

Optymalizacja parametrów cięcia laserowego materiałów obuwniczych

Optimizing laser cutting parameters for footwear materials

Joanna Alvarez*, Marcin Pieknik

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Przemysłu Skórzanego

Streszczenie

Przedstawiono wyniki optymalizacji parametrów laserowego cięcia materiałów obuwniczych, tj. prędkości oraz mocy. Testom poddano wybrane materiały zróżnicowane surowcem i/lub sposobem wytwarzania, grubością, a także docelowym przeznaczeniem. Na podstawie przeprowadzonych testów stwierdzono, że właściwości fizyczne promieniowania lasera CO₂ – Maximus PRO (model: JSM 90 x 60), pozwalają zapewnić wysoką jakość obróbki dowolnych materiałów obuwniczych. Efekty wizualne cięcia zależą od precyzji ustawień ogniskowej pomiędzy płaską powierzchnią cięcia i głowicą lasera oraz parametrów prędkości i mocy lasera. Konieczny jest więc ich każdorazowy dobór na podstawie przeprowadzonych testów kontrolnych.

Abstract

The results of optimizing laser cutting parameters of footwear materials, i.e. speed and power, are presented. Selected materials were tested, differing in terms of raw material and/or manufacturing method, thickness and intended use. On the basis of the tests, it was found that the physical properties of CO₂ laser radiation – Maximus PRO (model: JSM 90 x 60), ensure high quality processing of any footwear materials. The visual effects of the cut depend on the precision of the focal length settings between the flat cutting surface and the laser head, as well as the speed and laser power parameters. Therefore, it is necessary to always select them on the basis of the control tests.

Słowa kluczowe: laser CO₂, cięcie, prędkość, moc, materiały obuwnicze, optymalizacja parametrów

Keywords: CO₂ laser, cutting, speed, power, footwear materials, parameter optimization

1. Wprowadzenie

Zastosowanie nowoczesnych technologii cięcia, do których zalicza się cięcie laserowe, daje w tym zakresie duże możliwości. Źródła laserowe emitują promieniowanie o długościach fal w szerokim zakresie widmowym, tj. od ultrafioletu, przez światło widzialne, do podczerwieni zarówno w trybie ciągłym, jak i pulsacyjnym [1].

* autor korespondencyjny: dr inż. Joanna Alvarez – joanna.alvarez@ips.lukasiewicz.gov.pl

