

Wpływ wartości posuwu podczas cięcia laserem na chropowatość powierzchni przecięcia

MARCIN GALON, JAROSŁAW ROBERT MIKOŁAJCZYK *

W pracy przedstawiono badania mające na celu określenie wpływu wartości posuwu lasera na chropowatość powierzchni przecinanej. Stwierdzono, że parametr ten ma istotny wpływ na badaną cechę wyrobu. Zwiększenie wartości posuwu wpływa na zmniejszenie chropowatości powierzchni przecięcia. Określono korelację między parametrem chropowatości Ra oraz wartością posuwu.

WSTĘP

Historia lasera sięga lat 60-tych XX wieku i dotyczy wzmocnienia światła poprzez pobudzoną emisję promieniowania. Źródłem emisji tego typu światła może być m.in.: gaz, dioda lub kryształ. W 1964 roku w USA zbudowano laser na dwutlenek węgla pracujący w trybie ciągłym, co stało się podstawą do produkcji wycinarek laserowych CO₂, które znalazły szerokie zastosowanie w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym i innych branżach.

Wycinarka laserowa CO₂ jest rodzajem wycinarki wykorzystującej gazowy laser CO₂ jako źródło energii do generowania wiązki laserowej. Ten rodzaj wycinarek jest szeroko stosowany w przemyśle ze względu na swoją skuteczność w cięciu i znakowaniu różnorodnych materiałów [8]. W wycinarkach laserowych CO₂ źródłem energii jest gaz laserowy CO₂ stanowiący mieszkankę helu, azotu i elektrycznie wzbudzonego dwutlenku węgla. Lasery CO₂ są najczęściej pompowane za pomocą przepływu prądu stałego przez mieszkankę gazu. Zasada działania wycinarki laserowej opartej na technologii laserowej CO₂ polega na wykorzystaniu intensywnej wiązki światła do precyzyjnego nagrzewania i cięcia różnych materiałów. Proces ten rozpoczyna się od zasilania lasera prądem elektrycznym, który powoduje wzbudzenie mieszkanki gazów (CO₂, N₂, He) w komorze laserowej. Proces generowania wiązki laserowej zaczyna się, gdy elektrony w cząsteczkach dwutlenku węgla są pobudzane energią z zasilania elektrycznego. Elektrony przeskakują między poziomami energetycznymi, a gdy opadają na niższy poziom, emitują falę fotonów o długości w za-

kresie 9,4÷10,6 μm. Emitowane fotony wzbudzają inne cząsteczki dwutlenku węgla, co prowadzi do kaskadowego wydzielania kolejnych fotonów. Ten proces emisji wymuszonej wzmaga i wzmocnia wiązkę laserową. Skupiona wiązka laserowa kierowana jest za pomocą lusterek do głowicy, gdzie jest ogniskowana przez soczewki, w celu uzyskania wiązki o dużej gęstości mocy. Proces cięcia polega na skierowaniu promienia laserowego na powierzchni metalu, który ulega nagraniu, co przedstawiono na rys. 1. W zależności od rodzaju obróbki, materiał odparowuje, topnieje lub ulega spalaniu. Dodatkowo do strefy cięcia doprowadza się pewną ilość gazu pod ciśnieniem, który ma za zadanie wydmuchiwać stopiony materiał i powstałe przy tym pary. Większość występujących obecnie na rynku wycinarek laserowych jest zintegrowana z systemami komputerowymi CAD/CAM, które pozwalają na precyzyjne sterowanie ruchem wiązki, jej mocą i trajektorią, umożliwiając cięcie skomplikowanych wzorów.

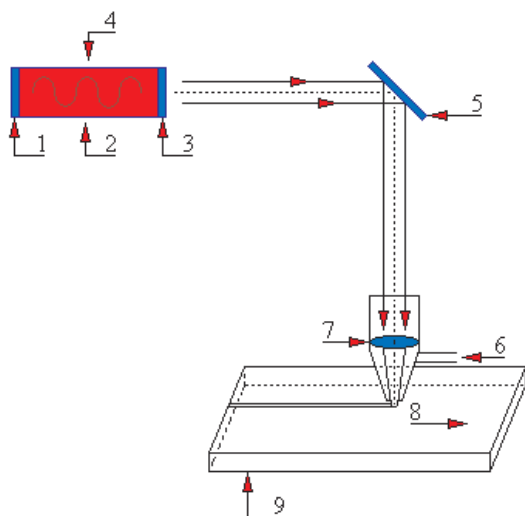
W wycinarkach laserowych wykorzystujących technologie *Fiber*, medium służącym do generowania wiązki laserowej, są włókna światłowodowe. Włókno optyczne jest domieszkowane pierwiastkami ziem rzadkich. Najczęściej są to: iterb (Yb), neodym (Nd), dysproz (Dy), prazeodym (Pr),

