

УДК 655.36+621.77.04

DOI: 10.20535/2077-7264.3(73).2021.239866

© О. М. Савченко, канд. техн. наук, доц., УАД, Львів, Україна

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОЗРІЗУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ ВУГЛЕКИСЛОТНИМ ЛАЗЕРОМ**

**У роботі експериментально проаналізовано вплив параметрів лазерного випромінювання CO<sub>2</sub>-лазера на процес розрізування полімерних матеріалів. Дослідження процесу здійснювалось при зміні швидкості різання, потужності лазерного випромінювання та фокусної віддалі на чотирьох типах полімерних матеріалів: Акрил, Textures, Lasermax, Satins товщиною 1,2 мм.**

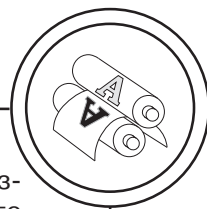
**Досліджено, що найбільше вимогам лазерного розрізування відповідає полімерний матеріал Акрил, оскільки при лазерній дії практично відсутнє плавлення матеріалу, а відбувається випаровування і видалення парів стиснутим повітрям, яке подається в зону обробки.**

**Ключові слова: лазерне випромінювання; вуглекислотний лазер; розрізування; полімерні матеріали; потужність випромінювання; фокус.**

#### **Постановка проблеми**

Лазерне розрізування полімерних матеріалів в даний час вважається найбільш перспективним безконтактним, гнучким в управлінні та продуктивним способом обробки матеріалів, що використовується у виробництві зовнішньої реклами, POS матеріалів, сувенірної та пакувальної продукції, художньо-прикладному мистецтві. З розвитком лазерних технологій рекламно-виробничий процес став високотехнологічним, адже відкрилися нові можливості у візуалізації та втіленні ідей замовника. Полімерні матеріали та композити, в яких реалізовані високі пружно-міцнісні властиво-

сті волокон, займають важливе місце при лазерній обробці матеріалів. Однак основні фізичні та механічні властивості полімерів залежать не тільки від їх хімічної будови, але й від надмолекулярної організації. В значній мірі вони визначаються силами, що зв'язують атоми в основному ланцюзі макромолекули і силами взаємодії між сусідніми макромолекулами. Крім того, властивості полімерів залежать від складу основного полімерного ланцюга, який може бути побудований тільки з вуглецевих атомів (карболанцюгові полімери), або містити крім вуглецю атоми кисню, сірки, азоту (гетероланцюгові по-



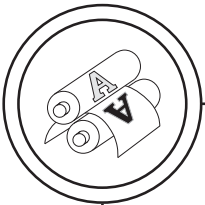
лімери), атоми кремнію, титану, алюмінію, нікелю, бору (елементоорганічні полімери). Механізми поглинання лазерного випромінювання в полімерах досить складні, тому дослідження впливу його параметрів на процес розрізування полімерних матеріалів є актуальною задачею.

### **Аналіз попередніх досліджень**

Тематиці процесів лазерного розрізування неметалевих матеріалів присвячена значна кількість публікацій. Авторами статті [1] досліджується вплив основних параметрів лазерного розрізування композиційних матеріалів, таких як час взаємодії, потужність і довжина хвилі лазера. Показано, що ефективність і якість лазерної обробки істотно залежить від здатності матеріалу поглинати енергію лазерного випромінювання. У роботі [2] розглянута можливість використання лазерного випромінювання для розрізування деталей з органічного скла, наведено порівняльні характеристики міцності випробування зразків, отриманих за допомогою лазерного і механічного розрізування, а також представлено результати досліджень із впливу теплового випромінювання лазерного розрізування на залишкові напруження в оргсклі і, зокрема, на його «сріблостійкість». Вчені Котов С. А. та ін. [3, 4] провели серію досліджень на базі наносекундних імпульсних і безперервних волоконних ітербієвих лазерів з потужністю випромінювання до 1 кВт для прецизійного розрізування і свердління скло- і вуглепластиків товщиною 1–3 мм. У моно-

