

Agnieszka Edyta CIENKA¹
Barbara CIECIŃSKA²

OPTYMALIZACJA WARUNKÓW PRZECINANIA LASEROWEGO POLIPROPYLENU I POLIPROPYLENU Z DODATKIEM TALKU

Przecinanie laserem materiałów wymaga wykonania prób obróbki i wyboru najkorzystniejszego wariantu z punktu widzenia przyjętych kryteriów oceny jakości procesu. W pracy przedstawiono przykład procesu przygotowawczego, z którego wynika, że przecinanie polipropylenu i polipropylenu z talkiem o grubości 5 mm nie jest łatwą obróbką. Wykorzystano laser CO₂ i różnicując wykorzystaną moc lasera oraz prędkość przesuwu wiązki względem materiału uzyskano przecięcia materiału o zróżnicowanej jakości. Zaproponowano także kryteria wyboru najlepszego wariantu obróbki. Stwierdzono, że dodatek talku do polipropylenu może być czynnikiem ułatwiającym wykonanie cięcia laserem tego tworzywa.

Słowa kluczowe: laser, przecinanie materiału, tworzywa sztuczne, polipropylen

1. WPROWADZENIE

Tworzywa sztuczne (polimery) to grupa materiałów konstrukcyjnych bardzo powszechnych i chętnie stosowanych przez producentów. O ich szerokim wykorzystaniu decydują właściwości, zwłaszcza niewielka gęstość (wynosząca najczęściej mniej niż 2 g/cm³), odporność na działanie czynników chemicznych, palność, absorpcja wilgoci, brak przewodności elektrycznej. Właściwości danego polimeru są uzależnione od jego budowy, w związku z tym można znaleźć tworzywo odporne np. na działanie kwasów, ale też tworzywo nie wykazujące takiej odporności. Pomimo szeregu zalet tworzywa sztuczne charakteryzują się niską odpornością na pękanie, znaczną rozszerzalnością cieplną, niewielką odpornością na promieniowanie UV [5, 19].

Chociaż cechy wymienione wyżej w kontekście wad w wielu sytuacjach wykluczają zastosowanie tworzyw sztucznych, to jednak znajdują one wiele dziedzin, gdzie mogą być stosowane z powodzeniem.

¹ Eng. Agnieszka Edyta Cienka, FIBRAIN Sp. z o.o., Zaczernie, Polska

² PhD, Eng., Barbara Ciecńska, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, Polska

W celu umożliwienia wykorzystania tworzyw polimerowych w różnych aplikacjach stosowane są różnorodne składniki dodatkowe, wprowadzane celowo i zmieniające ich właściwości [4]. Składniki te można pogrupować, i pierwszą grupę stanowią napełniacze i nośniki wzmacniające, a drugą grupę – środki pomocnicze: stabilizatory, plastyfikatory, modyfikatory udarności, środki barwiące, opóźniacze palenia, antyelektrostatyki, środki smarne i inne [17].

Napełniacze oraz nośniki wzmacniające są dodawane do polimeru najczęściej w celu zmniejszenia kosztów materiału, ograniczenia skurczu występującego w procesie wtryskiwania, modyfikacji twardości, udarności, wytrzymałości na zginanie i ściskanie [18]. Napełniacze mogą być naturalne (mączka drzewna, włókna lniane, włókna celulozowe), nieorganiczne (kreda, kaolin, kwarc, talk, mika, krzemionka) i syntetyczne (włókna szklane, węglowe, grafitowe, kulki szklane) [6, 18]. Występują one w różnej postaci: jako napełniacze proszkowe – sfery, płatki, krótkie włókna cięte, oraz jako napełniacze włókniste, pod postacią długich włókien, pasm, arkuszy (takie napełniacze mają zastosowanie w produkcji tworzyw warstwowych - laminatów) [18].