* Inż. Marcin Galon, e-mail: marcin.galon@poczta.onet.pl, dr inż. Jarosław Robert Mikołajczyk, Akademia Nauk Stosowanych im. Stanisława Staszica w Pile, Katedra Inżynierii Mechanicznej, e-mail: jmikolajczyk@ans.pila.pl.

tul (Tm), erb (Er) i holm (Ho). Źródłem energii jest zazwyczaj dioda laserowa zasilana prądem elektrycznym.

Elektrony przechodzą przez warstwę półprzewodnikową i emitują energię w formie fotonów. W przeciwieństwie do

innych diod elektroluminescencyjnych, diody laserowe emitują fale świetlne spójne fazowo i mające jednakową długość. Strumień energii trafia do domieszkowanego włókna, gdzie wzbudza emisję światła laserowego. Włókno światłowodowe składa się z rdzenia, przez który przepływa główna wiązka światła i powłoki. Rdzeń jest tak zaprojektowany, aby jego materiał miał większy współczynnik załamania światła niż materiał powłoki. Poprzez domieszkowanie, rdzeń prowadzi, ale też wzmacnia światło sygnałowe. Pierwsza powłoka okalająca rdzeń posiada mniejszy współczynnik załamania, ale nadal wspólnie z rdzeniem prowadzi światło pompujące. Dostarcza przez to energię potrzebną do wzmocnienia światła w rdzeniu. Zewnętrzna powłoka posiada najmniejszy współczynnik załamania światła. W większości przypadków jest ona wykonywana z materiału polimerowego. Ten typ włókna charakteryzuje się bardzo małymi stratami mikrozagięciowymi. W nowoczesnych włóknach dwupłaszczkowych stosowanych w laserach o dużej mocy, wewnętrzna powłoka ma większy współczynnik załamania niż zewnętrzna, co pozwala na prowadzenie światła przez całkowite wewnętrzne odbicie. Opiera się to na takiej samej zasadzie jak prowadzenie światła w rdzeniu dla innego zakresu fal. Światło pompujące może być z łatwością wprowadzane do wewnętrznej warstwy. Światło, przemieszczając się w warstwie wewnętrznej, wzbudza rdzeń, tym samym napędzając proces wzmocnienia wiązki.



Rys. 1. Schemat cięcia laserem CO₂ [3]: 1 – lustro całkowicie odbijające wiązkę; 2 – gaz rezonatorowy (CO₂, N₂, He); 3 – lustro częściowo odbijające; 4 – energia elektryczna; 5 – lustro zmiany kierunku wiązki; 6 – gaz roboczy O₂, N₂, Ar; 7 – soczewka skupiająca; 8 – kierunek posuwu głowicy; 9 – obrabiany materiał

»»

Wiązka światła jest doprowadzana do głowicy tnącej za pomocą przewodu z włóknem światłowodowym. Za pomocą zestawu lusterek i soczewek skupiających, nakierowana jest na powierzchnię materiału obrabianego. Ruch głowicy tnącej sterowany jest programem komputerowym.

