

Porównanie cięcia laserowego z cięciem strumieniem wodno-ściernym

A comparison of a laser cutting with a water-abrasive stream cutting

Streszczenie

Omówiono podstawy fizyczne procesu cięcia laserowego i cięcia strumieniem wodno-ściernym. Przedstawiono budowę urządzenia do cięcia laserowego i urządzenia do cięcia strumieniem wodno-ściernym. Omówiono zagadnienia dotyczące jakości powierzchni cięcia. Zestawiono wyniki oceny jakości powierzchni cięcia wybranych elementów o różnej grubości dla cięcia laserowego i cięcia strumieniem wodno-ściernym. Porównano koszty i efekty ekonomiczne stosowania obu metod cięcia. Całość zakończono wnioskami dotyczącymi możliwości technicznych i opłacalności ekonomicznej stosowania omawianych metod cięcia.

Słowa kluczowe: cięcie wodą, cięcie laserem

Abstract

The physical bases of a laser cutting process and water-abrasive jet cutting were described. A structure of a laser cutting machine and water-abrasive jet cutting machine was depicted. The issues referring to the quality of a surface of a cut were shown. The results of an assessment of a surface quality of particular elements of different thickness for the laser cutting and water-abrasive jet cutting were compared. The costs and economical effects of both ways of cutting were also compared. The article was summarised by the conclusions relating to the technical capabilities and economical cost-effectiveness of a usage of the described methods.

Keywords: water-jet cutting, laser cutting,

Cięcie laserowe

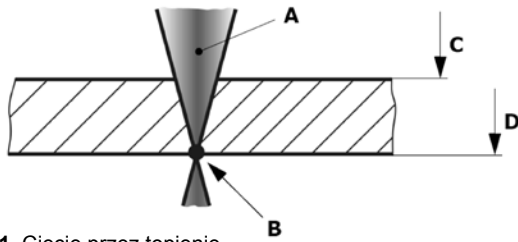
Cięcie laserowe może następować przez: sublimację, topienie, wypalanie. Cięcie laserowe z wykorzystaniem sublimacji to metoda, kiedy materiał cięty samorzutnie wyparowuje w wyniku działania zogniskowanego promienia laserowego o dużej intensywności i zostaje wydmuchany na skutek dużego ciśnienia pary i gazu tnącego uczestniczących w procesie cięcia laserowego. Materiał w obszarze szczeliny wyparowuje bezpośrednio bez fazy ciekłej. Ten sposób cięcia nie znajduje wykorzystania w przemyśle [1÷5].

Cięcie laserowe za pomocą stapiania to metoda, w której materiał cięty zostaje stopiony na całej grubości cięcia promieniem laserowym, a następnie jest wydmuchiwany ze szczeliny za pomocą gazu tnącego. Cięcie laserowe za pomocą tej metody prowadzi się głównie z zastosowaniem argonu i azotu. Materiał transportowany jest wyłącznie w fazie ciekłej. Istotę procesu pokazano na rysunku 1, gdzie:

- A – promień laserowy,
- B – położenie punktu ogniskowania,
- C – górna krawędź ciętej blachy,
- D – dolna krawędź ciętej blachy.

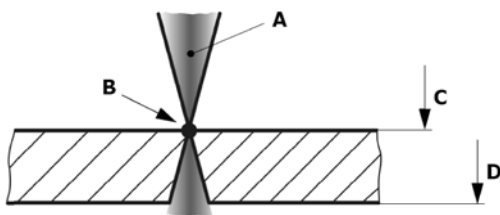
Dr hab. inż. Jacek Słania, prof. PCz – Politechnika Częstochowska, **inż. Piotr Milewski** – Protekt Łódź.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: jacek_slania@poczta.onet.pl



Rys. 1. Cięcie przez topienie
Fig. 1. Cutting by melting

Podczas cięcia laserowego za pomocą spalania (utleniania) materiał cięty zostaje nagrany promieniem lasera, zogniskowanego na powierzchni w obszarze szczeliny cięcia, do temperatury zapłonu. Najczęściej ta metoda jest stosowana do cięcia stali niestopowych. W tlenie tnącym materiał spala się w szczelinie cięcia, tworząc rzadkopłynny żużel, który zostaje wydmuchany ze szczeliny przez energię kinetyczną strumienia tlenu tnącego. Schemat tego procesu pokazano na rysunku 2.