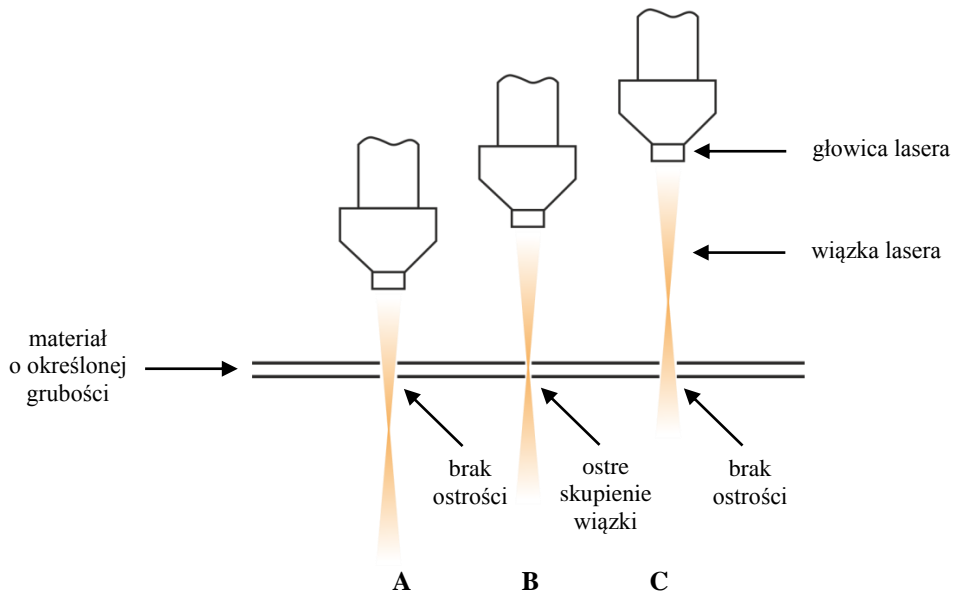
Od połowy lat 70. XX wieku lasery stosowane są w przemyśle głównie do cięcia, zastępując tradycyjne metody cięcia piłą lub wycinania ploterem frezującym. Wykorzystuje się je do spawania, wiercenia otworów i znakowania, a także w medycynie i kosmetologii, mechanice, geodezji, w technice wojskowej lub kosmicznej. Technologia cięcia laserowego polega na miejscowym stopieniu, odparowaniu lub spalaniu materiału niemal równoległą wiązką monochromatycznego światła o dużej spójności w czasie i przestrzeni oraz dużej gęstości mocy. Rozwój technik laserowych dużej mocy umożliwił ich wykorzystanie do procesów modyfikacji różnego typu materiałów, zastępując tradycyjną obróbkę powierzchniową. Najpowszechniej stosowanymi laserami w obróbce ubytkowej, dzięki dużej sprawności (15-20%) i wysokiej mocy promieniowania (do 50 kW), zwłaszcza w procesie cięcia materiałów, pozostają lasery CO₂. Generują one promieniowanie podczerwone o długości $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ oraz małej rozbieżności wiązki $\Delta\varphi$ wynoszącej 1-10 mrad. Są uniwersalne, precyzyjne i łatwe w obsłudze [2-3]. Znajdują zastosowanie w zakładach usługowych i produkcyjnych oraz mogą stanowić doskonałe urządzenia pomocnicze w przemyśle oraz działach B+R. Lasery technologiczne w dużym stopniu wykorzystuje się do cięcia materiałów niemetalicznych (np. szkła, ceramiki), a efekt oddziaływania promieniowania laserowego na materiał zależy od rodzaju materiału, czasu oddziaływania promieniowania na materiał, długości fali promieniowania oraz gęstości mocy promieniowania [4]. Zastosowanie odpowiednich kombinacji czasu oddziaływania i gęstości mocy umożliwia prowadzenie różnych procesów technologicznych.

Technika laserowa stosowana jest coraz szerzej również w przemyśle lekkim z uwagi na m.in. szybkie, precyzyjne cięcie, powtarzalność kształtu oraz dużą estetykę efektu końcowego, jak też precyzyjną obróbkę powierzchniową lub perforowanie [5-6].

Obróbka powierzchniowa materiałów włókienniczych za pomocą technik laserowych obejmuje m.in. grawerowanie, polegające na wypaleniu różnych, precyzyjnych wzorów na powierzchni materiału lub miejscowe jego odbarwienie/wytrawienie, zgodne z zaprojektowanym wzorem, w celu uzyskania wykończenia z efektem wizualno-dotykowym [7]. Ponadto stosuje się ją w celu funkcjonalizacji materiałów, uzyskując, np. w przypadku tkanin bawełnianych, lepszą układalność i odprężność po zmięciu w porównaniu z parametrami tych tkanin przed modyfikacją laserową [8]. Perforowanie laserowe stosowane jest do wszystkich rodzajów materiałów włókienniczych, przy czym najlepsze efekty uzyskuje się dla materiałów z włókien syntetycznych, w przypadku których wiązka laserowa zabezpiecza jednocześnie krawędzie przed strzępieniem. Laserowe cięcie sprawdza się głównie w krojowniach firm produkujących odzież – do rozkroju materiałów [9], ale dzięki precyzji i elastyczności jest także szeroko wykorzystywane w branży mody do tworzenia wzorów o indywidualnym charakterze oraz dopracowywania wykończonej garderoby lub akcesoriów. Ponadto za pomocą kontrolowanej energii lasera można modyfikować tekstylia w kierunku lepszej absorpcji barwnika [10-11] lub stwarzać czystsza i tańszą metodę barwienia – alternatywną dla sitodruku [12].