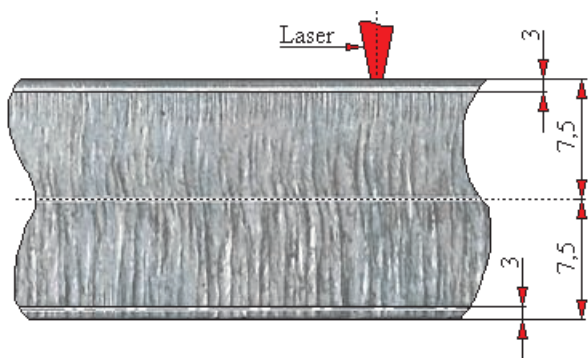
WARUNKI BADAŃ

Jako materiał konstrukcyjny do badań przyjęto niskostopową stal konstrukcyjną gatunku S355J2+N walcowaną na gorąco, charakteryzująca się m.in. drobnoziarnistością oraz gwarantowaną spawalnością przy zwiększonej granicy plastyczności. Gatunek ten można ciąć zarówno palnikiem gazowym jak i plazmą. Grubość arkusza blachy, z którego wycinano próbki wynosiła 15 mm. Stal ta należy do stali krzemowo-manganowej o zawartości węgla 0,2%, manganu 1,5% oraz krzemu od 0,2% do 0,5%. W stanie zmiękczonym materiał ten osiąga twardość 220 HB, granica plastyczności wynosi 355 MPa. Oprócz tego stal ta charakteryzuje się udarnością na poziomie 27 J w temperaturze -20°C . Możliwe jest jej wyżarzanie normalizujące w zakresie temperatur $920^{\circ}\text{C} \div 940^{\circ}\text{C}$. Ponadto gatunek ten nadaje się do procesów kucia i walcowania w temperaturze poniżej 1300°C oraz do spawania. Natomiast gatunek ten nie jest odpowiedni do azotowania i do hartowania [5, 6, 8, 9, 12, 13].

Proces cięcia odbywał się na wycinarce laserowej ByStar Fibre 6255 firmy Bystronic. Stałymi parametrami procesu cięcia były:

- promień narzędzia $r = 0,21 \text{ mm}$;
- moc lasera $P = 15000 \text{ W}$;
- położenie ogniskowej: 3 mm;
- ciśnienie gazu $G3 = 0,6 \text{ MPa}$ (gaz towarzyszący – azot);
- odstęp dyszy: 0,4 mm.

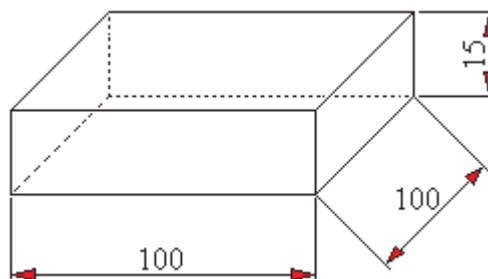
Do pomiaru chropowatości powierzchni ciętej laserem zastosowano profilometr firmy „Mahr” model MarSurf PS10. Chropowatość mierzono w odległości 3 mm od górnej krawędzi próbki



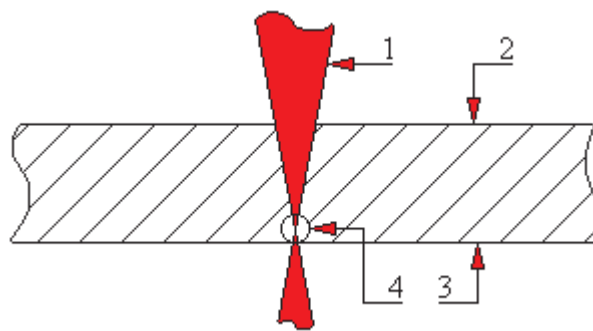
Rys. 2. Miejsca wykonania pomiarów parametru Ra

krawędzi próbki (pomiar A) licząc od strony wejścia lasera oraz w połowie grubości blachy (pomiar B), czyli w odległości 7,5 mm od górnej krawędzi blachy (rys. 2).

Wycinane próbki miały wymiary $100 \times 100 \times 15 \text{ mm}$ (rys. 3). Powierzchnia próbki wynosiła więc $10\,000 \text{ mm}^2$, a jej objętość wynosiła $150\,000 \text{ mm}^3$. Masa próbki dla określonej przez producenta gęstości wynosiła 1175 g.



Rys. 3. Wymiary badanych próbek wycinanych za pomocą lasera



Rys. 4. Schemat położenia punktu ogniskowania przy cięciu metalu w stanie ciekłym (wytapianie i wydmuch) [6]: 1 – promień laserowy; 2 – górna powierzchnia arkusza; 3 – dolna powierzchnia arkusza; 4 – przybliżone położenie punktu ogniskowania



Rys. 5. Wycinarka laserowa ByStar Fibre 6255 firmy Bystronic ze stanowiskiem operatora

