

Marek KOWALIK¹
Tomasz TRZEPIECIŃSKI²

TECHNIKI WYSOKOENERGETYCZNE CIĘCIA – STAN OBECNY I KIERUNKI ROZWOJU

W artykule przedstawiono zachodzące zmiany w obrabiarkach wykorzystywanych w technologii cięcia oraz ich oprzyrządowaniu. Omówiono trendy rozwojowe w budowie maszyn do cięcia blach z uwzględnieniem laserowych i plazmowych wycinarek sterowanych numerycznie. Wskazano trendy doskonalenia głowic do cięcia plazmowego m.in. w kierunku możliwości wycinania złożonych profili bez przerywania obróbki oraz automatycznej kompensacji odchylenie rzeczywistego kąta uzyskanego w ciętym materiale od kąta zadanego. Omówiono sposoby zwiększenia szybkości oraz jakości cięcia wychodzące naprzeciw rosnącym oczekiwaniom klientów. Przedstawiono również tendencje w zakresie zwiększania produktywności przez wprowadzanie nowych technologii oraz modernizację obecnie stosowanych.

HIGH-ENERGY CUTTING TECHNIQUES – CURRENT STATUS AND DEVELOPMENT TRENDS

The article presents the changes in machines used in cutting technology and their instrumentation. The development trends in the construction of machines for sheet metal cutting with regard to laser and plasma cutting CNC machines are discussed. Trends of improvement for plasma cutting heads include towards the possibility of cutting complex profiles without process interrupt and automatic compensation of the deviation of actual angle obtained in the cut material from the specified angle are indicated. The ways to improve the speed and quality of cut that meet the growing expectations of customers are discussed. The tendencies in increasing productivity by introducing new technologies and the modernization of currently used is also presented.

1. WSTĘP

Postęp w komputeryzacji systemów sterowania sprzyja doskonaleniu konstrukcji maszyn, w celu ograniczenia lub wyeliminowania ich negatywnego wpływu na zdrowie człowieka oraz środowisko naturalne. Dążenia do poprawy funkcjonalności obrabiarek i wydłużenia okresu bezawaryjnej pracy to najważniejsze kierunki rozwoju maszyn wynikające m.in. z dyrektyw bezpieczeństwa Unii Europejskiej [1]. Pobierając mniej energii, emitując mniej hałasu oraz wydzielając mniej ciepła współczesne obrabiarki stają się bardziej przyjazne dla środowiska naturalnego. Analiza poziomu hałasu przez systemy nadzoru obrabiarek umożliwia kontrolę przebiegu procesu obróbki i zapobiega awariom maszyn. Doskonalenie konstrukcji maszyn w aspekcie ochrony środowiska naturalnego związane jest także z ograniczeniem masy maszyn przez wprowadzanie innowacji konstrukcyjnych lub nowych materiałów [2, 3].

Wprowadzenie na rynek nowych rozwiązań konstrukcyjnych obrabiarek jest poprzedzone analizą rosnących oczekiwań związanych z dokładnością obróbki, szybkości obróbki, wywieranych sił oraz sztywności statycznej i dynamicznej [4]. Do najważniejszych tendencji w rozwoju współczesnych obrabiarek należy zaliczyć doskonalenie ich konstrukcji celem zwiększenia ich wydajności oraz rozwój metod kompensacji błędów. Zwiększenie dokładności obrabiarek przy zastosowaniu metod kompensacji błędów wynosi od 35% do 90% [5]. Analizując rynek obrabiarek na przestrzeni ostatnich lat można zaobserwować, że producenci po wprowadzeniu wielu innowacyjnych rozwiązań skupili się na elastycznym dostosowywaniu swoich maszyn do potrzeb odbiorców [6].

