

Agnieszka Skoczylas ¹⁾

ANALIZA PORÓWNAWCZA PROCESU CIĘCIA WIĄZKĄ LASEROWĄ I STRUMIENIEM WODNO- ŚCIERNYM

Streszczenie: W artykule przedstawiono porównanie procesu cięcia wiązką laserową oraz strumieniem wodno- ściernym w ujęciu technicznym i ekonomicznym. Zaprezentowano także algorytm do wyznaczenia kosztu cięcia przedmiotu o długości jednego metra.

Słowa kluczowe: cięcie laserem, cięcie strumieniem wodno- ściernym, analiza techniczno-ekonomiczna.

WSTĘP

Cięcie metali jest operacją technologiczną, od której zaczyna się najczęściej cały proces wytwarzania elementów maszyn. Wybór metody cięcia zależy od wymagań stawianych przez konstruktora danego elementu oraz od możliwości technicznych, tj. rodzaju i grubości ciętego materiału, wymaganej jakości cięcia (dokładności kształtu, szerokość strefy wpływu ciepła (SWC)), tolerancji wymiarowych, odchyłki prostopadłości, oraz od kształtu wycinanego elementu. Do czynników, od których zależy wybór metody cięcia można zaliczyć również: koszty inwestycji, koszty eksploatacji, efektywność procesu i stopień wykorzystania urządzenia [1, 4].

Obecnie istnieje wiele metod cięcia, poza cięciem mechanicznym stosowanych w technice, są to: cięcie wiązką laserową oraz strumieniem wodno- ściernym.

Cięcie wiązką laserową jest technologią stosowaną w wielu dziedzinach przemysłu, na przykład samochodowym, lotniczym, maszynowym. Do zalet cięcia laserowego można zaliczyć: łatwość automatyzacji procesu i jego dużą elastyczność, szeroki zakres materiałów poddających się procesowi cięcia (od bardzo miękkich i kruchych do supertwardych), duża szybkość procesu, wąska szczelina cięcia, i strefa wpływu ciepła, możliwość otrzymania półwyrobu na wymiar oraz bezkontaktowość procesu co skutkuje brakiem zużycia narzędzia [1, 2, 3, 5].

Cięcie strumieniem wodno- ściernym jest technologią rozwijającą się w sposób bardzo dynamiczny. Przewagą tej technologii nad innymi jest możliwość cięcia niemal wszystkich materiałów, np. materiały izolacyjne, metal, szkło, karton. Technologia ta stosowana jest do cięcia tych elementów, których wykonanie innymi technologiami jest trudne, kosztowne lub niemożliwe. Do zalet tej techno-

¹ Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska.

logii należy zaliczyć: uzyskanie wysokiej jakości powierzchni cięcia, brak zmian strukturalnych materiału przy krawędziach (brak SWC), brak odkształceń cieplnych, wysoką czystość powierzchni. Metoda ta jest szczególnie opłacalna dla małych i średnich serii wyrobów [1, 5, 6].

Poza aspektem technicznym, który ma istotny wpływ przy wyborze technologii cięcia bardzo ważnym czynnikiem są koszty. Aby zapoznać się z konkurencyjnością danej metody, istotne jest zapoznanie się z kosztem cięcia przedmiot o długości jednego metra. Dlatego też, w niniejszej pracy przedstawiono koszt cięcia wiązką laserową i strugą wodno-ścierną, w celu ukazania opłacalności ich zastosowania. Kompleksowa analiza aspektów technicznych i ekonomicznych zastosowania technologii cięcia wiązką laserową i strumieniem wodno-ściernym pozwala na uniknięcie nie trafionych decyzji, co do wyboru metody cięcia i związanych z nim strat.

ANALIZA EKONOMICZNA

Analiza ekonomiczna procesu cięcia została przeprowadzona dla stali kwasoodpornej XCrNi18-10 (wcześniejsze oznaczenie OH18N9) o grubości $g=5\text{mm}$. Koszt cięcia przedmiotu o długości jednego metra wyznaczono dla wycinarki laserowej firmy Bystronic, Bystar 4025 o mocy lasera 4000W i wymiarach stołu 2000x4000mm oraz dla urządzenia Waterjet Masching Center 3020 (WCM-3020) firmy Flow o wymiarach stołu 4000x2000mm. Urządzenie to pozwala na cięcie strugą wodną jak i wodno-ścierną.