Podczas wykonywania próbek zastosowano technikę cięcia metalu w stanie ciekłym (cięcie przez wytapianie i wydmuch). Cięcie takie polega na doprowadzeniu metalu do stanu ciekłego za pomocą energii wiązki laserowej i wydmuchu stopionego materiału za pomocą gazu obojętnego. Nie zachodzi tutaj zjawisko spalania, więc cała energia musi

pochodzić z wiązki laserowej o większej mocy. Brak reakcji utleniania, który zapewnia osłona gazu obojętnego o dużym ciśnieniu, pozwala osiągnąć powierzchnie cięcia wolne od tlenków i lepszą jakość krawędzi powierzchni. Gazem towarzyszącym przy tego typu obróbce jest przeważnie azot lub argon. Moc lasera przy tej technice oscyluje w granicach 80÷100% maksymalnej mocy, a ciśnienie gazu powinno być w granicach 0,5÷2,0 MPa. Położenie punktu ogniskowego powinno być w przybliżeniu przy dolnej krawędzi blachy (rys. 4). Na rys. 5 przedstawiono wycinarkę laserową ByStar Fibre 6255 firmy Bystronic. Natomiast na rys. 6 przedstawiono most tnący i wóz z zamontowaną głowicą.



Rys. 6. Most tnący i wóz z zamontowaną głowicą oraz krata do mocowania blach na stole roboczym. Wycinarka laserowa ByStar Fibre 6255 firmy Bystronic

WYNIKI BADAŃ

W Tabeli 1 przedstawiono zestawienie pomiarów parametru Ra ciętej powierzchni blachy na wysokości 3,0 mm oraz 7,5 mm, natomiast na rys. 7 i 8 przedstawiono w sposób graficzny, za pomocą programu R [1, 2, 3, 4, 11, 12], wartości parametru Ra dla poszczególnych wartości posuwu P cięcia laserem.

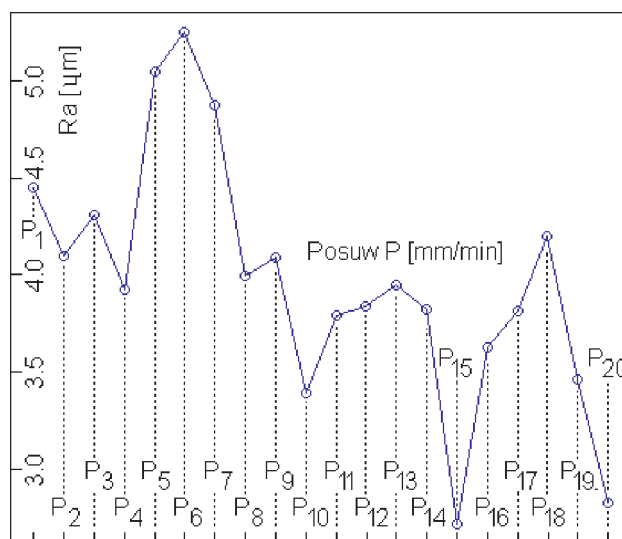
Analizując graficzny zapis wartości parametru chropowatości Ra zmierzonych na wysokości A (rys. 7) trudno jest wywnioskować, czy wartość tego parametru zależy od wartości posuwu czy też nie. W tym celu obliczono korelację metodą Pearson'a oraz dla potwierdzenia/zaprzeczenia metodą Spearman'a (Tab. 2). Wynik korelacji świadczy o istnieniu umiarkowanej zależności między badanymi

Tabela 1. Zestawienie pomiarów parametru Ra ciętej powierzchni na wysokości 3 mm (pomiar A) oraz 7,5 mm (pomiar B)

Posuw [mm/min]	Ra [µm]	
	Pomiar na wysokości A	Pomiar na wysokości B
P ₁ = 200	4,454	15,380
P ₂ = 600	4,100	15,453
P ₃ = 800	4,308	13,748
P ₄ = 1000	3,922	11,682
P ₅ = 1200	5,046	8,804
P ₆ = 1600	5,249	9,053
P ₇ = 1800	4,870	11,601
P ₈ = 2000	3,996	10,875
P ₉ = 2200	4,091	7,999
P ₁₀ = 2400	3,391	9,650
P ₁₁ = 2800	3,795	9,489
P ₁₂ = 3000	3,835	11,967
P ₁₃ = 3200	3,948	6,815
P ₁₄ = 3400	3,825	6,633
P ₁₅ = 3600	2,720	9,793
P ₁₆ = 3700	3,629	5,301
P ₁₇ = 3800	3,812	5,531
P ₁₈ = 4000	4,198	6,870
P ₁₉ = 4200	3,461	7,154
P ₂₀ = 4500	2,824	6,591