графії Афанасьєвої О. В. [5] розглянуто взаємодію лазерного випромінювання з речовиною, поверхнєве лазерне зміцнення сталей, лазерне маркування металів і неметалів, лазерне очищення металів перед проведенням різноманітних технологічних операцій, що виконується за допомогою сучасного лазерного устаткування. Зарубіжними вченими [6] досліджується лазерне CO<sub>2</sub> розрізування трьох полімерних матеріалів (поліпропілену (PP), полікарбонату (PC) та поліметилметакрилату (PMMA)) з метою оцінювання впливу основних параметрів лазерного розрізування (потужність лазера, швидкість розрізування та тиск стисненого повітря). Досліджуваними параметрами у роботі [7] лазерного CO<sub>2</sub> розрізування з низькою потужністю тонких пластин з поліметилметакрилату були відстань від поверхні, швидкість розрізування та потужність променя. Характеристики розрізування, такі як зона термічного впливу, співвідношення ширини верхнього та нижнього прорізу досліджувались авторами [8] при розрізуванні екструдованих зразків полістирольного аркуша товщиною 3 мм з використанням безперервного CO<sub>2</sub> випромінювання.

Зростання обсягів поліграфічного виробництва продукції лазерною обробкою з неметалевих матеріалів вимагає впровадження сучасних високопродуктивних технологій. У попередніх роботах [9, 10] автором досліджувались фізичні процеси при взаємодії лазерного CO<sub>2</sub>-випромінювання з матеріалом та вплив параметрів випромінювання на процес гравіювання полімерів.



## Мета роботи

Визначення оптимальних параметрів процесу (потужність випромінювання, швидкість розрізування та фокусна віддаль) лазерного CO<sub>2</sub> розрізування полімерних матеріалів при виготовленні поліграфічної продукції, а саме, обкладинок паперово-білових товарів, візитівок, а також окремих видів паковань.

## Результати проведених досліджень

Враховуючи мінімальний механічний та термічний вплив на матеріал, лазерне розрізування полімерних матеріалів здійснювалось на вуглекислотному лазерному станку TS-1390 (фірми TRANSON) безперервного типу потужністю 100 Вт. Програмне забезпечення, що постачається в комплекті з лазерним устаткуванням, вбудовується в графічні редактори CorelDraw та/або AutoCAD і/або як автономний програмний додаток. Широкий вибір можливих інсталяцій значно

полегшує обслуговування обладнання. Товщина променя лазера складає 0,1–0,2 мм, що скорочує кількість відходів, технологічних полів та дозволяє здійснювати просте компонування заготовок на аркуші.

Механізм поглинання випромінювання в полімерах досить складний і може істотно відрізнятися в різних спектральних діапазонах. При дії потужного лазерного випромінювання з полімерами виникають незворотні зміни їх структури. Ця обставина ускладнює визначення параметрів лазерного розрізування полімеру розрахунковим шляхом. Тільки на основі проведених експериментальних досліджень можна з деякою точністю підібрати параметри лазерного розрізування.

Результати експериментальних досліджень з лазерного розрізування полімерних матеріалів показали, що різниця в теплофізичних властивостях складових матеріалу потребує оптимізації енергетичних і просторових па-

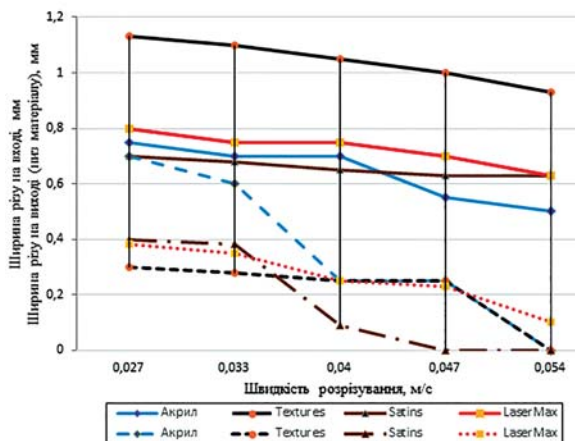
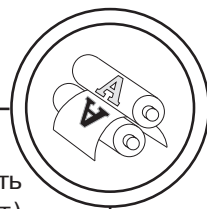


Рис. 1. Зміна ширини різки полімерних матеріалів залежно від швидкості розрізування (фокус F = 0 мм)



раметрів лазерного випромінювання. Тому процес розрізування відбувався з врахуванням найбільш важливих параметрів: зміни фокусу, швидкості розрізування і потужності випромінювання. Для цього обрано чотири типи полімерних матеріалів: Акрил, Textures, Lasermax та Satins товщиною 1,2 мм. Була проведена серія експериментів, яка складалась із двох частин. В першій частині продемонстрована залежність ширини різку від зміни швидкості при зміні фокусу: «+0,5», «0» та «-0,5». Фокус може розташовуватися на поверхні аркуша («0»), над поверхнею («-0,5») та зміщуватись вглиб матеріалу («+0,5»). В другій — залежність ширини різку від зміни потужності випромінювання при зміні фокусу: «+0,5», «0» та «-0,5». Ширина різку визначалась на вході і виході розрізування матеріалу.