Przeprowadzając analizę ekonomiczną procesu cięcia strugą wodno-ścierną oraz wiązką laserową pominięto koszt wynagrodzenia pracownika obsługującego dane urządzenie.

W celu wyznaczenia kosztu przecinania przedmiotu o długości jednego metra zostały uwzględnione czynniki stałe oraz zmienne, są to dane dotyczące wycinarki laserowej Bystar 4025 oraz urządzenia WCM - 3020 (tabela 1, tabela 2) oraz koszty jednostkowe (tabela 3) dla każdej z metod cięcia.

W celu uproszczenia posługiwania się czynnikami i kosztami jednostkowymi, niezbędnymi do przeprowadzenia analizy ekonomicznej wprowadzono skrótowe oznaczenie dla poszczególnych składowych.

Tabela 1. Czynniki stałe proces cięcia wiązką laserowa i strumieniem wodno-ściernym
Table 1. Solid factors of laser cutting and water jet cutting

Czynnik stały	Oznaczenie	Jednostka	Bystar 4025	WCM -3020
Koszt zakupu	K_z	PLN	1 815 432	1 018 240,92
Okres amortyzacji	O_A	lata		5
Zajmowana powierzchnia	F	m^2	230	300
Wysokość kredytu (50% wartości maszyny)	W_K	PLN	907 716	509 120,46
Oprocentowanie kredytu	O_K	%		10,11
Zakładana ilość godzin pracy	L	h/rok		3500

Tabela 2. Czynniki zmienne procesu cięcia wiązką laserową i strumieniem wodno- ściernym

Table 2. Variable factors of laser cutting and water jet cutting

Czynnik	Oznaczenie	Jednostka	Wartość
CIĘCIE WIĄZKĄ LAŚOWĄ			
Wskaźnik efektywności pracy*	T_L	%	80
Zużycie sprężonego powietrza	Z_G	Nm^3/h^{**}	45
Zużycie energii elektrycznej	E_Z	kW	49
Zużycie gazu tnącego	G_Z	Nm^3/h^{**}	32
Prędkość cięcia	v	m/h	150
CIĘCIE STRUMIENIEM WODNO- ŚCIERNYM			
Ciśnienie pompy	p	MPa	350
Zużycie ścierniwa	Z_S	kg/min	0,69
Moc maszyny	N	kW	42
Zużycie wody	Z_W	l/min	3,8
Wskaźnik efektywności pracy*	Q	%	80
Prędkość cięcia	v	m/h	39,96
Współczynnik empiryczny ***	B	-	0,912

*czas efektywnej pracy (czas pracy/ czas włączenia maszyny)

** Nm^3 - normalny metr sześcienny (jednostka rozliczeniowa, oznaczając ilość suchego gazu zawartą w objętości $1m^3$ przy ciśnieniu 101,325kPa i temperaturze $0^{\circ}C$)

*** współczynnik wyznaczony doświadczalnie uwzględniający zależność prędkości cięcia od grubości

Tabela 3. Koszty jednostkowe procesu cięcia wiązką laserową oraz strugą wodno- ścierną