Tworzywa sztuczne są narażone w różnym stopniu na degradację. Może ona mieć miejsce z powodu czynników takich jak: promieniowanie, żywe organizmy, obecność metali, cząsteczek O_2 , CO , NO_2 , NH_3 , SO_2 , H_2O_2 ; naprężeń, temperatury, wody [14]. Do modyfikacji właściwości polimerów stosuje się różnorodne środki pomocnicze. Jedną z metod polepszania odporności na wymienione wcześniej czynniki jest dodanie do polimeru stabilizatorów. Z uwagi, że stabilizatory mogą w różny sposób wpływać na ostateczne właściwości polimeru, bardzo często stosuje się ich mieszaniny na zasadzie synergii [8]. Do stabilizatorów zalicza się m.in. absorbery UV, stabilizatory ekranujące (do zmniejszenia przenikalności promieniowania na zasadzie filtru), dezaktywatory wolnych rodników, antyutleniające, stabilizatory termiczne (m.in. zapobiegające uwalnianiu się np. chlorowodoru lub bromowodoru przyspieszających proces degradacji).

Do środków pomocniczych zalicza się także dodatkowe substancje zmieniające właściwości mechaniczne. Są to np. plastyfikatory, których obecność wpływa m.in. na obniżenie temperatury kruchości i zeszklenia, twardości, wytrzymałości na rozciąganie oraz modyfikatory udarności podnoszące odporność tworzywa na uderzenia [3, 16, 18]. W celu zapewnienia określonych warunków eksploatacji elementów wykonanych z tworzyw dodaje się też inne substancje pomocnicze:

- barwniki i pigmenty nadające pożądaną barwę; barwniki zachowują przezroczystość tworzywa i są dodawane w ilości 2-4% masy, pigmenty nadają barwę nieprzezroczystą, dodawane są w ilości 0,4÷1,2% masy [4], dodawane związki chemiczne nie zmieniają właściwości elektrycznych i mechanicznych tworzywa, są: odporne na działanie promieni UV, nietoksyczne i odporne na działanie wody, nie zmieniają barwy pod wpływem działania temperatury [18];

- antypireny – ze względu na palność polimerów, dodawane w celu opóźnienia, uniemożliwienia lub zmniejszenia palności, wpływając chemicznie lub/i fizycznie na proces spalania [13];
- środki smarne (poślizgowe, smarujące) dodawane w celu usprawnienia procesu przetwórczego, nadania połysku, gładkości, ograniczenia przyczepności do ścianek form, zmniejszenia tarcia wewnętrznego, ochrony przed przegrzaniem i rozkładem termicznym w czasie wytłaczania lub wtryskiwania [4, 12, 18];
- środki antyelektrostatyczne do zredukowania m.in. zagrożenia pożarowego, osiadania zanieczyszczeń na powierzchni tworzywa, szkodliwego oddziaływania na żywe organizmy, powodowanych zjawiskiem elektryczności statycznej [1, 20];
- napełniacze i nośniki wzmacniające – wchodzące w skład tworzywa ze względu na potrzebę redukcji kosztów wytwarzania, ograniczenia skurczu przy kształtowaniu wtryskowym, modyfikacji twardości, udatności, wytrzymałości na zginanie i ściskanie, odporności cieplnej, itp. [18].

2. PRZECINANIE LASEROWE TWORZYW SZTUCZNYCH

W procesach wytwórczych stosuje się wiele różnych sposobów kształtowania wyrobów z tworzyw sztucznych. Mogą to być czynności związane z przetwórstwem wstępnym – jak mieszanie, suszenie, rozdrabnianie, formowanie półwyrobów, przetwórstwem zasadniczym, zwanym obróbką formującą, oraz przetwórstwem wtórnym [4, 19].

Przetwórstwo wtórne obejmuje operacje technologiczne mające na celu ukształtowanie gotowego wyrobu z wcześniej przygotowanego półwyrobu. Wyróżnia się techniki łączenia – zgrzewanie, spawania, klejenie, techniki obróbki skrawaniem – toczenie, przecinanie, wiercenie, i inne. Do obróbki tworzyw sztucznych wykorzystuje się także techniki obróbki strumieniowo-erozyjnej, a także obróbkę laserem [9, 11].