Proces cięcia spowodowany jest przegrzaniem ścieżki przecinania, tak więc punkt skupienia wiązki lasera (ostrość) należy ustawić w miejscu, w które chcemy przenieść maksimum energii lasera. Od precyzji ustawienia tego parametru zależy bowiem jakość cięcia. Poniżej schematycznie zobrazowano wybór pozycji ostrości pomiędzy płaską powierzchnią cięcia o określonej grubości i głowicą lasera: brak ostrości (Rys. 1 A i Rys. 1 C) oraz ostre ustawienie (Rys. 1 B).

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki próby optymalizacji parametrów cięcia laserowego (CO₂) po prostej, tj. prędkości i mocy dla przykładowych materiałów stosowanych w obuwnictwie.



Rys. 1. Schemat wyboru pozycji ostrości pomiędzy płaską powierzchnią cięcia o określonej grubości i głowicą lasera: brak ostrości (A i C) oraz ostre ustawienie (B), [źródło: opracowanie własne].

2. Materiał i metodyka

Do badań testowych wybrano szesnaście materiałów obuwniczych zróżnicowanych surowcem i/lub sposobem wytwarzania, grubością i twardością, a także przeznaczeniem:

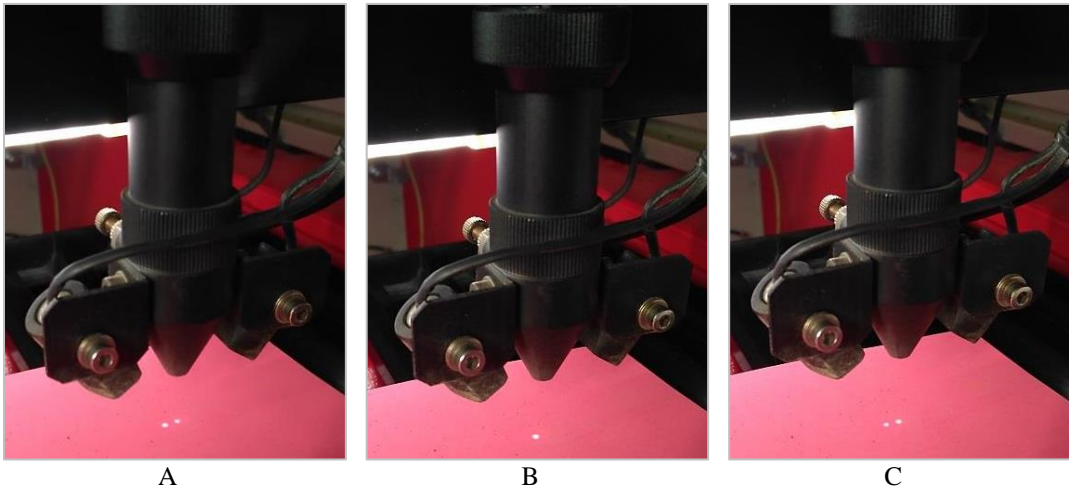
- 1) dzianina poliamidowa – dystansowa, przeznaczana na cholewki, podszewki;
- 2) włóknina polipropylenowa „Wigofil”, przeznaczona na elementy wewnętrzne;
- 3) włóknina poliestrowa typu filc, przeznaczona na wkładki, cholewki;
- 4) włóknina poliestrowa, przeznaczona na podpodeszwy;
- 5) materiał celulozowy – tektura, przeznaczony na podpodeszwy;
- 6) tworzywo – kopolimer etylenu i octanu winylu „EVA”, przeznaczone na wkładki;
- 7) tworzywo poliuretanowe „Springolon Plus”, przeznaczone na wkładki;
- 8) skóra naturalna świńska – dwoina, przeznaczona na podszewki;

- 9) skóra naturalna bydlęca – nubukowa, przeznaczona na wierzchy cholewek;
- 10) skóra naturalna bydlęca – welurowa, przeznaczona na wierzchy cholewek;
- 11) skóra naturalna bydlęca – lakierowana, przeznaczona na wierzchy cholewek;
- 12) materiał skóropodobny poliuretan/polichlorek winylu na nośniku włókninowym, przeznaczony na wyściółki;
- 13) materiał skóropodobny poliuretanowy na nośniku koagulat, przeznaczony na wierzchy cholewek;
- 14) materiał skóropodobny wieloskładnikowy „Microfibra”, przeznaczony na elementy wewnętrzne;
- 15) skóra wtórna, przeznaczona na podpodeszwy;
- 16) guma – płyta, przeznaczona na zelówki podeszwowe.