Table 3. Elementary costs of laser cutting and water jet cutting

Koszty jednostkowe	Oznaczenie	Jednostka	Bystar 4025	WCM -3020
Podatek od nieruchomości	P_{NI}	PLN/ m^2 /rok	15,68	
Podatek gruntowy i wieczyste użytkowanie	P_{GI}	PLN/ m^2 /rok	1,68	
Koszt jednostkowy energii elektrycznej	K_{EJ}	PLN/kWh	0,25	
Koszt gazu tnącego O_2	K_{GJ}	PLN/ Nm^3 *	1,00	-
Koszt gazu tnącego N_2	K_{GJ}	PLN/ Nm^3 *	0,65	-
Koszty gazów laserowych	K_{GL}	PLN/h	1,10	-
Koszt sprężonego powietrza	K_{SJ}	PLN/ Nm^3 *	0,10	-
Koszt dzierżawy zbiornika O_2	K_{O2M}	PLN/miesiąc	800	-
Koszt dzierżawy zbiornika N_2	K_{N2M}	PLN/miesiąc	1760	-
Koszt części zamiennych i szybko zużywających	K_{CZ}	PLN/h	21,62	-
Koszt ścierniwa	K_{SJ}	PLN/kg	-	16,52
Koszt wody	K_{WJ}	PLN/h	-	8,17
Koszt ścieków	K_{SC}	PLN/h	-	0,15
Koszty narzędzi wymiennych + uszczelnienia + przegląd	K_{NUP}	PLN/h	-	11,66

* Nm^3 - normalny metr sześcienny (jednostka rozliczeniowa, oznaczając ilość suchego gazu zawartą w objętości $1m^3$ przy ciśnieniu 101,325kPa i temperaturze $0^{\circ}C$)

Na rachunek ekonomiczny kosztu cięcia przedmiotu o długości jednego metra składają się koszty stałe (niezależne od grubości ciętego materiału) i koszty zmienne (zależne od grubości ciętego materiału).

Do kosztów stałych należy zaliczyć:

$$\text{- odpis amortyzacyjny: } A = \frac{K_Z}{O_A \times L} \quad (1)$$

$$\text{- odsetki: } O = \frac{W_K \times O_K}{100 \times L} \quad (2)$$

$$\text{- podatek od nieruchomości: } P_N = \frac{F \times P_{N1}}{L} \quad (3)$$

$$\text{- podatek gruntowy: } P_G = \frac{F \times P_{G1}}{L} \quad (4)$$

$$\text{- koszt dzierżawy zbiornika O}_2 \text{ (laser): } K_{O_2} = \frac{K_{O_2M} \times 12}{L} \quad (5)$$

$$\text{- koszt dzierżawy zbiornika N}_2 \text{ (laser): } K_{N_2} = \frac{K_{N_2M} \times 12}{L} \quad (6)$$

Koszty zmienne to:

$$\text{- koszt energii elektrycznej maszyny (laser): } K_E = \frac{E_Z \times K_{EJ} \times T_L}{100} \quad (7)$$

$$\text{- koszt gazów tnących (laser): } K_G = \frac{G_Z \times K_{GJ} \times T_L}{100} \quad (8)$$

- koszt gazów laserowych (laser),

$$\text{- koszt sprężonego powietrza (laser) } K_S = Z_G \times K_{SJ} \quad (9)$$

- koszt części zamiennych szybko zużywających (laser),

$$\text{- koszt utrzymania maszyny (laser i AWJM): } K_{UM} = \frac{2\% \times K_Z}{L} \quad (10)$$

W przypadku technologii cięcia strumieniem wodno- ściernym należy uwzględnić:

$$\text{- koszt energii elektrycznej pompy: } K_P = B \times P \times K_{EJ} \quad (11)$$

$$\text{- koszt energii elektrycznej maszyny: } K_{EM} = \frac{N \times Q \times K_{EJ}}{100} \quad (12)$$

- koszt ścierniwa: $K_{\dot{S}} = Z_{\dot{S}} \times K_{\dot{S}J}$

$$\text{- koszt wody: } K_W = Z_W \times K_{WJ} \quad (13)$$

- koszt ścieków

$$\text{- koszt narzędzi wymiennych, uszczelnienia i przeglądu} \quad (14)$$

Przedstawione powyżej zależności pozwoliły na wyznaczenie kosztów które stanowiły podstawę do rachunku ekonomicznego pracy wycinarki laserowej Bystar 4025 i urządzenia WCM-3020. W tabeli 4 przedstawiono koszty stałe dla wycinarki laserowej i urządzenia do cięcia strugą, a w tabeli 5 koszty zmienne.