Laser charakteryzuje się oryginalnymi właściwościami. W urządzeniach laserowych generowane jest promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie fal od podczerwieni, przez światło widzialne do ultrafioletu, lub nawet do promieniowania X.

Wiązka promieniowania jest monochromatyczna, ukierunkowana, spójna czasowo i przestrzennie, umożliwia uzyskanie dużej gęstości mocy [7, 10]. Z punktu widzenia technologii jest narzędziem nieużywającym się, bezkontaktowym, łatwo sterowalnym, możliwym do automatyzacji i robotyzacji. Ze względu na spadające koszty zakupu i utrzymania laserów, stały się one częste w produkcji różnych wyrobów, w tym wyrobów z tworzyw sztucznych.

Przecinanie laserowe tworzyw sztucznych może odbywać się na drodze: stopienia i wydmuchania płynnego tworzywa, odparowania (ablacji) lub degradacji chemicznej [15].

Cięcie ze stopieniem i wydmuchem jest częste w przypadku tworzyw termoplastycznych. Stopione tworzywo jest wydmuchiwane strumieniem gazu, który ma także zadanie zapobieganie utlenianiu się lub spalaniu [9]. W wyniku oddziaływania wiązki tworzy się szczelina o określonej szerokości, różnej w zależności od rodzaju materiału i jego grubości. W procesie przecinania ablacyjnego tworzywo przechodzi ze stanu stałego w gazowy i wyparowuje. Podczas obróbki wykorzystuje się także gaz, którego zadaniem jest usuwanie par ze strefy obróbki oraz zahamowanie krzepnięcia i kondensacji tworzywa [9]. Z kolei cięcie przez degradację chemiczną jest stosowane w większości przypadków do obróbki tworzyw termoutwardzalnych, rozdzielanie materiału odbywa się w wyniku rozpadu tworzywa pod wpływem wiązki promieniowania. Obróbce towarzyszy powstawanie dymu oraz warstwy sadzy przy krawędziach [15].

Do przecinania tworzyw sztucznych wykorzystuje się różne lasery, m.in. molekularne CO₂, na ciele stałym Nd:YAG, w zależności od metody.

Z punktu widzenia efektów obróbki istotne są parametry techniczne – szerokość szczeliny wejściowej i wyjściowej, równoległość powierzchni przecięcia (wyrażona kątem powierzchni przecięcia względem normalnej do płaszczyzny materiału), rozległość strefy wpływu ciepła. Za ich pomocą możliwa jest ocena jakości przecinania laserowego [15].

3. ANALIZA PORÓWNAWCZA EFEKTÓW PRZECINANIA LASEREM WYBRANYCH TWORZYW SZTUCZNYCH

Z uwagi na różnorodność substancji chemicznych dodawanych do tworzyw sztucznych i ich określony wpływ na właściwości, przeprowadzono badania eksperymentalne, których celem było ustalenie ich wpływu także na przebieg przecinania laserem. Do prób wybrano polipropylen i polipropylen z 30% dodatkiem talku. W próbach przecinania wykorzystano laser CO₂ o mocy 70 W i długości fali 10,6 μm. Urządzenie posiada soczewkę skupiającą o średnicy 20 mm i ogniskowej 101,6 mm, a wiązka laserowa ma szerokość ok. 0,3 mm. Sterowanymi parametrami była moc lasera i prędkość przesuwu wiązki względem powierzchni materiału, położenie ogniska kolimacji ustalono wewnątrz materiału i była to wielkość stała [2].