I. Змінні параметри: швидкість розрізування (0,027...0,054 м/с) та фокус (F = 0 мм, F = +0,5 мм, F = -0,5 мм) при постійній потужності P = 35 Вт.

II. Змінні параметри: потужність випромінювання (20...50 Вт) та фокус (F = 0 мм, F = +0,5 мм, F = -0,5 мм) при постійній швидкості розрізування V = 0,04 м/с = const.

Аналізуючи отримані залежності (рис. 1–3) можна виділити, що при заглибленні фокусу, ширина різку зменшується. Ширина різку на вході матеріалу Textures при заглибленні фокусу («+0,5») складає 0,95 мм (зменшується), тоді як при розташуванні фокусу на поверхні аркуша («0») та над поверхнею («-0,5») складає відповідно 1,13 та 1,125 мм (практично однакове значення). При збільшенні швидкості розрізування ширина різку для всіх матеріалів (рис. 1–3) також зменшується. Це пояснюється тим, що тепло не встигає поширитись вглибину матеріалу. При швидкості розрізування 0,027 м/с пластику Textures ширина різку на вході складає 1,13 мм, при швидкості розрізування 0,054 м/с — 0,93 мм (різниця становить 0,2 мм). При розрізуванні Акрилу швидкістю 0,027 м/с

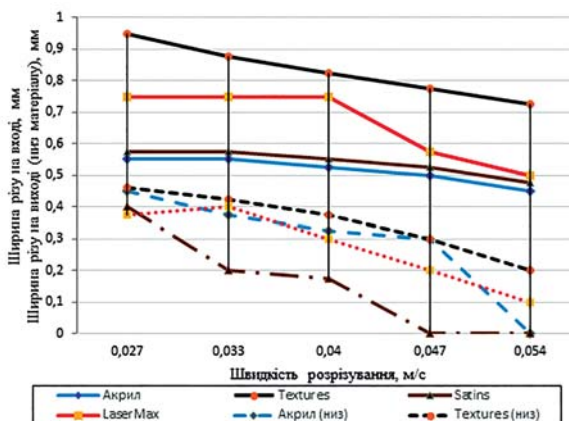


Рис. 2. Зміна ширини різку полімерних матеріалів залежно від швидкості розрізування (фокус F = +0,5 мм)

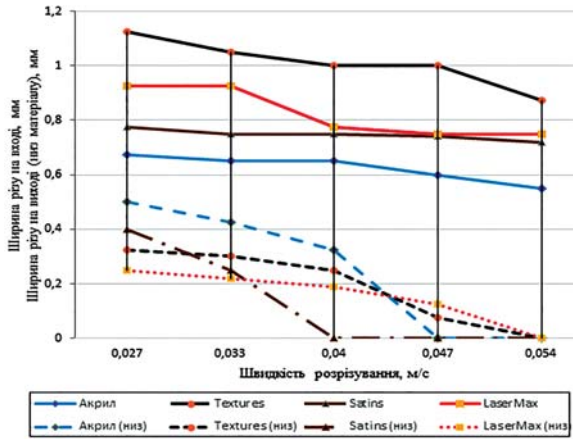
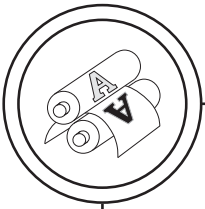


Рис. 3. Зміна ширини різки полімерних матеріалів залежно від швидкості розрізування (фокус F = -0,5мм)

ширина різки на вході — 0,75 мм, швидкістю 0,054 м/с ширина різки на вході — 0,5 мм (різниця становить 0,25 мм).

Збільшуючи потужність випромінювання, ширина різки для всіх матеріалів (рис. 4–6) збільшується або ж залишається незмінною. Винятком є пластик Satins і Textures при заглибленні фокусу («+0,5»).

