переходить у режим квазістаціонарного теплового балансу. Різниця між матеріалами визначається переважно температуропровідністю, а не коефіцієнтом поглинання. Пікові температури наближаються до діапазону термоокиснювальної деградації еластомерів, але значно нижчі за абляційні значення. Формування деструктивного шару має переважно теплопровідний характер і буде залежати від швидкості реакції деструкції. Пікові температури наближаються до діапазону термоокиснювальної деградації еластомерів, але значно нижчі за абляційні значення.

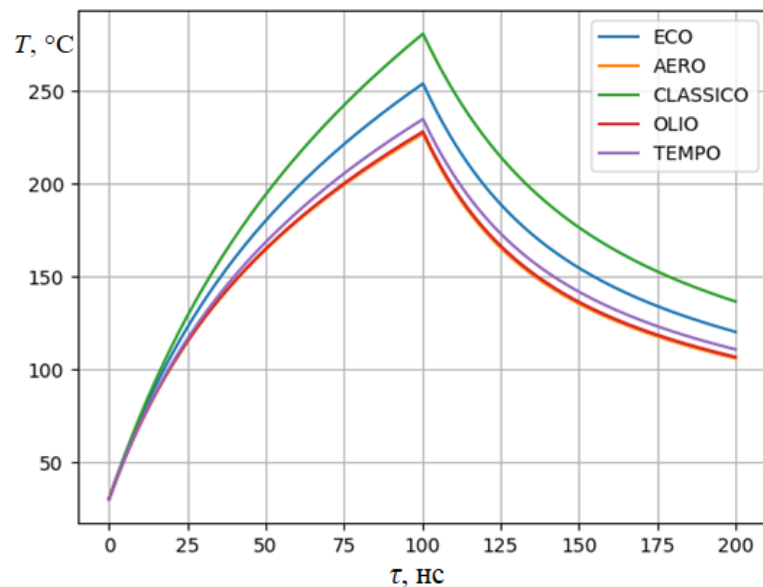


Рис. 7. Модельні залежності температури поверхні матеріалу в центрі лазерної плями для матеріалів Laserrubber при імпульсі CO₂-лазера тривалістю 100 мкс

Формування деструктивного шару має переважно теплопровідний характер і буде залежати від швидкості реакції деструкції. Зона теплового впливу розширюється вглиб матеріалу, хоча інтенсивність поверхневого перегріву мінімізується. При $\tau = 100$ мкс механізм обробки гуми переходить від абляційного до режиму термічної модифікації без вибухоподібного випаровування.

Матеріал CLASSICO залишається найбільш термічно навантаженим матеріалом. AERO та OLIO демонструють найменшу схильність до термічного пошкодження.

Температурна реакція матеріалів Laserrubber при імпульсі лазера тривалістю 200 мкс наведена на рис. 8.

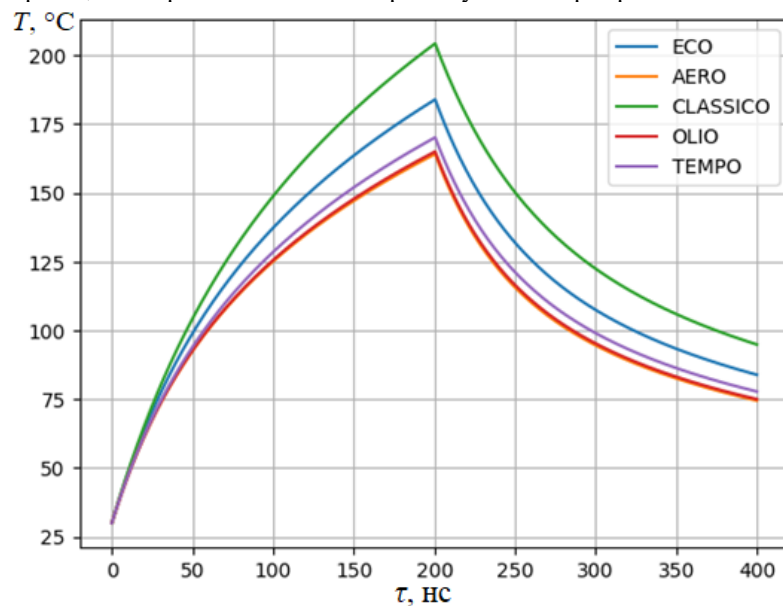


Рис. 8. Модельні залежності температури поверхні матеріалу в центрі лазерної плями для матеріалів Laserrubber при імпульсі CO₂-лазера тривалістю 200 мкс

Пікова температура поверхні матеріалу у центральній зоні променя для матеріалів Laserrubber (рис. 8) складає: 184,0 °C – ECO; 164,1 °C – AERO; 204,3 °C – CLASSICO; 165,0 °C – OLIO; 170,2 °C – TEMPO.