Wytypowane materiały, o określonej przez producentów grubości, przebadano w zakresie twardości (Shore typ A; TQC Sheen) wg PN-EN ISO 868 [13]. Wszystkie próbki poddano procesowi cięcia po prostej przy użyciu plotera laserowego CO₂ – Maximus PRO (model: JSM 90 x 60) chłodzonego ciecżą, o mocy 2,3 kW, prędkości cięcia 0-2000 mm/s i dokładności < 0,01 mm, będącego na wyposażeniu Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytutu Przemysłu Skórzanego w Krakowie. Ploter ten posiada pole robocze 90 x 60 cm; kontrola prędkości i mocy wiązki laserowej dostępna jest z poziomu oprogramowania (0,1-100%) i z pulpitu plotera (1,0-100%). Urządzenie wyposażone jest w system optyczny, który umożliwia zarówno wycinanie poszczególnych elementów materiałów, jak i grawerowanie w nich znaków marki/logo lub imienia/dedykacji i tym podobnych.

Jako że o precyzji przebiegu cięcia, czy też innego procesu technologicznego z użyciem lasera, decyduje jakość wiązki laserowej oddziałującej z materiałem [14], każdorazowo przed przystąpieniem do testu na materiale, z dużą precyzją ustawiano położenie ogniska wiązki laserowej.

Możliwości ustawienia ogniskowej pomiędzy głowicą lasera i ciętym materiałem (przedstawione na schemacie – Rys. 1) przykładowo pokazano na zdjęciach: Rys. 2 A – skupienie nad materiałem (nieostre), Rys. 2 B – skupienie na powierzchni materiału (ostre), Rys. 2 C – skupienie pod materiałem (nieostre).

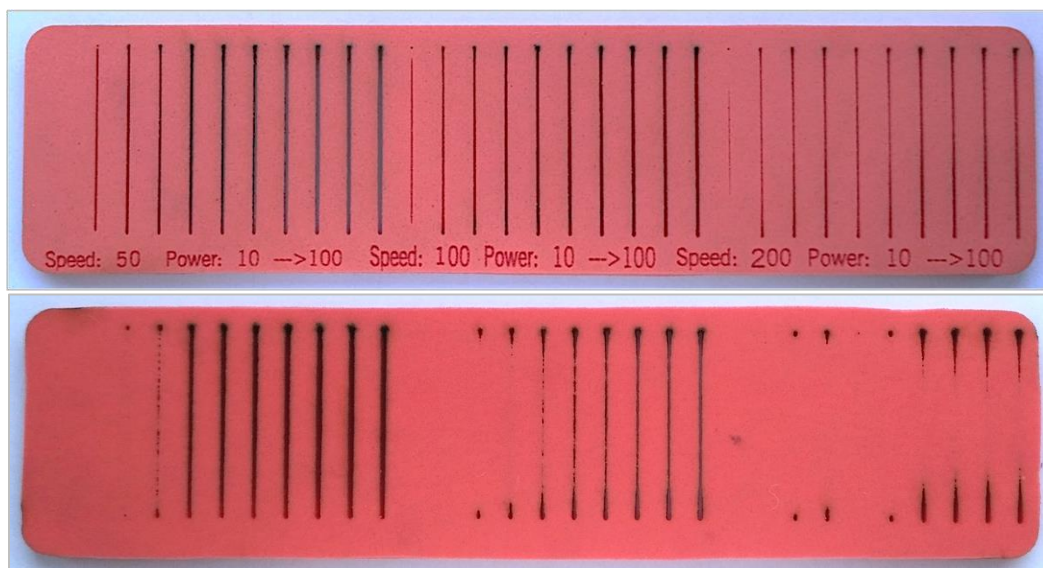


Rys. 2. Obraz pozycji ustawienia ostrości wiązki pomiędzy głowicą lasera i ciętym materiałem (A – skupienie nad materiałem, B – skupienie na powierzchni materiału, C – skupienie pod materiałem, [źródło: opracowanie własne].