Tabela 4. Koszty stałe (PLN) cięcia stali XCrNi18-10 laserem i strumieniem wodno-ściernym

Table 4. Solid costs of laser cutting and water jet cutting XCrNi18-10 steel

KOSZT	Bystar 4025 [PLN/h]	WCM-3020 [PLN/h]
Odpis amortyzacyjny	103,74	58,19h
Odsetki	26,22	14,71
Podatek nieruchomości	1,03	1,34
Podatek gruntowy	0,11	0,15
Dzierżawa zbiornika O ₂	2,74	-
Dzierżawa zbiornika N ₂	6,03	-
RAZEM	139,87	74,39

Tabela 5. Koszty zmienne (PLN) cięcia stali XCrNi18-10 laserem i strumieniem wodno-ściernym

Table 5. Variable costs of laser cutting and water jet cutting XCrNi18-10 steel

KOSZT	Bystar 4025 [PLN/h]	WCM-3020 [PLN/h]
Koszt energii elektrycznej maszyny	9,80	8,40
Koszt gazów tnących	25,60	-
Koszt gazów laserowych	1,10	-
Koszt sprężonego powietrza	4,50	-
Koszt części zamiennych szybko zużywających	21,62	-
Koszt utrzymania maszyny	10,14	5,82
Koszt energii elektrycznej pompy	-	79,80
Koszt ścierniwa	-	11,40
Koszt wody	-	31,05
Koszt ścieków	-	0,15
Koszty narzędzi wymiennych + uszczelnienia + przegląd	-	11,66
RAZEM	72,76	148,28

Suma kosztów stałych i zmiennych stanowi koszt maszynogodziny netto cięcia blachy XCrNi18-10 o grubości 5 mm (tabela 6).

Tabela 6. Koszt maszynogodziny cięcia laserem i strumieniem wodno-ściernym stali XCrNi18-10

Table 6. Machine- hour cost of laser cutting and water jet cutting XCrNi18-10 steel

Koszt maszynogodziny [PLN/h]	Bystra 4025	WCM - 3020
	212,63	222,67

Jest to etap pośredni do wyznaczenia rzeczywistego kosztu cięcia przedmiotu o długości jednego metra. Kolejnym krokiem było wyznaczenie czasu cięcia próbki o grubości 5 mm z zależności:

$$t = \frac{S}{v} \quad (15)$$

gdzie:

v- prędkość cięcia [m/h]

s- długość cięcia = 1 m

a następnie:

$$K = K_M \times t \quad (16)$$

gdzie:

K - koszt cięcia długości s [PLN]

K_M - koszt maszynogodziny netto [PLN/h]

t - czas cięcia [h]

Uwzględniając powyższe zależności (15) i (16) obliczono koszt cięcia przedmiotu o długości jednego metra o grubości 5 mm, wykonanego z XCrNi18-10 (tabela 7).

Tabela 7. Koszt cięcia przedmiotu o długości jednego metra

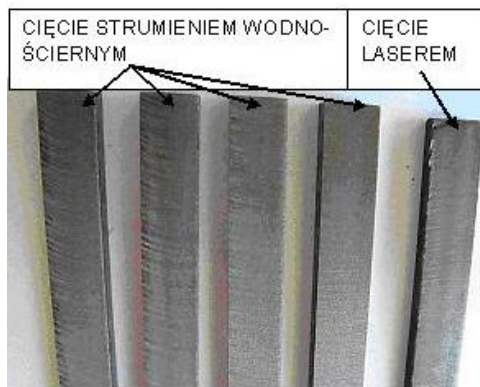
Table 7. Cutting cost object at length 1 meter

Koszt cięcia [PLN]	Bystar 4025	WCM-3020
	1,42	5,57

ANALIZA TECHNICZNA

Analiza technologii cięcia laserem i strumieniem wodno- ściernym w ujęciu technicznym sprowadza się przede wszystkim do porównania uzyskanych wyników w obróbce obiema metodami.

Na rys. 1 przedstawiono widok powierzchni stali C45 po przecinaniu wiązką laserową oraz strumieniem wodno- ściernym, przy zastosowaniu różnych prędkości cięcia.