Tabela 2. Wartości korelacji między posuwem P, a parametrem Ra mierzonym na wysokości A obliczone w programie R metodą Pearson'a oraz Spearman'a

Pearson	Spearman
-0,637939	-0,6902256



Rys. 7. Graficzne przedstawienie wyników pomiarów parametru chropowatości Ra dla wysokości pomiaru A próbek wyciętych laserem dla poszczególnych wartości posuwu lasera [mm/min]: P₁=200, P₂=600, P₃=800, P₄=1000, P₅=1200, P₆=1600, P₇=1800, P₈=2000, P₉=2200, P₁₀=2400, P₁₁=2800, P₁₂=3000, P₁₃=3200, P₁₄=3400, P₁₅=3600, P₁₆=3700, P₁₇=3800, P₁₈=4000, P₁₉=4200, P₂₀=4500

zmiennymi. Zależność ta również jest ujemna, tzn. zwiększeniu wartości posuwu odpowiada zmniejszenie wartości parametru R_a . W celu dokładniejszego określenia tej zależności zbudowano model liniowy regresji prostej dla w/w zmiennych w formie równania:

$$Ra = -0,0003109P + 4,751$$

W podobny sposób postąpiono z wartościami parametru R_a zmierzonymi na wysokości B (w połowie grubości blachy). Analizując zapis na rys. 8 można zauważyć wyraźną tendencję do zmniejszania się tego parametru w przypadku zwiększania wartości posuwu. Określono więc wartość korelacji między w/w zmiennymi metodą Pearson'a oraz Spearman'a (Tabela 3). Stwierdzono, że korelacja tym razem jest mocniejsza (bliższa wartości jeden lub minus jeden).

Tabela 3. Wartości korelacji między posuwem, a parametrem R_a mierzonym na wysokości B obliczone w programie R metodą Pearson'a oraz Spearman'a

Pearson	Spearman
-0,8231988	-0,7849624

Uzyskana wartość korelacji świadczy o istnieniu silnej zależności (nawet funkcyjnej) między badanymi zmiennymi. Zależność ta jest ujemna, tzn. zwiększeniu wartości posuwu odpowiada zmniejszenie wartości parametru R_a . W celu dokładniejszego określenia tej zależności zbudowano model liniowy regresji prostej dla w/w zmiennych w następującej formie:

$$Ra = -0,001926 P + 14,334996$$

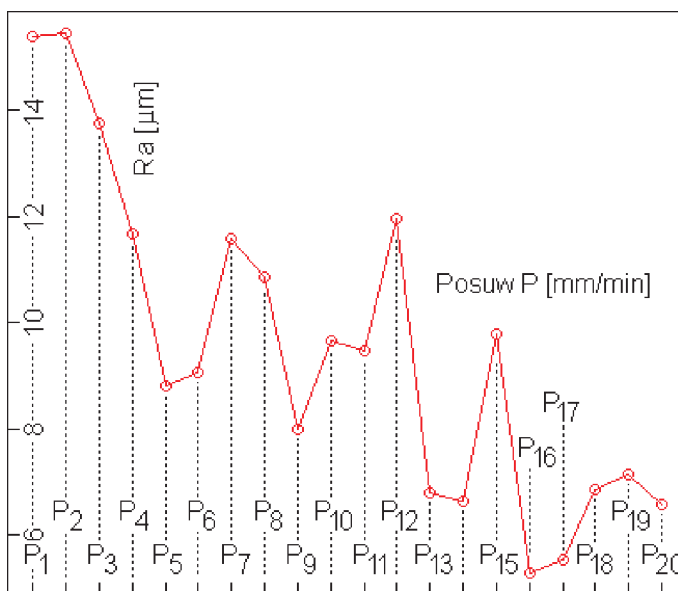
Na rys. 9 przedstawiono widok powierzchni przecięcia próbek dla poszczególnych wartości posuwu ich cięcia. Widoczne jest znaczne zmniejszenie wielkości sopli stopionego materiału gdy zwiększany jest posuw ciecia.

Dla posuwu P_{18} , P_{19} oraz P_{20} laser głównie tnie materiał, a tylko nieznacznie nagrzewa jego krawędzie, natomiast dla posuwu P_{11} , P_{12} , P_{13} laser dodatkowo roztopia sąsiednie krawędzie materiału, co jest niepożądane, a wynika to z tego, że jego wiązka zbyt wolno się przemieszcza. Laser już przeciął materiał, jednak się nie przemieścił i dalej emituje ciepło.