Proces cięcia próbek testowano wychodząc od orientacyjnych, zalecanych w instrukcji wartości parametrów prędkości i mocy cięcia materiałów zbliżonych strukturą do testowanych (Tab. 1) oraz w oparciu o kontrolne ustawienia wstępne parametrów, w zakresach prędkości cięcia: 50, 100 do 500 mm/s – co 100 mm/s i mocy wiązki: 10 do 100% – co 10% oraz przy ustawieniu wiązki lasera w pozycji ostrej na powierzchni ciętego materiału. Przykładowy test precyzyjnego cięcia materiału – tworzywa poliuretanowego „Springolon Plus” (nr 7) – zaprezentowano na Rys. 3 (prawą i lewą stronę) przy ustawieniu parametrów prędkości: 50, 100 i 200 mm/s oraz mocy: od 10 do 100%.

Tabela 1. Wartości orientacyjne cięcia różnego typu materiałów z udziałem plotera laserowego CO₂ – Maximus PRO (model: JSM 90 x 60); *źródło:* własne, na podstawie instrukcji obsługi lasera

Rodzaj materiału	Parametry cięcia	
	prędkość [mm/s]	moc [%]
akryl (3 mm)	12	45
akryl (8 mm)	2	65
akryl (20 mm)	0,4-0,8	85
tkaniny	20-30	30-85
materiał detale	30	45
skóra	20-30	30-85
sklejka (4 mm)	20	40
sklejka (8 mm)	8	50
laminaty	15	25

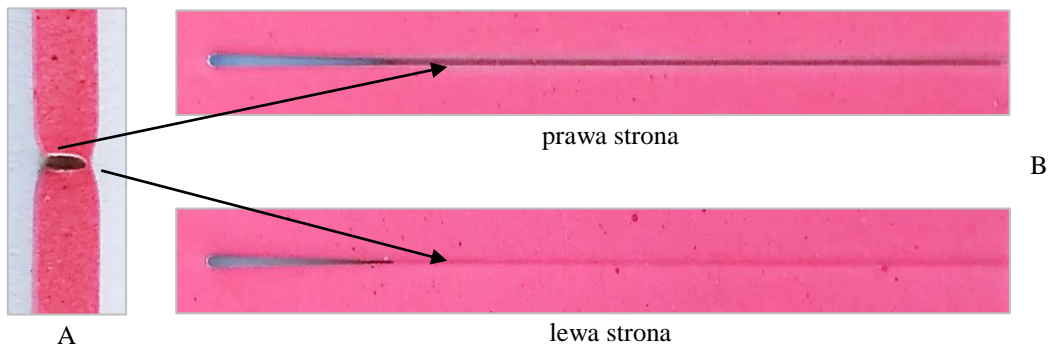


Rys. 3. Przykładowy test precyzyjnego cięcia materiału – tworzywa poliuretanowego „Springolon Plus” (prawa i lewa strona), [*źródło:* opracowanie własne].

Próbki oceniano obustronnie w oświetleniu naturalnym, w pozycji – pod światło, co umożliwiło wskazanie zakresów wartości parametrów prędkości i mocy lasera – najbardziej optymalnych dla danego materiału. Ponadto ocenie poddano efekt cięcia po prostej, tj. gładkość krawędzi, ewentualne niedocięcia, nadtopienia powierzchni oraz osmolenie próbek. Cięcie powierzchni po linii kątów lub zaokrąglenia wymaga odrębnych ustawień parametrów lasera; zagadnienie to będzie stanowić odrębne opracowanie.

3. Wyniki badań

Przeprowadzone testy cięcia szesnastu materiałów obuwniczych przy użyciu plotera laserowego CO₂ – Maximus PRO (model: JSM 90 x 60) pozwoliły na wskazanie zakresów wartości parametrów prędkości i mocy lasera – najbardziej optymalnych dla danego materiału (Tab. 2) przy zogniskowanej wiązce lasera. Nieefektywne cięcie zobrazowano na przykładzie tworzywa „EVA” (nr 6) – w przekroju poprzecznym (Rys. 4 A) wraz z widokiem prawej i lewej strony efektu niedocięcia z lekkim nadtopieniem powierzchni lewej strony (Rys. 4 B). Ma to związek z niewłaściwie dobranymi parametrami prędkości oraz mocy.