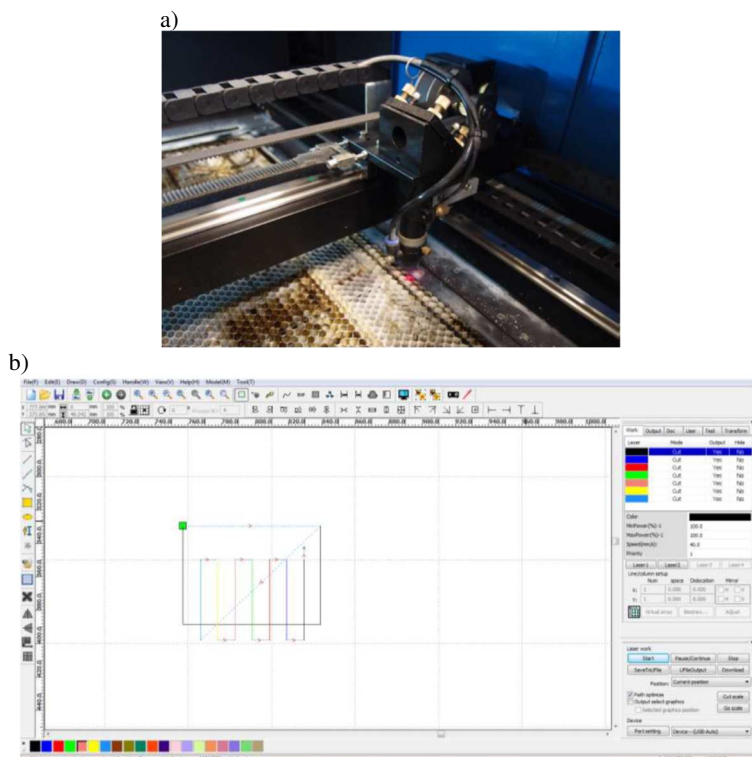
4. CHARAKTERYSTYKA WYBRANEGO MATERIAŁU

Polipropylen – to tworzywo termoplastyczne, przezroczyste, o dobrej udarowości, znacznej wytrzymałości na rozciąganie, dużej twardości i sztywności. Jest odporne na oddziaływanie wody, kwasów, alkoholi, rozpuszczalników, roztworów

solu. Dodatek obojętnego chemicznie talku w stopniu średnim poprawia wytrzymałość na ściskanie, zwiększa moduł sprężystości podłużnej, zmniejsza rozszerzalność cieplną, obniża skurcz przetwórczy, zwiększa przewodność cieplną, zwiększa odporność elektryczną oraz odporność na ścieranie i sztywność. Nie zmienia odporności chemicznej tworzywa, natomiast wpływa na obniżenie kosztów wytwarzania wyrobu [18]. W badaniach wykorzystano płyty o grubości 5 mm w obu wariantach.

5. PRZEBIEG BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH I UZYSKANE WYNIKI

W celu ustalenia parametrów technologicznych przecinania laserowego polipropylenu laserem CO₂ wykonano wstępne przecięcia. Pozwoliły one wybrać zakres prędkości przesuwu wiązki względem materiału oraz ustalić właściwą moc lasera, przy czym za kryterium wyboru parametrów technologicznych była jakość przecięcia. Wykorzystany w eksperymencie ploter laserowy oraz możliwość sterowania, przez definiowanie linii i przypisanych do nich parametrów pracy lasera w programie RDWorks V8 pokazano na rys. 1.