2. CIĘCIE PLAZMOWE

2.1. Wady i zalety

Panikami plazmowymi, w których zajarzenie łuku odbywa się za pomocą impulsu prądu o wysokim napięciu lub prądem wysokiej częstotliwości (o łuku zależnym) możliwe jest cięcie materiałów przewodzących prąd elektryczny wykonanych ze stali węglowych i stopowych, aluminium i jego stopów, mosiądzu, miedzi oraz ze-

¹ Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny, Wydział Mechaniczny; 26-600 Radom; ul. Krasickiego 54. Tel: +48 48 361-76-18, e-mail: m.kowalik@uthrad.pl

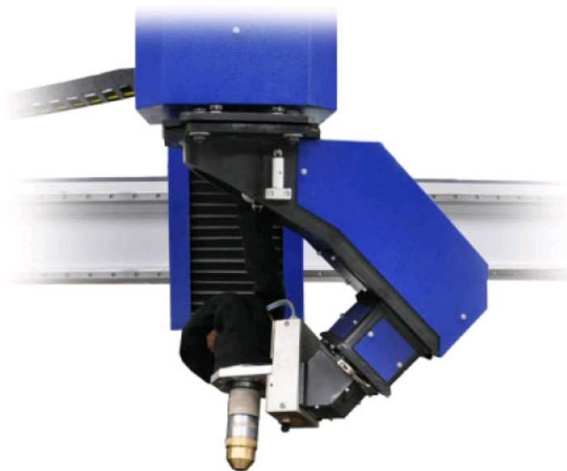
² Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa; 35-959 Rzeszów; al. Powstańców Warszawy 8, Tel: +48 17 865-17-14, e-mail: tomtrz@prz.edu.pl

liwa. Materiały niemetaliczne mogą być cięte jedynie palnikami plazmowymi o łuku niezależnym [7]. Mimo wielu zalet cięcia plazmowego takich jak m.in. wysoka prędkość cięcia (5÷7 krotnie większa niż podczas cięcia tlenowo-gazowego), wąska strefa wpływu ciepła, niewielka szczelina cięcia, pewny i powtarzalny zapłon łuku pilotującego niezależnie od pokrycia ciętych materiałów warstwą rdzy lub lakieru, możliwość cięcia cienkich materiałów bez nadpalania, cięcie bez nagrzewania wstępnego, szeroki zakres grubości ciętych elementów i możliwość pełnej automatyzacji procesu cięcia posiada szereg wad m.in. generuje duży hałas i silne promieniowanie, występują zmiany w strefie wpływu cięcia, podczas cięcia wydziela się duża ilość gazów i dymów szkodliwych dla zdrowia oraz występują trudności w utrzymaniu prostopadłości krawędzi [8].

2.2. Głowice

Wydajność cięcia plazmowego jest zależna głównie od konstrukcji palnika. Palniki dużej mocy stosowane w maszynach sterowanych numerycznie wymagają chłodzenia wodnego, natomiast podczas cięcia ręcznego palnikami o natężeniu prądu łuku plazmowego do 100A wystarczające jest chłodzenie powietrzem. Aby zapewnić możliwie dużą trwałość głowicy w nowoczesnych konstrukcjach palników stosuje się układy samocentrujące dysze i elektrody.

Większość dotychczas stosowanych rozwiązań przecinarek CNC umożliwiała na cięcie blach oraz rur pod kątem prostym. W wielu przypadkach konieczne jest ukosowanie krawędzi elementów do późniejszego spawania. Opracowana, opatentowana przez firmę Eckert głowica Vortex 3D (rys. 1) z systemem RACT (ang. *Real Adjusted Cutting Trace*) jest jednym z najnowocześniejszych urządzeń na rynku. Napęd głowicy jest realizowany cyfrowo za pomocą sterowanych serwonapędów oraz precyzyjnych przekładni z dokładnością pozycjonowania 0,1 mm [9]. Aby spełnić szeroki zakres wymagań technologicznych, głowica umożliwia obrót $\pm 540^\circ$, który zapewnia wycinanie złożonych konturów bez przerywania obróbki. Głowica może być również płynnie odchylana w czasie obróbki do $\pm 47^\circ$ od płaszczyzny pionowej, pozwalając na bardzo precyzyjne ukosowanie i fazowanie blach podczas jednego procesu cięcia. Odchylenie rzeczywistego kąta uzyskanego w ciętym materiale od kąta zadanego jest automatycznie kompensowane przez dołączone oprogramowanie do projektowania trajektorii cięcia. Jak zapewnia producent główną zaletą tego systemu jest mechanicznie zapewniony stały punkt pracy palnika, w przeciwieństwie do innych rozwiązań technicznych na rynku, przy których punkt ten musi być stale kontrolowany i korygowany przez oprogramowanie [9].