Rys. 4. Zobrazowanie przekroju poprzecznego nieefektywnego cięcia materiału – tworzywa „EVA” (A) oraz prawą i lewą stronę efektu niedocięcia z lekkim nadtopieniem powierzchni lewej strony (B), [źródło: opracowanie własne].

Ważne jest przy tym optymalne ustawienie ostrości skupienia wiązki lasera. Dla tego materiału efektywniejsze jest nieostre ustawienie wiązki lasera, co zobrazowano na zdjęciach (Rys. 5 A – prawa i lewa strona), a efekt estetyczny zależy od ustawienia wysokości głowicy lasera nad powierzchnią materiału; powierzchniowe zogniskowanie daje mniej estetyczny efekt cięcia (Rys. 5 B).

Warto zwrócić również uwagę na fakt, że dla takiego samego iloczynu parametrów prędkości i mocy wiązki lasera, lecz przy kontrastującym ich ustawieniu, występują różnice w efektach cięcia, tj. dla prędkości 50 mm/s i mocy 100% uzyskano efekt cięcia inny, niż dla prędkości 100 mm/s i mocy 50%. Przykładowo zaprezentowano je na zdjęciach (Rys. 6 A i Rys. 6 B).

Tabela 2. Zoptymalizowane parametry cięcia materiałów obuwniczych przy użyciu plotera laserowego CO₂ – Maximus PRO (model: JSM 90 x 60), [źródło: opracowanie własne]

Nr pr.	Twardość materiału, odczyt po 15” [-]	Grubość materiału [mm]	Uwagi dotyczące efektów cięcia	Optymalne parametry cięcia	
				prędkość [mm/s]	moc [%]
1	40	3,0 ± 0,1	ostre krawędzie	100	60-90
2	80	0,6 ± 0,1	zażółcenie powierzchni po obu stronach, ostre krawędzie	300	30-50
3	38	4,5 ± 0,1	ostre krawędzie	300	70-100
4	80	1,0 ± 0,1	brak uwag	500	60-90
5	89	1,7 ± 0,1	lekkie zażółcenie powierzchni po prawej stronie	100	40-100
6	37	1,9 ± 0,1	osmolenie i nadtopienie krawędzi po lewej stronie	500	70-100
7	25	3,2 ± 0,1	brak uwag	100	70-100
8	75	1,0 ± 0,1	osmolenie powierzchni po obu stronach	400	90-100
9	70	1,8 ± 0,1	osmolenie krawędzi	50	90-100
10	70	1,4 ± 0,1	osmolenie krawędzi	50	70-100
11	84	0,9 ± 0,1	osmolenie krawędzi i powierzchni po obu stronach	500	70-100
12	78	0,8 ± 0,1	zażółcenie i nadtopienie krawędzi po lewej stronie	300	50-60
13	68	1,0 ± 0,1	lekkie zażółcenie powierzchni po lewej stronie	200	70-100
14	78	0,7 ± 0,1	zażółcenie powierzchni po lewej stronie	500	40-100
15	88	1,5 ± 0,1	osmolenie krawędzi i zażółcenie powierzchni po lewej stronie	50	40-100
16	82	1,5 ± 0,1	osmolenie krawędzi i powierzchni po obu stronach	50	80-100

Wizualna ocena testowanych próbek pozwoliła wybrać najkorzystniejsze wartości z punktu widzenia czasu trwania procesu cięcia, jak też estetyki efektu końcowego. Brak doskonałości w efekcie cięcia, przejawiający się nieprawidłowościami w postaci zażółcenia powierzchni, osmolenia powierzchni lub ostrych krawędzi, świadczy o potrzebie dalszego testowania materiałów obuwniczych z uwzględnieniem pozostałych czynników mających wpływ na jakość procesu ich cięcia.



Rys. 5. Zobrazowanie efektu cięcia materiału – tworzywa „EVA” przy pozycji ustawienia wiązki lasera: nieostrego (A) i ostrego (B) – na powierzchni materiału, [źródło: opracowanie własne].