При потужності 20 і 27,5 Вт полімерний матеріал Satins на виході не дорізається. При потужності 42,5 Вт різниця в ширині різки на вході і виході матеріалу складає (0,625–0,125 = 0,5 мм). Порівнюючи види пластиків, найбільшу величину різки має Textures і LaserMax. Це пояснюється тим, що теплофізичні властивості

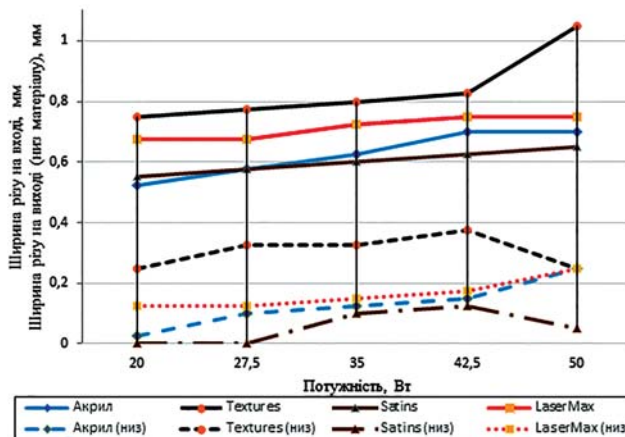


Рис. 4. Зміна ширини різки полімерних матеріалів залежно від потужності випромінювання (фокус F = 0мм)

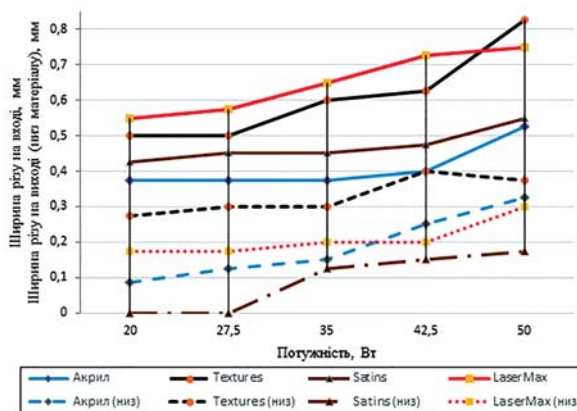
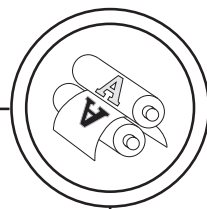


Рис. 5. Зміна ширини різки полімерних матеріалів залежно від потужності випромінювання (фокус  $F = +0,5$  мм)

верхнього шару (теплопровідність) даних полімерних матеріалів більші порівняно з чистим Акрилом ( $0,22 \text{ Вт/м}\cdot\text{К} > 0,19 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ), а також порівняно з Satins, основа якого — АБС (теплопровідність  $0,12 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ). В більшості випадків Satins не прорізається в основі пластику, що підтверджується малою теплопровідністю АБС.

У результаті експериментальних досліджень виявлено, що най-

більше вимогам лазерного розрізування відповідає полімерний матеріал — Акрил. Пов'язано це з тим, що при лазерній дії практично відсутнє плавлення матеріалу, а відбувається випаровування і видалення парів стиснутим повітрям, яке подається в зону обробки. Помітне оплавлення поверхні матеріалу відбувається тільки при невеликій швидкості розрізування і мінімальній подачі

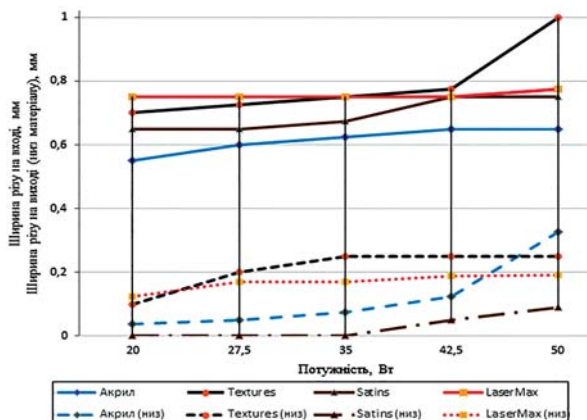


Рис. 6. Зміна ширини різки полімерних матеріалів залежно від потужності випромінювання (фокус  $F = -0,5$  мм)



повітря. Поверхня різку матеріалу має характерну шорсткість у виді хвилястої лінії, що обумовлено фізикою процесу лазерного розрізування в даному режимі.