PODSUMOWANIE

Cięcie laserowe stanowi obecnie jedną z najpowszechniejszych technologii cięcia termicznego dla dużego wachlarza materiałów stosowanych w przemyśle. Wykorzystanie skoncentrowanej wiązki laserowej umożliwia precyzyjne i powtarzalne wykonywanie elementów w produkcji seryjnej. W produkcji jednostkowej, gdzie każdy element może wymagać indywidualnego podejścia, cięcie laserowe oferuje elastyczność i szybkość adaptacji do zmieniających się wymagań projektowych. Dla uzyskania większej dokładności powierzchni materiału obrabianego metodą cięcia laserowego należy dobrać odpowiednie parametry

technologiczne. Wartość posuwu jest tu istotnym parametrem i wpływa znacząco na jakość obrabianej powierzchni. Można zauważyć, że zwiększenie wartości posuwu z 200 mm/min do 4500 mm/min zmniejszyło wartość parametru R_a z 4,454 μm do 2,824 μm (to jest 1,57 razy) dla pomiaru na wysokości A, oraz z 15,38 μm na 6,591 μm , czyli zmniejszenie o 2,3 razy. Powolne przesuwanie lasera powoduje nadmierne nadtapianie bocznych powierzchni materiału, co negatywnie wpływa na chropowatość ciętej