Rys. 1. Widok powierzchni stali C45 po cięciu laserem (jedna prędkość cięcia) i strumieniem wodno- ściernym (różnych prędkości cięcia)

Fig. 1. Surface of C45 steel after laser cutting (one cutting speed) and water jet cutting (different cutting speed)

Rozpatrując otrzymaną jakość powierzchni stali C45 po cięciu wiązką laserową, widoczna jest na powierzchni charakterystyczna prążkowana struktura oraz przy krawędzi dolnej metaliczny grant, jako pozostałość płynnego materiału, nie do końca wydmuchanego ze szczeliny cięcia. Jakość otrzymanej powierzchni jest niska, co jest przesłanką do poddania ich obróbce wykończeniowej.

Jakość powierzchni po cięciu strumieniem wodno-ściernym jest zadawalająca. Dla odpowiednio dobranej prędkości cięcia można otrzymać powierzchnie gładką, pozbawioną prążków przy dolnej krawędzi. Zbyt duża prędkość cięcia przyczynia się do powstania prążkowanej struktury oraz powoduje ukosowanie próbek. Przedmioty cięte za pomocą strumienia wodno-ściernego nie posiadają strefy wpływu ciepła, nie tworzą się także niedopuszczalne przetopy.

PODSUMOWANIE

Rozpatrując oba analizowane sposoby cięcia pod względem ekonomicznym i technicznym trudno jednoznacznie wskazać, która z tych technologii jest efektywniejsza. Pod względem ekonomicznym bardziej konkurencyjne jest cięcie laserem.

Koszt cięcia przedmiotu o długości jednego metra jest o około 3,5 razy mniejszy niż dla cięcia strumieniem wodno-ściernym, pomimo wysokich nakładów inwestycyjnych przy zakupie wycinarki laserowej.

Koszt maszynogodziny netto dla cięcia laserem i strumieniem wodno-ściernym jest porównywalny.

Cięcie strumieniem wodno-ściernym jest technologią bardziej elastyczną. Pozwala to na cięcie prawie wszystkich rodzajów materiałów o różnej grubości. Istnieje także możliwość obróbki w pakietach.

Po przeprowadzonej analizie można zauważyć że, technologia cięcia laserem i strumieniem wodno-ściernym są w niektórych aspektach podobne i bardzo dobrze się uzupełniają.

PIŚMIENNICTWO

1. Górka J., Krysta M.: Jakość cięcia stali obrobionej termomechanicznie plazmą powietrzną, laserem i strumieniem wody, Przegląd Spawalnictwa 2007, 8, 102-106.
2. Feldshtein E., Koman I.: Wycinanie laserowe elementów o dużej grubości w blachach ze stali nierdzewnej, Przegląd Mechaniczny 2010, 4, s.13-18.
3. Okseniuk A.: Analiza techniczno- ekonomiczna procesu przecinania za pomocą lasera oraz wysokociśnieniowego strumienia cieczy, praca dyplomowa inżynierska, promotor dr hab. inż. K. Zaleski, prof. PL, Politechnika Lubelska 2006.
4. Zaborski S., Szpunar P., Poroś P.: Efektywność cięcia laserowego blach niestopowych, Inżynieria Maszyn 2009, 4, s. 94-102.

5. Zheng H. Y., Han Z. Z., Chen Z. D., Chen W.L., Yeo S.: Quality and Cost Comparisons between Laser and Waterjet Cutting, journal of Material Processing Technology 1996, 62, 294-298.
6. Cięcie laserem czy strumieniem wody? (artykuł promocyjny), Mechanik 2003, 3, 146-147.

THE COMPARATIVE ANALYSIS OF THE PROCESS OF THE LASER CUTTING AND WATER JET CUTTING

Summary:

The article presents the comparison of laser beam machining and water jet cutting in technical and economic picture. It was also presented the algorithm determining the cost of cutting object at length 1 meter.

Keywords: laser cutting, water jet cutting, technical-economical analysis.