Rys. 6. Zobrazowanie efektu cięcia materiału – tworzywa „EVA” (prawej strony) przy kontrastowym ustawieniu parametrów prędkości i mocy, tj. A: 50 mm/s i 100% oraz B: 100 mm/s i 50%, [źródło: opracowanie własne].

Zanim promień lasera rozpocznie proces cięcia danego materiału, musi przebyć długą ścieżkę odbijając się od trzech luster, by w ostateczności trafić na soczewkę skupiającą. Należy więc okresowo kalibrować i czyścić te elementy.

Oprócz odciągu urządzenie posiada nawiew w postaci strumienia gazu (powietrza) skierowanego na powierzchnię materiału w punkcie cięcia, co również może wpływać na jakość obróbki materiałów. W przypadku grubszych materiałów warto również rozważyć liczbę przejść cięcia.

Ważne jest odpowiednie dostosowanie urządzenia do pracy, w tym zwrócenie uwagi, poza analizowanymi w niniejszym opracowaniu parametrami, również na prawidłowość zabezpieczenia stanowiska pracy.

Mowa tu o konieczności zabezpieczenia zarówno instalacji odciągowej, jak i urządzenia przed unoszeniem się cząsteczek węgla (sadzy) stanowiących uciążliwe zanieczyszczenie powietrza i osadzaniem się na elementach urządzenia (zwłaszcza w układzie optycznym) oraz na materiałach.

Zaniedbanie obsługi plotera w ww. zakresie, jak również w zakresie okresowych czynności smarowania przewodnic liniowych, a ponadto obsługowych – chłodziarki, zespołu filtracyjno-wyciągowego i kompresora, może prowadzić do nieprawidłowości w pracy plotera laserowego i efektach obróbki materiałów.

4. Podsumowanie

Użycie technologii laserowej CO₂ zapewnia cięcie bezkontaktowe, podczas którego nie występują naprężenia mechaniczne i niekontrolowane uszkodzenia materiału. Jest to bardzo szybki proces precyzyjnego cięcia (również nierównych powierzchni), który zapewnia gładkie krawędzie niewymagające obróbki wykończalniczej i polerowania, wysoką i stałą jakość procesu obróbki oraz wysoką powtarzalność procesu w długim czasie. Zaletą jest niewątpliwie również wysoka wydajność i niskie koszty eksploatacji, łatwość zautomatyzowania, a ponadto zapewnienie czystej produkcji i minimalizacja odpadów. Wszystko to sprawia, że technologia cięcia laserowego materiałów przemysłu lekkiego jest bardzo przydatna i coraz bardziej popularna.

Przeprowadzone testy cięcia materiałów obuwniczych przy użyciu plotera laserowego CO₂ – Maximus PRO pokazały, że oprócz czynności związanych z procedurą przygotowawczą cięcia laserowego, odpowiednia jakość, tj. efekt cięcia, wymaga precyzyjnego ustawienia parametrów urządzenia, a co za tym idzie – poświęcenia czasu na przetestowanie prędkości i mocy dla każdego nowego materiału, a także każdorazowej kontroli rozogniskowania. Mogą bowiem wystąpić zjawiska niepożądane typu astygmatyzm, czyli ogniskowanie wiązki laserowej w różnych punktach w zależności od płaszczyzny przekroju wzdłuż wiązki lub przesunięcie ogniska.

Dla zapewnienia właściwej obróbki, pozornie nieskomplikowane operacje cięcia po linii prostej wymagają niekiedy również analizy pozostałych czynników mogących wpływać na efekt obróbki materiałów, w tym kontroli stanu technicznego plotera laserowego.

W oparciu o przeprowadzone testy stwierdzono konieczność wykonania próbných cięć, w oparciu o zalecane w instrukcji ustawienia ww. parametrów, w celu uzyskania jak najlepszych efektów. Każdy z badanych materiałów posiada w swojej grupie wiele wariantów różniących się chociażby grubością lub twardością, jednak ze względu na właściwości fizyczne promieniowania laserowego można zapewnić wysoką jakość cięcia dowolnych materiałów przemysłu lekkiego – bez konieczności ich mocowania i obróbki wykańczającej, jak też optymalne wykorzystanie materiału.