Реалізується режим м'якого теплового впливу ($\approx (160 \dots 205)$ °C). Таки температури знаходяться до границі температурної деструкції матеріалу. Абляційний механізм практично відсутній. Реалізовані режими можуть бути цікавими з точки зору процесів поверхневого плавлення, зварювання, процесів інтенсифікації локальної хімічної модифікації. Вплив коефіцієнта поглинання стає менш визначальним, ніж температуропровідність. Саме вона визначає форму кривої (рис. 8) вже з початку імпульсу. Зменшується ризик карбонізації, проте можливі структурні зміни або поступова реверсія, пов'язані з довготривалим нагрівом.

Загальна еволюція кривих пікової температури T_{\max} , °C в залежності від тривалості імпульсу τ , мкс при фіксованому енергетичному навантаженні описується апроксимуючими рівняннями (таблиця 1).

Апроксимуючи залежності $T_{\max} = T_{\max}(\tau)$

| Матеріал | Рівняння апроксимації | Коефіцієнт детермінації R^2 |
|----------|-------------------------------------|-------------------------------|
| ECO | $T(t) = -501,1 \cdot \ln(t) - 4107$ | 0,998 |
| AERO | $T(t) = -471,2 \cdot \ln(t) - 3865$ | 0,998 |
| CLASSICO | $T(t) = -518,3 \cdot \ln(t) - 4256$ | 0,998 |
| OLIO | $T(t) = -471,2 \cdot \ln(t) - 3862$ | 0,998 |
| TEMPO | $T(t) = -473,5 \cdot \ln(t) - 3881$ | 0,998 |

Значення коефіцієнтів при логарифмах характеризує швидкість зміни температури. Отже, найбільш швидкий термічний відгук буде мати гума CLASSICO. Матеріали AERO та OLIO мають найповільнішу динаміку зниження температури серед представлених.

Висновки з даного дослідження

і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У результаті проведеного дослідження встановлено закономірності температурної реакції спеціалізованих гум лінійки Laserrubber (ECO, AERO, CLASSICO, OLIO, TEMPO) при імпульсному CO₂-лазерному опроміненні в широкому діапазоні тривалості імпульсу. Показано, що характер теплових процесів визначається співвідношенням тривалості імпульсу, щільності енергії та теплофізичних властивостей матеріалів, насамперед коефіцієнтів поглинання та теплопровідності.

У короткоімпульсному режимі ($\tau \approx 100$ нс) реалізується режим інтенсивної абляції з утворенням оптично щільної плазми з екрануючим ефектом. У цьому випадку досягаються екстремальні температури, формуються значні механічні навантаження, ударні хвилі, зона теплового впливу мінімальна. Основний внесок у руйнування матеріалу має не теплопровідність, а плазмодинамічні ефекти.

При збільшенні тривалості імпульсу до 1 мкс відбувається перехід до режиму локалізованої абляції без повного домінування плазмового екранування. Температури знижуються більш ніж у два рази, зростає роль теплопровідності, а механічні ефекти послаблюються. Формування деструктивного шару набуває комбінованого характеру.

У діапазоні $\tau \approx 10$ мкс реалізується режим помірного нагріву з домінуванням теплопровідності. Температури знаходяться на рівні (500 ... 600) °C, що відповідає області термодеструкції матеріалів. Зона термічного впливу суттєво розширюється, а процес абляції поступово втрачає вибухоподібний характер.

За тривалості імпульсу (100 ... 200) мкс відбувається перехід до режиму м'якого теплового впливу, при якому абляційні процеси практично відсутні. У цьому випадку реалізуються процеси термічної модифікації, плавлення та структурних змін без інтенсивного руйнування матеріалу. Вплив коефіцієнта поглинання зменшується, а визначальну роль відіграє теплопровідність.

Отримані апроксимуючі залежності $T_{\max}(\tau)$ мають логарифмічний характер із високими значеннями коефіцієнта детермінації $R^2 \approx 0,998$, що свідчить про високу адекватність запропонованої моделі. Встановлено, що матеріал CLASSICO характеризується найбільш інтенсивним термічним відгуком, тоді як AERO та OLIO демонструють найвищу термічну стабільність.