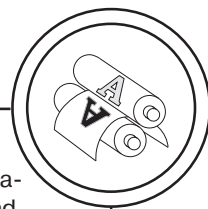
### Висновки

У роботі проведено експериментальні дослідження залежності ширини різку полімерних матеріалів від зміни швидкості розрізування та потужності випромінювання при зміні фокусної віддалі: «+0,5», «0» та «-0,5». У результаті досліджень виявлено, що при збільшенні швидкості різання ширина різку для всіх матеріалів зменшується; зі збільшенням потужності випромінювання

ширина різку збільшується або ж залишається незмінною. Беручи до уваги матеріали, найбільшу величину різку мають полімерні матеріали Textures і LaserMax, що пояснюється кращими теплофізичними властивостями. Найбільше вимогам лазерного розрізування при виготовленні поліграфічної продукції, а саме, обкладинок паперово-білових товарів, візитівок та паковань, відповідає полімерний матеріал Акріл, оскільки при лазерній дії практично відсутнє плавлення матеріалу, а відбувається випаровування і видалення парів стиснутим повітрям, яке подається в зону обробки.

### Список використаної літератури

1. Носков А. И. Особенности лазерной резки углеродных полимерных композиционных материалов (обзор) / А. И. Носков, А. Х. Гильмутдинов, А. Р. Асадуллина // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 2. С. 155–164. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://advance.orion-ir.ru/UPF-19/2/UPF-7-2-155.pdf>.
2. Постнов В. И. Влияние лазерной резки на свойства органических стекол / В. И. Постнов, М. В. Постнова, В. А. Богатов, С. В. Стрельников // Труды ВИАМ. 2020. № 475(88). С. 100–107. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-45-100-107.
3. Котов С. А. Современные полимерные композиционные материалы и возможности их лазерной обработки / С. А. Котов, Н. А. Лябин, М. А. Казарян, В. И. Сачков // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEЕ). 2018. № 10–12(258–260). С. 82–104. DOI: 10.15518/isjaee.2018.10-12.082-104.
4. Котов С. А. Экспериментальное исследование влияния длины волны лазерного излучения на эффективность размерной обработки углепластика / С. А. Котов, Н. А. Лябин // Вестник национального исследовательского ядерного университета МИФИ. 2017. Т. 6. № 5. С. 396–404. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.researchgate.net/scientific-contributions/N-A-Labin-2118093970>.
5. Афанасьєва О. В. Лазерна поверхнева обробка матеріалів / О. В. Афанасьєва, Н. О. Лалазарова, Є. П. Федоренко. Харків: ФОП Панов А. М., 2020. 100 с.
6. Choudhury I. A. Laser cutting of polymeric materials: An experimental investigation / I. A. Choudhury, S. Shirley // Optics & Laser Technology. Volume 42. Issue 3. April 2010. pp. 503–508. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0030399209001972>.
7. Kechgias J. D. A generalised approach on kerf geometry prediction during CO<sub>2</sub> laser cut of PMMA thin plates using neural networks / J. D. Kechgias, K. Ninikas, P. Stavropoulos, K. Salonitis // Lasers in Manufacturing and Materials Processing, Available online 16 August 2021. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-268745/v1>.



8. E. Haddadi. Experimental and Parametric Evaluation of Cut Quality Characteristics in CO<sub>2</sub> Laser Cutting of Polystyrene / E. Haddadi, M. Moradi, A. Karimzad, A. Karimzad Ghavide, S. Meibad // *Optik — International Journal for Light and Electron Optics*. March 2019. P. 184. DOI: 10.1016/j.ijleo.2019.03.040.

9. Савченко О. М. Фізичні процеси при взаємодії лазерного CO<sub>2</sub>-випромінювання з матеріалом // *Наукові записки: Зб. наук. праць. Львів: УАД, 2020. № 2(61). С. 86–93. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://nz.uad.lviv.ua/uk/archive/2-61/>.*

10. Савченко О. М. Експериментальні дослідження впливу параметрів випромінювання CO<sub>2</sub>-лазера на процес гравіювання полімерів / О. М. Савченко // *Кваліфікаційні книги: Зб. наук. праць. Львів: УАД, 2020. № 2(38). С. 88–97. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.uad.lviv.ua/naukoviydannia/52-kvalilohiia-knyhy/233-arkhiv-vydannia-kvalilohiia-knyhy>.*

### References

1. Noskov, A. I., Gil'mutdinov, A. Kh., & Asadullina, A. G. (2019). Osobennosti lazernoy rezki ughlerodnykh polimernykh kompozitsionnykh materialov (obzor) [Features of laser cutting of carbon polymer composite materials (review)]. *Uspekhi prikladnoy fiziki*, Vol. 7, 2, 155–164. Retrieved from <https://advance.orion-ir.ru/UPF-19/2/UPF-7-2-155.pdf> [in Russian].