Celem publikacji była próba optymalizacji parametrów cięcia materiałów obuwniczych z użyciem ww. modelu plotera laserowego CO₂. Oprócz precyzyjnego cięcia tych materiałów po prostej, możliwe jest wykonywanie bardziej zaawansowanych procesów cięcia i wówczas test powinien zawierać zarówno odcinki proste, jak i zaokrąglone, np. z zastosowaniem grafiki prostokąta z dwoma różnie zaokrąglonymi kątami. Ploter laserowy CO₂ – Maximus PRO pozwala również na perforowanie materiałów przemysłu obuwniczego, w tym skomplikowanych kształtów z możliwością ustawienia odrębnych prędkości w regionach/punktach o dużej krzywiznie linii cięcia, jak też prowadzić modyfikacje powierzchniowe, w tym grawerowanie i znakowanie materiałów. Te ostatnie procesy laserowe są bardziej złożonymi procesami fizycznymi o dużym znaczeniu naukowym i użytkowym. Zagadnienia te będą rozwinięte w odrębnej publikacji. Pozwolą na pełną ocenę przydatności plotera laserowego CO₂ – Maximus PRO (model: JSM 90 x 60) o mocy 2,3 kW, do wykorzystania w zakładach produkujących obuwie.

Źródło finansowania

Badania przedstawione w artykule przeprowadzono w ramach realizacji tematów nr: PP/KR20/001.05/1 i PS/KR20/260.06/30.

Literatura

- [1] Kaczmarek F.: *Wstęp do fizyki laserów*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1979.
- [2] America L. I., Ready J. F., Farson D. F.: *Lia handbook of laser materials processing*, Magnolia Publishing, Orlando 2001.
- [3] Domański R.: *Promieniowanie laserowe – oddziaływanie na ciała stałe*, Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa 1990.
- [4] Radziejewska J.: *Laserowa modyfikacja właściwości warstwy wierzchniej wspomaganą nagniataniem*, Prace Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN, 2011.
- [5] Angelova Y., Mezińska S., Lavov L.: *Innovative laser technology in textile industry: marking and engraving* [in:] Proceedings of the 11th International Scientific and Practical Conference **8**, 2017, str. 21.
- [6] Matusiak M., Sovoleva I.: *Zastosowanie technik laserowych w projektowaniu i wytwarzaniu odzieży*, Technologia i Jakość Wytrobów **64**, 2019, str. 48-64.
- [7] Kan Ch.: *CO₂ laser treatment as a clean process for treating denim fabric*, Journal of Cleaner Production **66**, 2014, str. 624-631.
- [8] Hung O., Kan C.: *Effect of CO₂ laser treatment on the fabric hand of cotton and cotton/polyester blended fabric*, Polymers **9**, 2017, str. 609-621.
- [9] Pawłowa M., Figura E., Solska A.: *Modułowy program kształcenia zawodowego*, [w:] Kształcenie zawodowe specjalistów obywatelstwa i odzieżownictwa, ITEE, Radom 2008.
- [10] Lau K. S., Chan P. W., Yeung K. W., Chan K., Gong W. Z.: *Surface properties of polyester fabrics induced by excimer laser processing*, Journal of Materials Processing Technology **63** (13), 1997, str. 524-528.
- [11] Kamel, M. M., Raslan W. M., Helmy H. M., Alashkar E.: *Improving properties of polyester and cellulose acetate fabrics using laser irradiation*, Journal of Textile Science and Engineering **2**, 2012, str. 117.
- [12] Akiwowo K., Tyrer J. R., Weaver G. W.: *Digital laser-dyeing for polyester fabrics*. Journal of Textile Design Research and Practice **2** (2), 2014, str. 133-151.
- [13] PN-EN ISO 868:2005. *Tworzywa sztuczne i ebonit – Oznaczanie twardości metodą wciskania z zastosowaniem twardościomierza (twardość metodą Shore'a)*.
- [14] Weber H.: *Some historical and technical aspects of beam quality*, Optical and Quantum Electronics **24**, 1992, str. 861-864.