Rys. 1. Głowica Vortex 3D firmy Eckert [9]

W trend doskonalenia głowic do cięcia plazmowego 3D wpisuje się 5-osiowa głowica Multi3D (rys. 2) firmy Stigal. Specjalnie zaprojektowany uchwyt umożliwia szybką wymianę narzędzi tnących, pozwalając na zamienne wykorzystywanie technologii plazmowej i tlenowej. Według producenta głowica Multi3D posiada największy na rynku zakres grubości cięcia i fazowania przekraczający 100 mm. Z kolei największa wartość wychylenia kąтового do 90° pozwala na pochylenie palnika do poziomu, a tym samym obróbkę pionowych ścian profili, kształtowników i elementów przestrzennych – również wielkogabarytowych [9]. Na wyjątkową uniwersalność głowicy wpływa brak ograniczenia obrotu, będącego słabym punktem konwencjonalnych głowic 3D, wbudowany układ antykolizyjny, dwa systemy regulacji wysokości, w tym innowacyjny system AHC (ang. *Axis Height Control*).

Głowica 3D do cięcia rur BKM 50-300/3000 i funkcją AUTO-Z firmy AEP-AJAN Engineering Polska umożliwia płynne odchylenie palnika plazmowego od kąta prostego podczas pracy przecinarki plazmowej z wykorzystaniem serwonapędów z przekładniami o bardzo małych tolerancjach luzu. Urządzenie jest sterowane

cyfrowo poprzez funkcję RTF (ang. *Real Time Follow*), która w czasie rzeczywistym kontroluje wszystkie parametry cięcia, m.in. ustawienia napięcia łuku plazmowego, ustawienia ciśnienia i przepływów gazów plazmowych [10].



Rys. 2. Głowica Multi3D firmy Stigal [9]

2.3. Wycinarki laserowe

Jedną z najpopularniejszych przecinarek sterowanych CNC na polskim rynku jest urządzenie przemysłowe Jantar 2 firmy Eckert charakteryzujące się dużą wydajnością i przeznaczeniem do precyzyjnego cięcia kształtowego palnikami gazowymi lub plazmowymi. Maszyna wyposażona jest w niezależny stół i dwustronne napędy wzdłużne. Bezluźną pracę urządzenia gwarantuje sprężynujący docisk koła zębatego do listwy zębatej. Model Szafir (rys. 3) jest przeznaczony do pracy w najcięższych warunkach w ruchu ciągłym o szerokim spektrum zastosowań: cięcie tlenowe, cięcie plazmowe, trasowanie plazmowe, wiercenie [9]. Automatyczna regulacja ciśnień gazów pozwala na przebijanie blach do grubości 150 mm bez potrzeby nawiercania otworów, zwiększając żywotność części szybko zużywających się. W celu zwiększenia sztywności urządzenia portal wykonano jako konstrukcję spawaną składającą się z dwóch połączonych ze sobą profili zamkniętych. Taka konstrukcja portalu pozwala na budowanie urządzeń o szerokości roboczej do 7000 mm oraz grubości cięcia do 300 mm. Stół urządzenia podzielony jest na segmenty, z których każdy składa się z konstrukcji nośnej z wmontowanymi na stałe kanałami wyciągowymi, rusztu, wanny na odpady, elementów pneumatycznych i elementów sterujących. Zastosowanie w stole odciągowym pneumatycznego sterowania umożliwia zamykanie i otwieranie poszczególnych segmentów tak, aby odciąganie dymów odbywało się tylko w segmencie roboczym gwarantując optymalną skuteczność odciągania zanieczyszczeń.