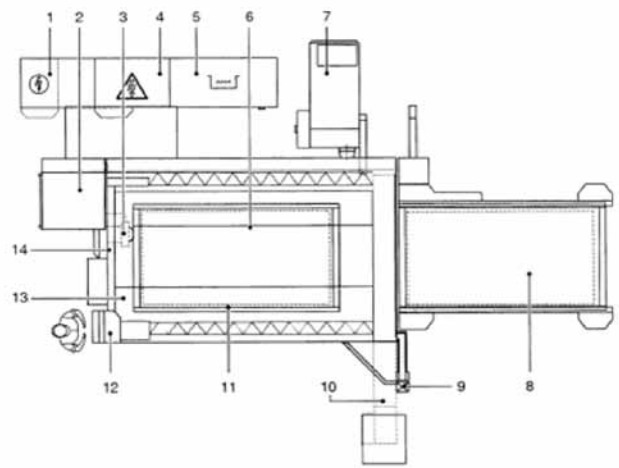
Rys. 2. Cięcie przez wypalenie
Fig. 2. Cutting by burning

Najczęściej stosowana jest kombinacja trzech rodzajów do oddzielania materiału poddanego procesowi wycinania laserem. Cechą cięcia laserowego jest punktowe wprowadzenie energii i wysokoenergetyczny strumień tnący. Celem cięcia laserowego jest wytwarzanie elementów, które bez dodatkowej obróbki nadają się do dalszej przeróbki. Warunkiem uzyskania dobrej jakości cięcia laserowego i utrzymywania dużej dokładności wymiarów ciętych elementów konstrukcyjnych jest dokładnie prowadzony strumień tnący lasera w połączeniu z najwyższej jakości maszyną do cięcia o dużej odporności na drgania.

Przykładowa maszyna do cięcia laserem

Trulaser 3030 jest numerycznie sterowanym urządzeniem do cięcia laserowego płaskich elementów. Czynnikiem tnącym jest promień laserowy kierowany za pomocą systemu zwierciadeł do głowicy lasera. Zwierciadła i głowica laserowa zamocowane są na ruchomych podzespołach, tzn. że maszyna pracuje z „latającą optyką”. Układ regulacji wysokości utrzymuje stałą odległość między końcówką głowicy tnącej a przedmiotem obrabianym.

Maszyna jest standardowo wyposażona w system wymiany palet. Służy on do automatycznej wymiany palet z obrobionymi detalami na palety z przedmiotami do obróbki. Ładowanie i wyładowywanie może być wykonywane równocześnie. Dzięki temu przestoje ograniczone są do minimum. Załadunek palet może się też odbywać w sposób zautomatyzowany. Elementy składowe maszyny przedstawiono na rysunku 3. W tabelicy I podano dane techniczne urządzenia wykrawającego.



Rys. 3. Elementy składowe maszyny: 1 – szafa sterownicza z generatorem HF (wielkiej częstotliwości), 2 – laser TruFlow, 3 – urządzenie do cięcia rur TRUMPF RotoLas (opcja), 4 – szafa sterownicza, 5 – agregat chłodniczy, 6 – taśmociąg wzdłużny, 7 – filtr kompaktowy, 8 – zmieniacz palet, 9 – słupek rozruchowy zmieniacza palet i automatyki (opcja), 10 – taśmociąg poprzeczny z pojemnikiem na odpady (opcja), 11 – paleta, 12 – panel sterowania, 13 – maszyna podstawowa, 14 – kabina ochronna z drzwiami

Fig. 3. Components of the machine: 1 – a control cabinet with a high-frequency generator, 2 – the TruFlow laser, 3 – the TRUMPF RotoLas equipment to cut pipes (option), 4 – a control cabinet, 5 – a refrigerating unit, 6 – a lengthwise belt conveyor flight, 7 – a compact filter, 8 – a pallet changer, 9 – a starter post of the pallet changer and automatics (option), 10 – a diagonal belt conveyor flight with a waste bin (option), 11 – a pallet, 12 – a control panel, 13 – a basic machine, 14 – a protective cabin with doors

Tablica I. Dane techniczne urządzenia Trulaser 3030
Table I. Technical data of Trulaser 3030 equipment

Ciężar całkowity	11 500 kg
Zakres roboczy	
w kierunku X	3000 mm
w kierunku Y	1500 mm
w kierunku Z	115 mm
Wymiary	
Długość	ok. 9800 mm
Szerokość	ok. 5300 mm
Wysokość	ok. 2000 mm
Przyłącze elektryczne	63 kVA
Zużycie sprężonego powietrza	42 m ³ /h = 700 l/min
Maks. prędkość pozycjonowania	85 m/min
Najmniejszy programowalny wymiar drogi	0,01 mm
Odchylenie położenia	±0,1 mm
Średnia szerokość rozrzutu pozycji	±0,03 mm
Maks. moc lasera	2000 W
Maks. grubość materiału	12 mm