Таким чином, розроблений підхід до моделювання температурної реакції дозволяє прогнозувати режими лазерної обробки спеціалізованих гум та обґрунтовано обирати параметри опромінення залежно від необхідного технологічного результату: абляція, гравіювання або термічна модифікація.

Перспективи подальших досліджень полягають у розширенні моделі з урахуванням фазових і хімічних перетворень матеріалу, зокрема процесів карбонізації, окиснення та утворення коксового шару. Доцільним є також врахування багатоімпульсних режимів опромінення, ефектів накопичення тепла та зміни властивостей матеріалу в процесі обробки. Окремого розвитку потребує розробка методики експериментальної верифікації отриманих результатів із використанням високошвидкісної діагностики температурних полів і плазмових процесів.

Література

- Hillman J. Laser processing for gasket fabrication [Electronic resource]. – Universal Laser Systems, 2016. – 12 p. – Режим доступу: https://cdn.ulsinc.com/assets/pdf/577d497b0454aa3d432e3aa0/laser_processing_for_gasket_fabrication.pdf
- Офіційний сайт компанії Trodat Ukraine [Електронний ресурс]. – 2026. – Режим доступу: <https://trodat.kiev.ua/uk/>
- Varkey J. T., Augustine S., Thomas S. Thermal degradation of natural rubber/styrene butadiene rubber latex blends by thermogravimetric method // Polymer-Plastics Technology and Engineering. – 2000. – Vol. 39, No. 3. – P. 415–435. – DOI: <https://doi.org/10.1081/PPT-100100038>
- CO₂ лазерний верстат LaserBot-900 [Електронний ресурс]. – BOT-UA, 2026. – Режим доступу: <https://bot-ua.com/shop/co2/laserbot-900/>

5. Cai S., Liu W., Chen D., Yu F., Tao N., Man J. Research and application of surface heat treatment for CO₂ continuous laser ablation of polymeric methyl methacrylate materials // RSC Advances. – 2024. – Vol. 14, No. 3. – P. 1909–1923. – DOI: 10.1039/D3RA05391A
6. Lipeng Wan, Meisong Liao, Shizi Yu, Jiaqi Wang, Wei Wang, Tianxing Wang, Dongyu He, Lidong Wang, Weiqing Gao. Laser ablation of thin composites with low thermal conductivity with pulsed and continuous-wave beams // Optica Open. – 2025. – DOI: <https://doi.org/10.1364/opticaopen.30951596>
7. Andrés P. Bernabeu, Guillem Nájjar, Alberto Ruiz, Juan C. Bravo, Manuel G. Ramirez, Sergi Gallego, Andrés Márquez, Daniel Puerto. High-frequency processing effects on three commercial polymers with different thermal properties under femtosecond laser irradiation // EPJ Web Conf. (EOSAM 2023). – Vol. 287. – 2023. – DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/202328709028>
8. Pandey, K.K., Kumar, V., Kaur, S. et al. Ablation resistance of metal/ceramic-infused polymer-based coating against high-energy laser. // J Mater Sci 61, 3556–3574 (2026). <https://doi.org/10.1007/s10853-025-12081-0>
9. Milionis A., Fragouli D., Brandi F., Liakos I., Barroso S., Ruffilli R., Athanassiou A. Superhydrophobic / superoleophilic magnetic elastomers by laser ablation // Applied Surface Science. – 2015. – Vol. 351. – P. 74-82. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.05.087>
10. Huiyuan Zhang, Rui Xu, Tao Zhou. Selective metallization of thermoplastic elastomers based on laser-induced surface activation // Advanced Engineering Materials. – Vol. 26. – Issue 6 – 2024. – DOI: <https://doi.org/10.1002/adem.202301715>
11. Prokopchuk A. et al. Solution to the contact problem of multilayer capacitive dielectric elastomer sensor: laser-engraved elastomer buffer layer // Proceedings of SPIE. – 2025. – Vol. 13432. – Art. 134321H. – DOI: 10.1117/12.3049055
12. Yiping Song, Zhoupeng Gu, Minqiang Jiang, Chenguang Huang, Xianqian Wu. Influence of elastomer film thickness and particle size on laser-induced microparticle launch // Journal of Applied Physics. – 2025. – Vol. 137, No. 15. – Art. 155104. – DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0258190>
13. Mushtaq R. T., Wang Y., Rehman M., Khan A. M., Mia M. State-of-the-art and trends in CO₂ laser cutting of polymeric materials: a review // Materials. – 2020. – Vol. 13, No. 17. – Art. 3839. – DOI: 10.3390/ma13173839
14. Sidorov D., Kozik D., Kazak I., Shylovykh T., Pribyliev Y. Formation of a destructive layer in special rubbers depending on CO₂-laser processing modes // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2025. – Vol. 5, No. 1 (137). – P. 85–93. – DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.341378>