Rys. 3. Przecinarka plazmowa Szafir BL2 firmy Eckert [9]

Maszyny do cięcia plazmowego mogą być wyposażone w system EC-BM do wiercenia sterowany CNC, system trasowania plazmowego, system oznaczania detali zwany punktami pneumatycznymi oraz system ESR do obróbki rur, który umożliwia obróbkę konstrukcji przestrzennych lub profili. System ESR dostarczany przez firmę Eckert umożliwia cięcie rur o średnicach od 100 do 920 mm, z tym, że cięcie rur o śred-

nicy powyżej 620 mm wymaga specjalnego przygotowania podłoża lub specjalnego posadowienia maszyny. Przecinanie rur o średnicy do 2 m i grubości ścianek do 100 mm możliwe jest na stanowisku firmy Eckert z wykorzystaniem 6-osioowego robota FANUC z palnikiem sterowanym w promieniu 4 m. Za ruch obrotowy ciętej rury odpowiedzialny jest niezależny obrotnik, którego sterowanie pozwala uzyskać niemal dowolną krzywiznę cięcia.

Wychodząc naprzeciw rosnącym oczekiwaniom klientów dotyczących zwiększenia szybkości cięcia firma Stigal opracowała przecinarkę plazmową DYNAMIC Speed HQ (rys. 4). W porównaniu do innych obecnych na rynku przecinarek plazmowych DYNAMIC Speed HQ jest wydajniejsza nawet o 200% [9]. Jej prędkość przejazdu to 90 m/min, a prędkości cięcia niejednokrotnie przewyższają te uzyskiwane podczas cięcia laserowego.



Rys. 4. Przecinarka plazmowa DYNAMIC Speed HQ firmy Stigal [9]

Ponadto wraz ze wzrostem grubości różnica szybkości rośnie na korzyść maszyny DYNAMIC Speed HQ. Suport o zwiększonej dynamice i prędkości ruchu wzdłuż osi Z wynoszącej 330 mm/s gwarantuje trzykrotnie szybszą detekcję materiału względem przecinarek konwencjonalnych. Zastosowany stół materiałowy posiada sekcje sterowane elektronicznie. Wysoka prędkość przecinania sprawia, że czas wentylacji poszczególnych sekcji jest wydłużony mimo, że cięcie odbywa się już w innej części stołu. Przejazd jałowy odbywa się z prędkością 90 m/min, a przyspieszenie i zatrzymanie portalu zajmuje 0,16 sekundy [9]. Dalsze zwiększenie wydajności związane z oszczędnością czasu załadunku i rozładunku blachy można uzyskać przez wyposażenie maszyny w stół wymienny, jak ma to miejsce w przecinarkach laserowych.

Dążenie do wdrażania technologii proekologicznych obróbki sprawiło, że firma Mexpol wprowadziła na rynek maszyny ATBlu CNC z urządzeniem ssąco-filtrujące o skuteczności filtracji zanieczyszczeń około 99% [9]. System sterowania zapewnia odsysanie dymów i pyłów z miejsca cięcia, co znacznie podnosi sprawność układu oczyszczania. Wszystkie maszyny ATBlu CNC mają konstrukcję jezdnią typu portalowego, z możliwością wyposażenia w suport do wiercenia otworów i znakowania plazmowego. Po rozpoczęciu i zakończeniu procesu cięcia sterownik automatycznie włącza/wyłącza centralę filtracyjną. Eliminuje to tak często obserwowaną w innych rozwiązaniach konstrukcyjnych pracę jałową systemu wentylacyjnego [9].