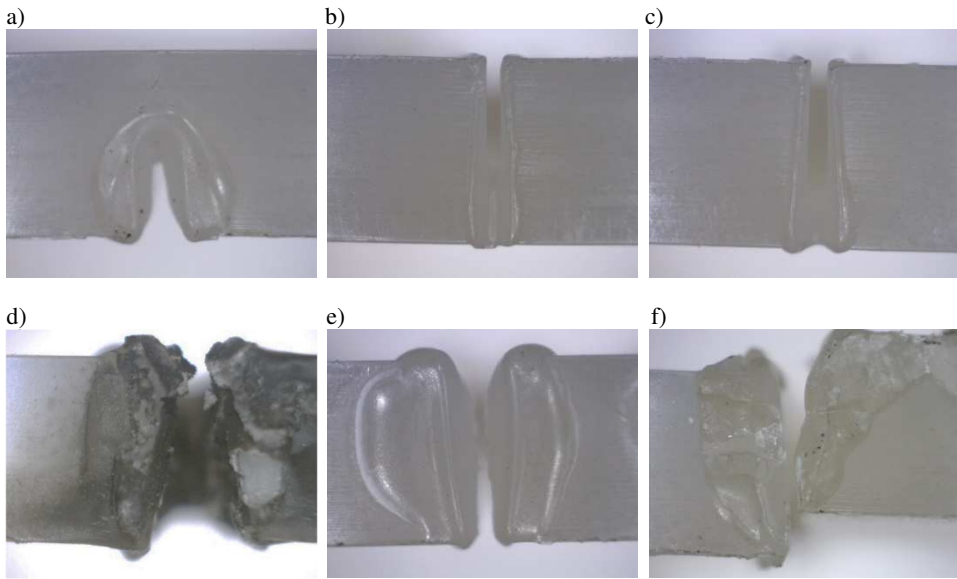


Rys. 1. Ploter laserowy CO₂ (a) i sposób programowania przecięć (b)

Miejsce przecięcia oceniano ze względu na:

- rozdzielenie materiału na całej grubości (osiągnięcie celu obróbki),
- uzyskanie najwęższej szczeliny, co oznacza minimalne naddatki na obróbkę i oszczędność materiału,
- równoległość krawędzi przecięcia (zachowanie dokładności i tolerancji wymiarowych dla obu płaszczyzn płyty),
- brak wypływki i przypaleń, zaklasyfikowanych do wad wyrobu (ze względu na konieczność dodatkowej obróbki, a w razie braku jej efektów – niemożność nadania dokładności i oczekiwanego wyglądu; utratę walorów estetycznych).

Przykłady rozcięć uznanych za wadliwe w prezentowanym eksperymencie pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Różne rozcięcia zaklasyfikowane jako wadliwe: a) niepełne, b) powtórnie zasklepione, c) o krawędziach nierównoległych, d) przypalone, e) z nadmierną wypływką, f) zniekształcone

Operację przecinania płyt przeprowadzono przy trzech wartościach mocy lasera: 35 W, ok. 52 W i ok. 70 W (co daje odpowiednio 50%, 75% i 99% mocy lasera), kolejno nacinając materiał z różną prędkością. W wyniku zróżnicowanych warunków oddziaływania wiązki szczelina przecięcia nie powstała, albo miała różną szerokość. Wielkość szczeliny w mm ustalono mierząc ją szczelinomierzem. Warianty obróbki oraz uzyskane wyniki pokazano w tab. 1.

Aby ustalić najlepszy wariant obróbki dokonano obserwacji miejsca rozcięcia. Na rys. 3÷5 przedstawiono efekty przecinania.

Tabela 1. Warianty obróbki i szerokości szczelin (w mm)

Moc lasera, W	Prędkość, mm/s	20	25	30	35	40	45	50	55	60
35	PP	*	0,5	0,5	*	0,45	*	0,45	0,45	0,6
	PP+30% talk	0,4	*	*	0,2	0,25	*	0,5	0,5	0,45
Moc lasera, W	Prędkość, mm/s	1	2	3	4	6	8	10	15	20
ok. 52	PP	*	*	0,5	0,5	0,45	*	*	*	*
	PP+30% talk	*	0,45	0,45	0,4	0,3	*	*	*	*
ok. 70	PP	*	*	*	*	0,4	0,35	*	*	*
	PP+30% talk	*	0,45	0,45	0,4	0,35	*	*	*	*
* brak przecięcia Szare pole – najlepszy wariant ze względu na estetykę Pogrubiona czcionka – najwęższa szczelina										