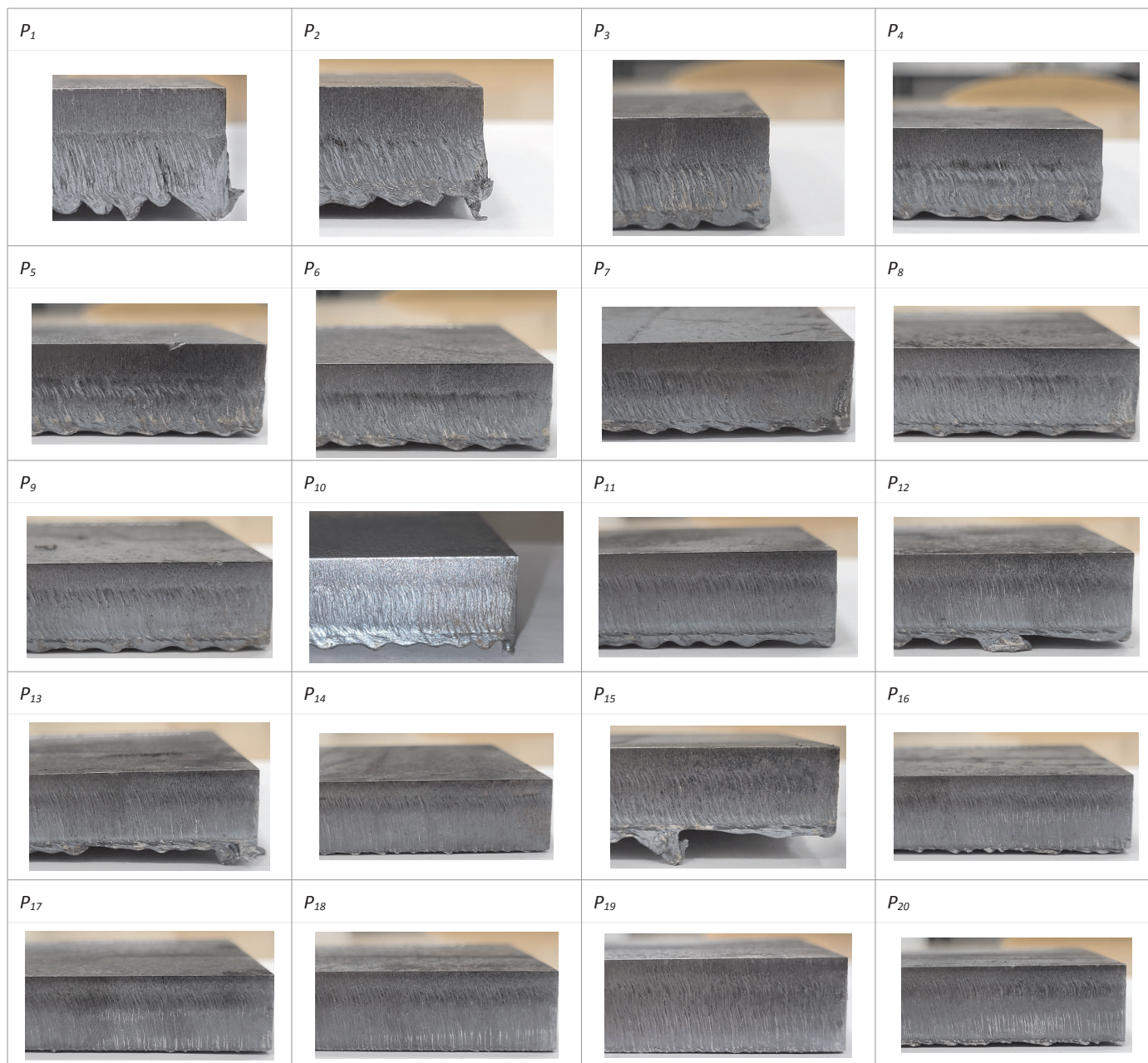


Rys. 8. Graficzne przedstawienie wyników pomiarów parametru chropowatości R_a dla wysokości pomiaru B próbek wyciętych laserem dla poszczególnych wartości posuwu lasera [mm/min]: $P_1=200$, $P_2=600$, $P_3=800$, $P_4=1000$, $P_5=1200$, $P_6=1600$, $P_7=1800$, $P_8=2000$, $P_9=2200$, $P_{10}=2400$, $P_{11}=2800$, $P_{12}=3000$, $P_{13}=3200$, $P_{14}=3400$, $P_{15}=3600$, $P_{16}=3700$, $P_{17}=3800$, $P_{18}=4000$, $P_{19}=4200$, $P_{20}=4500$

powierzchni. Ponadto można zauważyć znaczny rozrzut chropowatości powierzchni w zależności od głębokości pomiaru, nawet ponad 3-krotną różnicę dla pomiarów na wysokości A oraz B. Spowodowane jest to tym, że trudniej jest usunąć materiał głębiej położony, tym bardziej, że średnica lasera jest bardzo mała. Krawędzie wykonanych próbek dla dużych wartości posuwu są ostre i element właściwie nie wymaga dodatkowych zabiegów technologicznych, jak np. usunięcia zastygłych sopli metalu, obradowania krawędzi itp. Z uwagi na to, że laser szybko się przemieszcza, nie nadtapia więc sąsiednich powierzchni i tylko w minimalnym stopniu ingeruje w ich strukturę. Dobór odpowiedniej wartości posuwu lasera jest więc bardzo istotnym parametrem technologicznym i zależy m.in. od grubości ciętych blach oraz od rodzaju ciętego gatunku materiału.

LITERATURA

1. Biecek P.: *Analiza danych z programem R. Modele liniowe z efektami stałymi, losowymi i mieszanymi*. Wydawnictwa Naukowe PWN, Warszawa 2013.
2. Biecek P.: *Przewodnik po pakiecie R*. Oficyna Wydawnicza GIS, Wrocław 2017.



Rys. 9. Powierzchnie przecięcia próbek, kolejno dla posuwów P_1 do P_{20}

3. Busza P., Podolska A., Bonek M.: *Przegląd aplikacji lasera w inżynierii materiałowej*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, PSKN, Zeszyt Nr 31/2014, Gliwice 2014.
4. Crawley M.: *The R Book*. Wiley-Blackwell 2012.
5. Dobrzański L.: *Metaloznawstwo i obróbka cieplna*. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne. Warszawa 1986.
6. Dokumentacja Techniczno-Ruchowa wycinarki laserowej By Star, Fiber 6225 prod. Bystronic Laser AG, 2020.
7. Dmochowski J.: *Podstawy skrawania*. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1973.
8. Dubik A.: *Zastosowanie laserów. Fizyka dla przemysłu*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1991.
9. Dul-Korzyńska B.: *Obróbka skrawaniem i narzędzia*. Wydawnictwo Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2009.
10. Gągolewski M.: *Programowanie w języku R. Analiza danych, obliczenia, symulacje*. Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa 2016.
11. Gillespie C., Lovelace R.: *Wydajne programowanie w R. Praktyczny przewodnik po lepszym programowaniu*. APN Promise, Warszawa 2018.
12. Górski E.: *Obróbka skrawaniem*. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1972.
13. Latoś H.: *Elastyczność geometryczno-kinematyczna narzędzi skrawających*. Wydawnictwo Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej im. J. i J. Śniadeckich w Bydgoszczy, Bydgoszcz 1997. ■