Innowacyjnym rozwiązaniem jest także system m3 PlasmaTM firmy Esab z palnikiem oferującym szeroki zakres zastosowań: od znakowania prądem 12A do cięcia materiałów prądem o natężeniu 720A. System pozwala na konwencjonalne cięcie plazmowe, zastosowanie z robotami przemysłowymi, do cięcia rur oraz w pełni zautomatyzowanych procesach produkcyjnych [9]. Dopełnieniem systemu m3 PlasmaTM są dysze szybko tnące serii XR, które przy większej szybkości cięcia i w połączeniu z wyższą jakością i redukcją powstawania żużla umożliwiają znaczne zwiększenie wydajności i zmniejszenie kosztów eksploatacji [9].

3. WYCINARKI LASEROWE

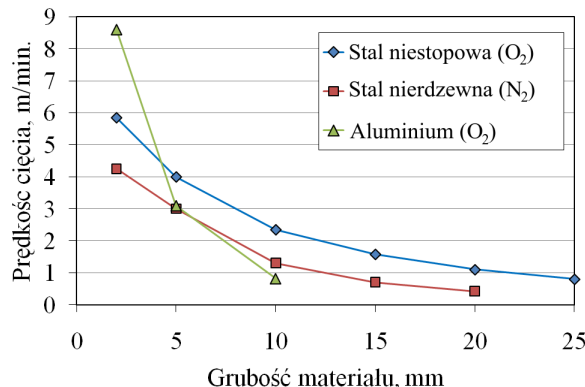
Laser jest używany do cięcia różnych materiałów metalicznych i niemetalicznych o grubości do 32mm. Stosowane są lasery stałe Nd:YAG (ang. Neodymium-Doped Yttrium Aluminum Garnet) o mocy do 20kW i gazowe CO₂ o mocy do 40kW. Nowością na rynku jest technologia *Fiber* pozwalająca na przesyłanie wiązki lasera Nd:YAG światłowodem, co rozszerza możliwości zastosowania przecinarek, znacznie redukuje koszty obsługi oraz ogranicza zużycie energii elektrycznej. W technologii *Fiber* elementem czynnym jest światłowód domieszkujejony jonami pierwiastków ziem rzadkich (np. iterb, neodym) pompowany półprzewodnikowymi diodami laserowymi. Długość uzyskanej fali lasera jest dziesięciokrotnie mniejsza niż lasera CO₂, co pozwala na uzyskanie wyższego skupienia energii i wyższej dokładności cięcia.

Spośród wielu zalet cięcia laserowego najważniejsze to [11, 12]:

- łatwość automatyzacji procesu i jego duża elastyczność,
- duża szybkość procesu cięcia,
- szeroki zakres materiałów poddających się procesowi cięcia,

- wąska szczelina cięcia,
- bezkontaktowość procesu.

Parametrem, który decyduje o wydajności oraz możliwości zastosowania metod cięcia laserem jest gatunek oraz grubość obrabianego materiału (rys. 5) [13]. Przy grubości obrabianego materiału równej 2 mm największa prędkość cięcia jest zapewniona dla aluminium i gwałtownie zmniejsza się ze wzrostem grubości materiału w zakresie 2-10 mm. W przypadku blach stalowych spadek prędkości cięcia jest proporcjonalny do wzrostu grubości obrabianego materiału.



Rys. 5. Typowe prędkości cięcia laserowego blach stalowych oraz blachy aluminiowej według badań firm Bystronic oraz Trumpf

Rozwój maszyn opartych na technologii lasera CO₂ ukierunkowany jest na pełną autonomiczność obróbki wykorzystując automatyczny system załadunku i rozładunku stołu roboczego oraz automatyczny moduł sortowania (rys. 6). Zastosowanie tych systemów nie ogranicza dostępu do stołu roboczego obrabiarki, a wyeliminowanie czynności wymagających udziału człowieka wpływa na wzrost wydajności i ekonomiczności obróbki.