a) od góry



d) od góry



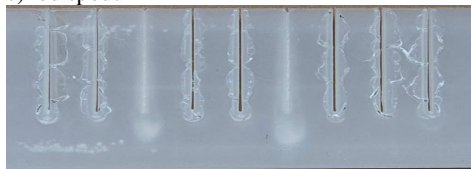
b) od czoła



e) od czoła



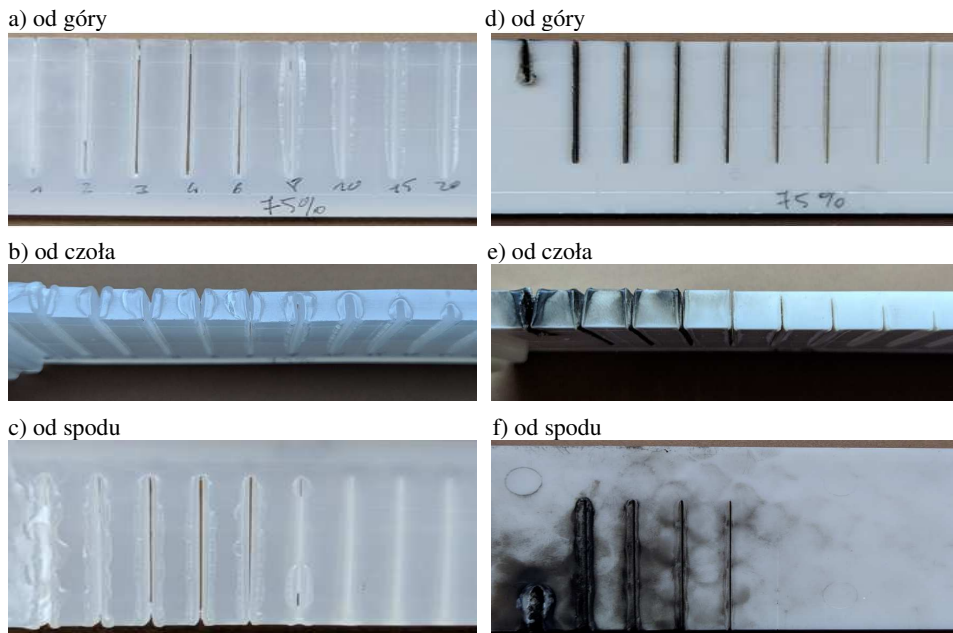
c) od spodu



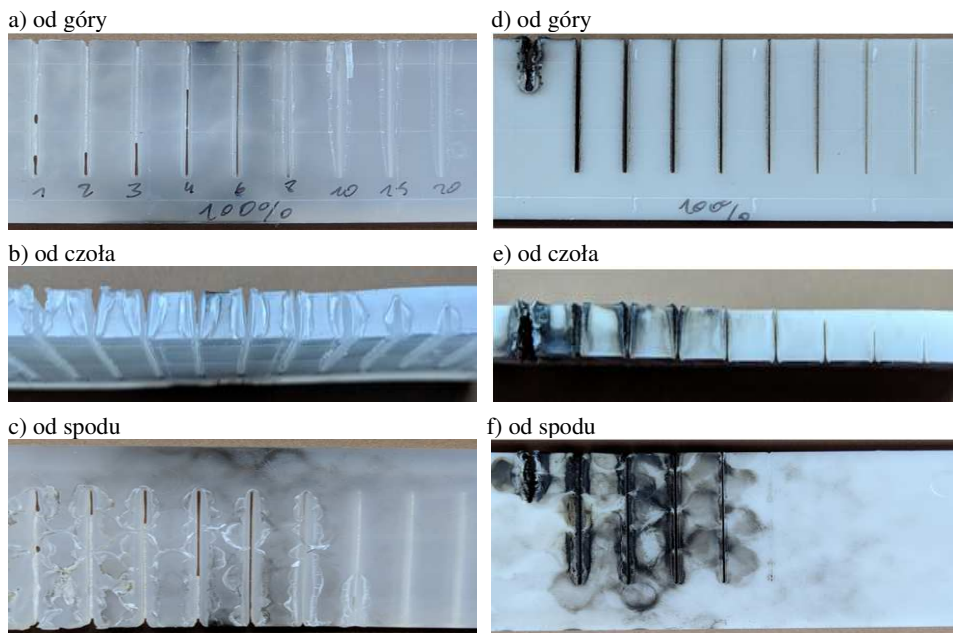
f) od spodu



Rys. 3. Polipropylen (a-c) i polipropylen z talkiem (d-f) przecięty z prędkościami (od lewej): 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60 mm/s przy mocy lasera 35W (50%)



Rys. 4. Polipropylen (a-c) i polipropylen z talkiem (d-f) przecięty z prędkościami (od lewej): 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 15 i 20 mm/s przy mocy lasera ok. 52W (75%)