Układ prowadzenia promienia

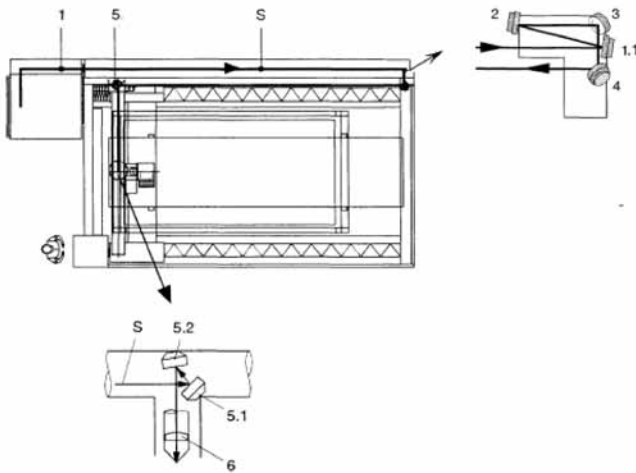
Układ prowadzenia promienia laserowego przedstawiono na rysunku 4. Wiązka laserowa w układzie między generatorem promieniowania laserowego a głowicą tnącą maszyny jest odizolowana od otoczenia w taki sposób, że promieniowanie laserowe nie może wydostać się na zewnątrz, a spaliny powstające przy cięciu nie przedostają się do układu prowadzenia promienia.

W opisywanym laserze wiązka niewidocznego promieniowania po opuszczeniu rezonatora laserowego biegnie przez teleskop zwierciadlany, w którym znajduje się jedno zwierciadło kierunkowe wypukłe i jedno wklęsłe. Trzy podzespoły filtrujące gwarantują, że powietrze wpływające do układu prowadzenia wiązki wolne jest od cząstek kurzu i oleju. Cały układ przewodniczący promienia jest wentylowany azotem. Szczelna wentylacja zapewnia zachowanie stałego nadciśnienia w układzie prowadzenia promienia w każdych warunkach roboczych. Wszystkie zwierciadła chłodzone są za pomocą agregatu chłodniczego lasera.

FocusLine jest urządzeniem do automatycznej regulacji ogniska w maszynach laserowych. Elementem centralnym jest zwierciadło samoskupiające, którego powierzchnia celowo odkształcana jest za pomocą ciśnienia wody chłodzącej.

FocusLine spełnia dwa następujące zadania:

- automatyczne dopasowanie położenia ogniska do rodzaju i grubości materiału,
- kompensacja przemieszczenia ogniska dzięki różnym długościom promienia nad strefą roboczą.



Rys. 4. Układ prowadzenia promienia wiązki laserowej: 1 – laser TruFlow z teleskopem promienia, 1.1 – zwierciadło zwrotne, 2 – zwierciadło adaptacyjne teleskopu (miedziane), 3 – kompensator fazowy, 4 – zwierciadło zwrotne, 5 – zwierciadła kierunkowe w jednostce ruchomej, 5.1 – zwierciadło zwrotne i samoskupiające, 5.2 – zwierciadło przy FocusLine, 6 – układ optyczny soczewki w głowicy tnącej, S – wiązka laserowa

Fig. 4. A system of controlling a laser beam: 1 – the TruFlow laser with a beam telescope, 1.1 – a feedback mirror, 2 – an adaptive mirror of a telescope (copper), 3 – a phase compensator, 4 – a feedback mirror, 5 – a directional mirror in the movable unit, 5.1 – a feedback and self – focusing mirror, 5.2 – the FocusLine mirror, 6 – an optical system of lens in the cutting head, S – a laser beam

Głowica tnąca

Laserowa głowica tnąca jest głównym podzespołem maszyny. Podstawowe elementy składowe laserowej głowicy tnącej (rys. 5) to rurka z soczewką i układem optycznym, obudowa głowicy z dyszą tnącą, regulacją odstępów i śrubami regulacyjnymi.

Soczewka (ZnSe) załamuje równoległe promienie światła laserowego i skupia je w punkcie ogniskowym (fokus), w którym promieniowanie osiąga swoją najwyższą gęstość energetyczną. W zależności od zastosowanego typu soczewki ogniskowa może wynosić 5" lub 7.5". W celu zapewnienia optymalnych warunków roboczych zogniskowanie musi być ustawione na zdefiniowany punkt na powierzchni przedmiotu do obróbki. Soczewki są chłodzone przy użyciu strumienia gazu tnącego, który dostarczany jest do wgłębienia pod soczewką wspólnie z powietrzem.

Za pomocą dyszy tnącej, dodatkowo chłodzonej oczyszczonym powietrzem sprężonym, promieniowanie i gaz tnący prowadzone są na obrabiany przedmiot.