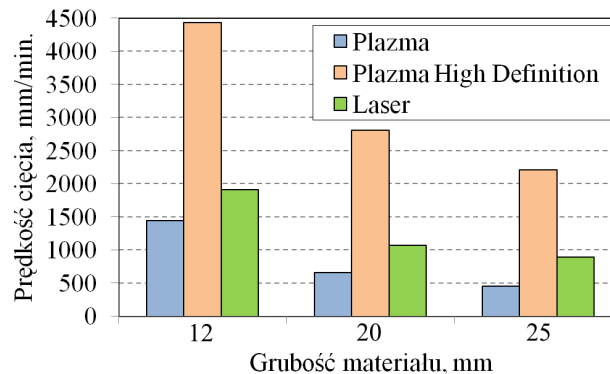
Rys. 6. Wycinarka laserowa z systemami automatycznego transportu oraz sortowania firmy Bystronic [9]

Technologia ATS (ang. *Automated Technology Selection*) w zastosowaniu z głowicą działającą w technologii RPP (ang. *Regulated Pulsed Piercing*) polegającej na regulowanym przebijaniu pulsacyjnym umożliwia szybsze i bardziej precyzyjne wpalanie w grubych materiałach, redukując czas przebicia do 30% w blachach o grubości powyżej 12mm [9]. Systemy automatycznej wymiany dysz oraz kaset soczewkowych są standardem dla wiodących producentów wycinarek. Nowa generacja wycinarek laserowych z rezonatorem CO₂ o przyspieszeniu do 3g wyposażona jest w tryb uśpienia oszczędzający pobór energii. Kontrola, utrzymanie pras w trybie gotowości do pracy oraz sterowanie wycinarek przez człowieka jest ograniczone do minimum. Zwiększenie posuwu roboczego oraz ustawczego przy zachowaniu wysokiej dokładności obróbki i pozycjonowania jest widocznym trendem wśród światowych wytwórców wycinarek laserowych. Zastosowany w wycinarce Diament Laser przez firmę Eckert laser światłowodowy firmy IPG Photonics posiada ponad 30% sprawność (ang. *Wall-plug efficiency*), co umożliwia 3-krotne zmniejszenie poboru energii w porównaniu do laserów CO₂.

Liczne cechy przyczyniły się do powodzenia laserów w przemyśle, spośród których najistotniejsze to [14]:

- powtarzalność ustawień lasera, co przekłada się na wysoką dokładność finalnych elementów,
- podatność na automatyzację,
- umiarkowany hałas, umiarkowane ilości czynników szkodliwych dla człowieka (pyłów, promieniowania przenikliwego, ryzyka porażenia prądem elektrycznym),
- trwałość narzędzia oraz przewidywalność eksploatacyjna,
- uniwersalność zastosowań: cięcie, spawanie, spiekanie, obróbka cieplna,
- niskie straty materiałowe podczas cięcia.

Cięcie przy zastosowaniu plazmy *High Definition* odbywa się w osłonie gazów wirujących, które skupiają łuk plazmowy i dzięki temu krawędzie ciętego detalu są mniej zokosowane. Ponadto, w technice *High Definition* wykorzystuje się chłodzenie cieczą zwiększając żywotność głowicy. Cięcie strumieniem plazmy *High Definition* zapewnia największą prędkość cięcia dla szerokiego zakresu grubości ciętego materiału (rys. 7).



Rys. 7. Porównanie prędkości cięcia konwencjonalnym strumieniem plazmy, strumieniem plazmy *High Definition* oraz cięcia laserowego

Konwencjonalne cięcie plazmowe, gdzie źródłem plazmy jest jeden gaz (zwykle tlen lub azot) dla wszystkich analizowanych grubości materiałów ustępuje szybkością cięcia technice laserowej. Prędkość cięcia plazmowego *High Definition* jest ponad dwukrotnie większa od cięcia laserowego. Cięcie plazmą jest najbardziej uniwersalną techniką zapewniającą wysoką dokładność cięcia dla szerokiego zakresu grubości materiału oraz tolerancji wykonania (tab. 1).