References

1. Hillman J. Laser processing for gasket fabrication [Electronic resource]. – Universal Laser Systems, 2016. – 12 p. – Rezhym dostupu: https://cdn.ulsinc.com/assets/pdf/577d497b0454aa3d432e3aa0/laser_processing_for_gasket_fabrication.pdf
2. Ofitsiyni sait kompanii Trodat Ukraine [Elektronnyi resurs]. – 2026. – Rezhym dostupu: <https://trodat.kiev.ua/uk/>
3. Varkey J. T., Augustine S., Thomas S. Thermal degradation of natural rubber/styrene butadiene rubber latex blends by thermogravimetric method // Polymer-Plastics Technology and Engineering. – 2000. – Vol. 39, No. 3. – P. 415–435. – DOI: <https://doi.org/10.1081/PPT-100100038>
4. CO₂ lazernyi verstat LaserBot-900 [Elektronnyi resurs]. – BOT-UA, 2026. – Rezhym dostupu: <https://bot-ua.com/shop/co2/laserbot-900/>
5. Cai S., Liu W., Chen D., Yu F., Tao N., Man J. Research and application of surface heat treatment for CO₂ continuous laser ablation of polymeric methyl methacrylate materials // RSC Advances. – 2024. – Vol. 14, No. 3. – P. 1909–1923. – DOI: 10.1039/D3RA05391A
6. Lipeng Wan, Meisong Liao, Shizi Yu, Jiaqi Wang, Wei Wang, Tianxing Wang, Dongyu He, Lidong Wang, Weiqing Gao. Laser ablation of thin composites with low thermal conductivity with pulsed and continuous-wave beams // Optica Open. – 2025. – DOI: <https://doi.org/10.1364/opticaopen.30951596>
7. Andrés P. Bernabeu, Guillem Nájjar, Alberto Ruiz, Juan C. Bravo, Manuel G. Ramirez, Sergi Gallego, Andrés Márquez, Daniel Puerto. High-frequency processing effects on three commercial polymers with different thermal properties under femtosecond laser irradiation // EPJ Web Conf. (EOSAM 2023). – Vol. 287. – 2023. – DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/202328709028>
8. Pandey, K.K., Kumar, V., Kaur, S. et al. Ablation resistance of metal/ceramic-infused polymer-based coating against high-energy laser. // J Mater Sci 61, 3556–3574 (2026). <https://doi.org/10.1007/s10853-025-12081-0>
9. Milionis A., Fragouli D., Brandi F., Liakos I., Barroso S., Ruffilli R., Athanassiou A. Superhydrophobic / superoleophilic magnetic elastomers by laser ablation // Applied Surface Science. – 2015. – Vol. 351. – P. 74-82. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.05.087>
10. Huiyuan Zhang, Rui Xu, Tao Zhou. Selective metallization of thermoplastic elastomers based on laser-induced surface activation // Advanced Engineering Materials. – Vol. 26. – Issue 6 – 2024. – DOI: <https://doi.org/10.1002/adem.202301715>
11. Prokopchuk A. et al. Solution to the contact problem of multilayer capacitive dielectric elastomer sensor: laser-engraved elastomer buffer layer // Proceedings of SPIE. – 2025. – Vol. 13432. – Art. 134321H. – DOI: 10.1117/12.3049055
12. Yiping Song, Zhoupeng Gu, Minqiang Jiang, Chenguang Huang, Xianqian Wu. Influence of elastomer film thickness and particle size on laser-induced microparticle launch // Journal of Applied Physics. – 2025. – Vol. 137, No. 15. – Art. 155104. – DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0258190>
13. Mushtaq R. T., Wang Y., Rehman M., Khan A. M., Mia M. State-of-the-art and trends in CO₂ laser cutting of polymeric materials: a review // Materials. – 2020. – Vol. 13, No. 17. – Art. 3839. – DOI: 10.3390/ma13173839
14. Sidorov D., Kozik D., Kazak I., Shylovykh T., Pribyliev Y. Formation of a destructive layer in special rubbers depending on CO₂-laser processing modes // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2025. – Vol. 5, No. 1 (137). – P. 85–93. – DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.341378>