Rys. 5. Polipropylen (a-c) i polipropylen z talkiem (d-f) przecięty z prędkościami (od lewej): 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 15 i 20 mm/s przy mocy lasera ok. 70W (99%)

Ustalono, że największe szczeliny uzyskano w przypadkach:

- dla polipropylenu: mocy 35W i prędkościach: 40, 50 i 55 mm/s, mocy ok. 52W i prędkości 6 mm/s, mocy ok. 70W i 8 mm/s;
- dla polipropylenu z talkiem: mocy 35W i prędkości 35 mm/s, mocy ok. 52W i ok. 70W, prędkości 6 mm/s w obu przypadkach.

Szczeliny uznane za największe w większości przypadków były również najlepsze ze względów estetycznych, z wyjątkiem obróbki polipropylenu laserem o mocy ok. 52W i ok. 70W. Wybór najładniejszego miejsca rozcięcia wiąże się z uzyskaniem nieco szerszej szczeliny rozcięcia (o 0,05 mm w obu przypadkach).

Podczas obróbki z innymi parametrami obserwowano również pogorszenie się jakości wg pozostałych kryteriów: w wielu przypadkach materiał nie został rozdzielony, krawędzie szczelin o większych szerokościach na ogół nie były równoległe, a w przypadku polipropylenu z dodatkiem talku nie udało się uniknąć powierzchniowego zwęglenia, okazało się ono jednak łatwe do usunięcia w przypadku obróbki z optymalnymi (wybranymi wcześniej) parametrami.

6. WNIOSKI

Na podstawie analizy wyników można stwierdzić, że wykonywanie wstępnych prób planowanego procesu obróbkowego obróbki laserem tworzyw sztucznych, może mieć uzasadnienie. W badanej operacji przecinania laserem o najniższej mocy (35W – 50%) nie można wskazać jednoznacznego związku prędkości przesuwu wiązki z optymalną szerokością szczeliny. Dodatkowo, wiele założonych wariantów jest nieefektywnych (nie rozdzielono materiału).

Zwiększając moc i jednocześnie zmniejszając prędkość przesuwu wiązki względem materiału, a tym samym wydłużając czas oddziaływania skoncentrowanej wiązki energii na materiał, można uzyskać lepsze wyniki. Zarówno dla mocy ok. 52W (75%), jak i ok. 70W (99%) można określić przedział prędkości efektywnych. Można już zatem pomyśleć o laserze CO₂ do cięcia tworzywa o grubości 5 mm w warunkach produkcyjnych.

Podczas wyboru najlepszego wariantu może pojawić się dylemat: czy wybierać wariant dający największą szczelinę, czy najładniejszą krawędź. Różnica 0,05 mm może okazać się nieistotna dla zapewnienia dokładności ekonomicznej (to znane pojęcie w technologii maszyn). Wytwórca może zdecydować, że przyjemnie nieznacznie większy naddatek na przecinanie, ale otrzyma wyrób estetyczny i niewymagający obróbki wykończeniowej. Taka sytuacja miała miejsce w przypadku przecinania polipropylenu, kiedy laserem o mocy ok. 52 W i prędkości 4 mm/s (nie 6 mm/s) i mocy ok. 70 W i prędkości 6 mm/s (nie 8 mm/s), otrzymano najładniejsze krawędzie. Kryterium estetyki nie było tożsame z kryterium oszczędności wykorzystania materiału.

Dodatkowym wnioskiem, jaki nasuwa się po analizie wyników, jest uznanie talku za korzystny dodatek do polipropylenu także na potrzeby obróbki laserem.

Dla tego wariantu materiału otrzymano szerszy zakres efektywnych prędkości cięcia, jest także widoczna logiczna zależność szerokości szczeliny od tej prędkości – im mniejsza prędkość, tym rozcięcie szersze. Mogą mieć na to wpływ cechy uzyskiwane po dodaniu talku, talk wpływał na zmniejszenie rozszerzalności i zwiększenie przewodności cieplnej. Dzięki temu zmiany postaci materiału podczas obróbki laserem mogły być bardziej przewidywalne.