Tab. 1. Możliwości zastosowania wybranych metod cięcia podczas obróbki stali niestopowej, na podstawie [15]

Grubość materiału, mm	Tolerancja, mm	Technika cięcia*		
		Tlen	Laser	Plazma
< 5	± 0,5	+	++	+++
< 5	± 0,1	nie	+++	++
5 - 20	± 0,5	++	+	+++
5 - 15	± 0,2	++	+++	+++
15 - 25	± 0,5	++	+	+++
25 - 45		+++	nie	+++ (O ₂)
> 45		+++	nie	++

*(+) – technologia najbardziej niekorzystna, (++) - technologia zapewniająca zadowalającą jakość powierzchni przecięcia, (+++) - technologia najlepsza.

4. WNIOSKI

Rozwój maszyn oraz ich oprzyrządowania do cięcia technikami wysokoenergetycznymi ukierunkowany jest na poprawę jakości wyrobu, zwiększenie wydajności przy jednoczesnym zachowaniu aspektów ekonomicznych i ekologicznych. Pobierając mniej energii, emitując mniej hałasu oraz wydzielając mniej ciepła współczesne maszyny do cięcia plazmą z systemami automatycznego nadzoru stają się bardziej efektywne przy jednoczesnym wdrożeniu technologii przyjaznych dla środowiska naturalnego. Obrabiarki do cięcia laserowego i plazmowego wspomagane są zrobotyzowanymi systemami podawania materiału oraz układami pozycjonowania materiału. Doskonalenie konstrukcji maszyn związane jest również z ograniczeniem masy maszyn przez wprowadzanie innowacji konstrukcyjnych lub stosowanie do ich produkcji nowych materiałów.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Tomaszewski Z., Czekaj A., Tomaszewski K.: *Maszyny do obróbki plastycznej spełniające wymagania bezpieczeństwa Unii Europejskiej*. Część I. Ocena zgodności maszyn do obróbki plastycznej według dyrektywy maszynowej UE. *Obróbka Plastyczna Metali*, 2, 22, 2006, s. 33-46.
- [2] Trzepieciński T.: *Trendy rozwojowe maszyn i technik stosowanych w technologii cięcia blach*. *Inżynieria Maszyn*, 3, 17, 2012, s. 94-106.
- [3] Lemu H.G.: *Virtual engineering in design and manufacturing*. *Advances in Manufacturing*, 7, 2014, s. 1-6.

- [4] Honczarenko J.: *Rozwój i automatyzacja obrabiarek skrawających Cz. II*. Mechanik, 2, 83, 2010, s. 90-94.
- [5] Turek P., Mokrzycki W., Jędrzejewski J.: *Analiza metod kompensacji błędów obrabiarek*. Inżynieria Maszyn, 1-2, 15, 2010, s. 130-149.
- [6] Kosmol J.: *Kierunki rozwoju obrabiarek*. Reminiscencje z Salonu MACH-TOOL na ITM 2011. Mechanik, 8-9, 84, 2011, s. 660-664.
- [7] Staszyński M.: *Cięcie plazmą - przewodnik po technologii*, Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie, 2, 2007, s. 15-21.
- [8] Trzepieciński T.: *Rozwój techniki cięcia plazmowego*. Stal Metale & Nowe Technologie, 9-10, 2014, s. 82-84.
- [9] Materiały firmowe i reklamowe: Bystronic, Eckert, Esab, Mexpol, Stigal, Trumpf.
- [10] <http://www.eurotool.krakow.pl>.
- [11] Feldshtein E., Koman I.: *Wycinanie laserowe elementów o dużej grubości w blachach ze stali nierdzewnej*. Przegląd Mechaniczny, 4, 2010, s.13-18.
- [12] 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, 4, 62, 1996, s. 294-298.
- [13] Powell J., Kaplan A.: *Laser cutting: from first principles to the state of the art*. Proceedings of the 1st Pacific International Conference on Application of Lasers and Optics, Melbourne 2004, s. 1-6.
- [14] Zaborski S., Stechnij T.: *Laserowe i plazmowe cięcie blach ze stali niestopowych i kwasoodpornych*, Inżynieria Maszyn, 4, 16, 2011, s. 109-116.
- [15] <http://www.plazmacz.cz/en/plasma-advantages-and-disadvantages/>.