

Аналіз термічного відгуку матеріалів Laserrubber під час імпульсного CO₂-опромінення

Козік Д.О., асп., Бондар Р.В., студ., Сідоров Д.Е., к.т.н., доц.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Розраховано термічний відгук на імпульсне опромінення CO₂-лазера з довжиною хвилі 10,6 мкм спеціалізованих гум Laserrubber

Ключові слова: CO₂-лазер, Laserrubber, теплопровідність, імпульсне опромінення.

Вступ. Лазерна обробка технічних та спеціалізованих гум є одним з найбільш ефективних сучасних методів формоутворення та поверхневої модифікації полімерних матеріалів [1]. У промисловості все ширше застосовуються спеціальні види лазерних гум — ECO, AERO, CLASSICO, OLIO, TEMPO, які були розроблені для роботи саме під CO₂-лазерним гравіюванням. На відміну від механічних методів різання, лазерне гравіювання не створює навантаження на інструмент, не спричиняє його зношування, забезпечує високу точність і дозволяє отримувати складні за геометрією структури. CO₂-лазери з довжиною хвилі 10,6 мкм є оптимальним вибором для обробки еластомерів, оскільки ці матеріали характеризуються майже повним поглинанням інфрачервоного випромінювання в зазначеному діапазоні [2].

Основна частина. У роботі виконано моделювання термічної відповіді п'яти матеріалів Laserrubber на імпульсне CO₂-опромінення із залученням фізичних параметрів гуми, що включають теплопровідність, теплоємність, густину та коефіцієнт поглинання. Застосовано циліндричну модель теплопровідності для аналізу температури поверхні в часовій області.

Вихідні параметри лазерного імпульсу: реальна потужність при 80 %: 64 Вт; енергія імпульсу 1.28×10^{-6} Дж; час імпульсу 20 нс; радіус фокальної плями 25 мкм; енергоплотність ≈ 163 Дж/см².

Ці параметри узгоджуються з типовими умовами роботи CO₂-лазера LaserBot-900, що застосовується у промислових умовах гравіювання.

Основні теплофізичні параметри матеріалів Laserrubber: теплопровідність (0.19 – 0.28) Вт/м·К; теплоємність (1500–1850) Дж/кг·К; поглинання (0.89–0.96); розсіяння ($0.9 - 1.33 \times 10^{-7}$) м²/с.

Моделювання виконано на основі теплового рівняння в циліндричних координатах з урахуванням поглинання імпульсу в поверхневому шарі, теплопровідності та дифузивності матеріалу, просторового гаусового профілю лазерного променя.

Використано вихідний MATLAB-код зі зміною параметрів для кожного матеріалу. Результатом є залежність температури поверхні від часу $T(t)$ для всіх п'яти матеріалів.

Нижче наведено графік (рис. 1), який демонструє часову динаміку температури в центрі плями у відповідь на одиночний імпульс при однаковій енергії імпульсу.

Усі матеріали демонструють швидкий підйом температури протягом дії імпульсу та подальше охолодження. Максимальна температура знаходиться у діапазоні (115 – 140) °С. OLIO має найвищу пікову температуру і вищий ризик деструкції поверхні. TEMPO та AERO мають нижчий піковий нагрів, що робить їх більш стійкими при коротких імпульсах. Різниця у реакції матеріалів пояснюється їх теплопровідністю та поглинальною здатністю. Таким чином, поведінка гум Laserrubber при імпульсному опроміненні суттєво залежить не лише від енергії лазера, а й від фізичних параметрів конкретного типу гуми.

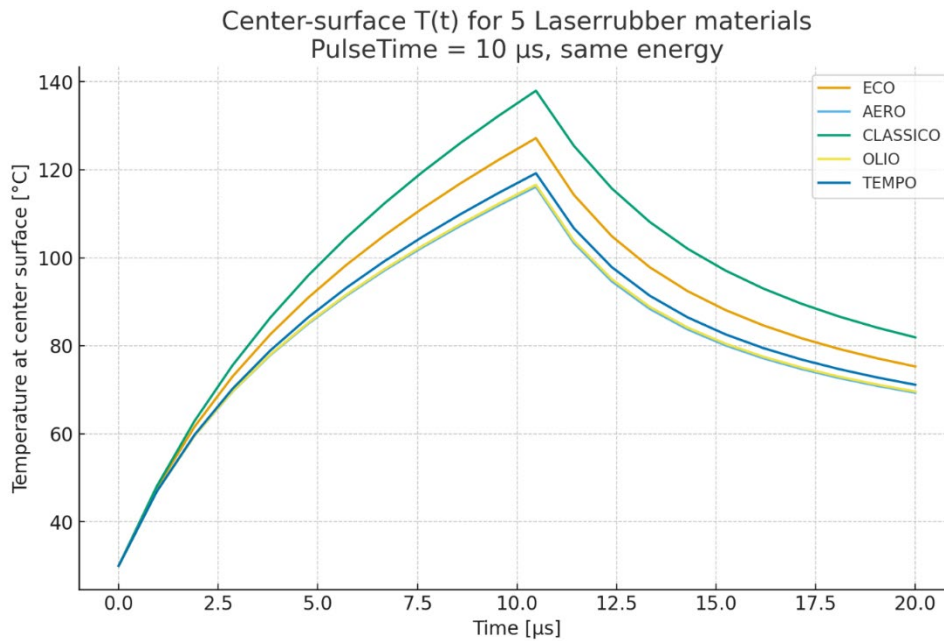


Рисунок 1 — Температурна реакція матеріалів Laserrubber на імпульс CO₂-лазера

Висновки. На основі проведеного математичного моделювання температурного відгуку п'яти матеріалів Laserrubber встановлено, що їх поведінка під час імпульсного CO₂-опромінення суттєво різниться в залежності від теплофізичних властивостей. Найбільший нагрів спостерігається у матеріалів із високим коефіцієнтом поглинання та низькою теплопровідністю — зокрема у OLIO та CLASSICO.

Температурний пік у всіх матеріалів формується у момент завершення імпульсу (≈ 10 мкс), що відповідає максимуму енергопередачі. Максимальні значення температури лежать у межах від 115 до 140 °C, що є критичним для ряду еластомерів і може призводити до локальної поверхневої деградації. Матеріали з більшою теплопровідністю (AERO та TEMPO) демонструють менший піковий нагрів, а отже й нижчу інтенсивність теплового пошкодження.

Температурне моделювання підтверджує експериментальні тенденції, описані в попередніх роботах [3], та узгоджується з характером зміни пікових температур, виявлених у моделі, та свідчить про те, що температура поверхні є коректним індикатором можливого термічного пошкодження.

Перелік посилань

- PHillman J. Laser Processing for Gasket Fabrication. – Universal Laser Systems, 2016. – 12 p.: https://cdn.ulsinc.com/assets/pdf/577d497b0454aa3d432e3aa0/laser_processing_for_gasket_fabrication.pdf
- 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;14(3):1909-1923. DOI: 10.1039/D3RA05391A.
- Sidorov, D., Kozik, D., Kazak, I., Shylovyh, T., & Pribyliev, Y. (2025). Formation of a destructive layer in special rubbers depending on CO₂-laser processing modes. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(1 (137)), 85–93. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.341378>