Podsumowując można stwierdzić, że obróbka wybranego tworzywa o grubości 5 mm nie jest łatwa, jak można by tego oczekiwać. Uzasadnione są wstępne próby obróbki przed uruchomieniem właściwej produkcji, dopasowanie posiadanego lasera, lub zakup nowego, z uwzględnieniem spostrzeżeń i po dokonaniu wyboru kryterium decydującego o parametrach obróbki.

Podziękowanie: Autorki dziękują panu dr Leszkowi Pyziakowi z Zakładu Optyki Stosowanej Wydziału Matematyki i Fizyki Stosowanej Politechniki Rzeszowskiej za pomoc techniczną w przygotowaniu próbek.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bortel K., *Środki pomocnicze stosowane w przetwórstwie tworzyw polimerowych*. Cz.2. Przetwórstwo Tworzyw 6, 2008.
- [2] Cienka A. E.: *Analiza porównawcza efektów cięcia laserowego tworzyw sztucznych z wybranymi dodatkami*. Praca inżynierska, ORPD, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 2020
- [3] Gruin I., *Materiały polimerowe*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2003.
- [4] Heneczkowski M., Oleksy M., *Technologia przetwórstwa tworzyw sztucznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2014.
- [5] Hyla I., *Tworzywa sztuczne: własności, przetwórstwo, zastosowanie*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2000.
- [6] Klepka T. (red.), *Nowoczesne materiały polimerowe i ich przetwórstwo. Część 1*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin, 2014
- [7] Kujawski A., Szczepański P., *Lasery. Podstawy fizyczne*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1999.
- [8] Latos M., Masek A., Zaborski M., *Fotodegradacja materiałów polimerowych*. Przetwórstwo Tworzyw 4, 2017.
- [9] Oczos K., *Kształtowanie materiałów skoncentrowanymi strumieniami energii*. Wydawnictwo Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 1988.
- [10] Owczarek G., Wolska A., *Aspekty bezpieczeństwa przy obsłudze urządzeń laserowych*. Bezpieczeństwo Pracy, 11/2008, ss. 2-5
- [11] Pająk E., *Obróbka ubytkowa. Technologia obróbki wiórowej, ściernej i erozyjnej oraz systemów mikroelektromechanicznych*. PWSZ w Koninie, Konin, 2016.
- [12] Rabek J. F., *Współczesna wiedza o polimerach. T.2, Polimery naturalne i syntetyczne, otrzymywanie i zastosowanie*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2017.
- [13] Riegert D., *Sposoby modyfikowania właściwości palnych tworzyw sztucznych*. BiTP Vol. 30 Issue 2, 2013.

- [14] Rojek M., *Metodologia badań diagnostycznych warstwowych materiałów kompozytowych o osnowie polimerowej*. Open Access Library, Volume 2, 2011.
- [15] Rytlewski P., *Studium laserowego i plazmowego modyfikowania warstwy wierzchniej materiałów polimerowych*. Wydawnictwo Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego, Bydgoszcz, 2015.
- [16] Saechtling H., *Tworzywa sztuczne: poradnik*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2007.
- [17] Sasimowski E. (red.), *Przetwórstwo tworzyw polimerowych: aspekty technologiczne i nowe trendy. Część 1*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin, 2015.
- [18] Szlezyngier W., Brzozowski Z. K., *Tworzywa sztuczne: chemia, technologia wytwarzania właściwości, przetwórstwo, zastosowanie. T.3, Środki pomocnicze i specjalne zastosowanie polimerów*. Wydawnictwo Oświatowe FOSZE, Rzeszów, 2012.
- [19] Wilczyński K. (red.), *Przetwórstwo tworzyw sztucznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2000.
- [20] <https://www.plastech.pl/wiadomosci/Srodki-antystatyczne-po-co-sa-dodawane-do-tworzyw-13246> (dostęp 24.11.2019)

DOI: 10.7862/rf.2021.pfe.1

Received: 18.03.2021

Accepted: 28.09.2021