2. Postnov, V. I., Postnova, M. V., Bogatov, V. A., & Strel'nikov, S. V. (2020). Vliyaniye lazernoy rezki na svoystva organicheskikh stekol [Effect of laser cutting on the properties of organic glasses]. *Trudy VIAM*, 4–5(88), 100–107. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-45-100-107 [in Russian].

3. Kotov, S. A., Lyabin, N. A., Kazaryan, M. A., & Sachkov, V. I. (2018). Sovremennyye polimernyye kompozitsionnyye materialy i vozmozhnosti ikh lazernoy obrabotki. [Modern polymer composite materials and possibilities of their laser processing] *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal 'Al'ternativnaya energetika i ekologiya' (ISJAE)*, 10–12 (258–260), 82–104. DOI: 10.15518/isjaee.2018.10-12.082-104 [in Russian].

4. Kotov, S. A., & Lyabin, N. A. (2017). Eksperimental'noye issledovaniye vliyaniya dliny volny lazernogo izlucheniya na effektivnost' razmernoy obrabotki ugleplastika [Experimental Study of the Influence of Laser Wavelength on the Efficiency of Dimensional Machining of CFRP]. *Vestnik natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta MIFI*, Vol. 6, 5, 396–404. Retrieved from <http://www.researchgate.net/scientific-contributions/N-A-Labin-2118093970> [in Russian].

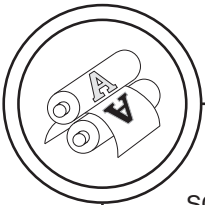
5. Afanasieva, O. V., Lalazarova, N. O., & Fedorenko, Ye. P. (2020). *Lazerna poverkhneva obrobka materialiv [Laser surface treatment of materials]*. Kharkiv: FOP Panov A. M., 100 p. [in Ukrainian].

6. Choudhury, I. A., & Shirley, S. (2010). Laser cutting of polymeric materials: An experimental investigation. *Optics & Laser Technology*, Vol. 42, Issue 3, 503–508. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0030399209001972> [in English].

7. Kechgias, J. D., Ninikas, K., Stavropoulos, P., & Saloniitis, K. (2021). A generalised approach on kerf geometry prediction during CO<sub>2</sub> laser cut of PMMA thin plates using neural networks. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-268745/v1> [in English].

8. Haddadi, E., Moradi, M., Karimzad, A., Karimzad Ghavide, A., & Meibad, S. (2019). Experimental and Parametric Evaluation of Cut Quality Characteristics in CO<sub>2</sub> Laser Cutting of Polystyrene. *Optik — International Journal for Light and Electron Optics*, 184. DOI: 10.1016/j.ijleo.2019.03.040 [in English].





9. Savchenko, O. M. (2020). Fizychni protsesy pry vzaiemodii lazernoho SO<sub>2</sub>-vyprominiuvannia z materialom [Physical processes in the interaction of laser CO<sub>2</sub> radiation with the material]. *Naukovi zapysky*, 2(61), 86–93. Retrieved from <http://nz.uad.lviv.ua/uk/archive/2-61/> [in Ukrainian].

10. Savchenko, O. M. (2020). Eksperymentalni doslidzhennia vplyvu parametriv vyprominiuvannia SO<sub>2</sub>-lazera na protses hraviuvannia polimeriv [Experimental studies of the influence of CO<sub>2</sub> laser radiation parameters on the polymer engraving process]. *Kvalitohiya knyhy*, 2(38), 88–97. Retrieved from <http://www.uad.lviv.ua/naukovi-vydannia/52-kvalitohiia-knyhy/233-arkhiv-vydannia-kvalitohiia-knyhy> [in Ukrainian].

**Experimental studies of the influence of CO<sub>2</sub> laser radiation parameters on the cutting process of polymeric materials are carried out in this work. The study of the process was carried out by changing the cutting speed, laser power and focal length on four types of polymeric materials: Acrylic, Textures, Lasermax, Satins 1.2 mm thick. As a result of the analysis of graphic dependences, it was found that when the focus is deepened '+0.5' and when the cutting speed is increased, the cutting width for all materials decreases, because the heat does not have time to spread to the depth of the material. With increasing radiation power, the width of the cut increases or remains unchanged. It has been investigated that the polymeric material Acrylic meets the requirements of laser cutting the most, because during the laser action the melting of the material is practically absent, and evaporation and removal of vapors by compressed air, which is supplied to the treatment zone, takes place.**

**Keywords:** laser radiation; carbon dioxide laser; cutting; polymeric materials; radiation power; focus.

Надійшла до редакції 10.09.21