Układ czujników regulacji odległości znajduje się w głowicy tnącej i zabezpieczony jest osłoną. Odstęp dyszy tnącej od powierzchni materiału jest podczas procesu wykrawania stały dzięki pojemnościowemu układowi regulacji odległości.

Głowica tnąca zamontowana jest na osi Z, napędzanej własnym silnikiem za pośrednictwem paska zębatego.



Rys. 5. Głowica tnąca, widok z przodu i z góry: 1 – śruba regulacyjna z podziałką, 2 – skala Z z podziałką 1 mm, 3 – śruba regulacji ogniska, 4 – pierścień nastawczy Z z podziałką 0,1 mm, 5 – sworzeń ustalający, 6 – śruba regulacyjna z podziałką, 7 – przyłącze wentylacji układu prowadzenia, 8 – górna część głowicy tnącej (pojemnik), 9 – zabezpieczenie położenia, 10 – dolna część głowicy tnącej, 11 – rurka przedmuchu powietrza, 12 – dysza

Fig. 5. A cutting head, a view from the front and the top: 1 – an adjusting screw with a scale, 2 – a Z scale with 1mm scale, 3 – a focus adjusting screw, 4 – a Z adjusting ring with a 0,1 mm scale, 5 – a fixed pin, 6 – an adjusting screw with a scale, 7 – a ventilation port of a supporting system, 8 – a top part of a cutting head (container), 9 – a protection of the foundation, 10 – a bottom part of a cutting head, 11 – an air blowthrough pipe, 12 – a nozzle

Układ sensorów nadzoru soczewki

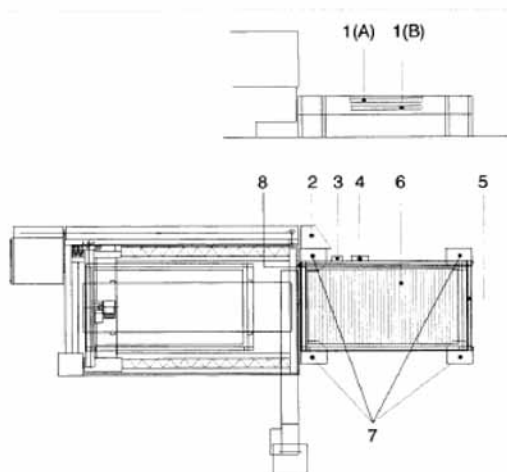
Maszyny z laserem TruFlow 3030 wyposażone są standardowo w układ czujników do nadzoru soczewki. Natężenie światła laserowego w głowicy tnącej nadzorowane jest za pomocą światłoczułych podzespołów. Po wykryciu przez układ czujników zajarzenia się soczewki – zjawiska poprzedzającego jej rozpad termiczny – następuje wyłączenie maszyny. Zapobiega to całkowitemu zniszczeniu soczewki. Po zadziałaniu układu sensorów nadzoru soczewki należy sprawdzić, czy zostało ono spowodowane:

- tworzącą się energią rozkładu termicznego,
- światłem procesu.

Jeżeli został zapoczątkowany proces rozkładu termicznego soczewki, należy ją wymienić. Wymiana soczewki w terminie oszczędzi konieczności czyszczenia całego układu prowadzenia wiązki lasera, które zawsze jest wymagane po termicznym rozpadzie soczewki.

Zmieniacz palet

Urządzenie to służy do załadunku i rozładunku palet, znajdujących się podczas obróbki arkuszy w maszynie podstawowej. Wymiana palet zajmuje w TruLaser 3030 ok. 25 s. Elementy zmieniacza palet przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Elementy zmieniacza palet: 1(A) – paleta A, 1(B) – paleta B, 2 – agregat hydrauliczny, 3 – zawór dzielący przepływ, 4 – skrzynka z zaciskami, 5 – rama podnosząca, 6 – listwy podporowe, 7 – stopy zmieniacza palet z cylindrami hydraulicznymi, 8 – listwy zabierakowe palet [1]

Fig. 6. Components of a pallet changer: 1(A) – an A pallet, 1(B) – a B pallet, 2 – a hydraulic unit, 3 – a dividing flow valve, 4 – a box with clamps, 5 – an elevating frame, 6 – supporting rails, 7 – feet of the pallet changer with hydraulic cylinders, 8 – dragline strips of pallets [18]

Cięcie strumieniem wodno-ściernym

Cięcie strumieniem wodno-ściernym pod wysokim ciśnieniem polega na wykorzystaniu skoncentrowanej energii strumienia wody pod wysokim ciśnieniem – ok. 4000 barów, który wraz z rozdrobnionym materiałem ściernym, z prędkością ponaddzwiękową, wycina wąski pasek materiału podlegającego cięciu. Ciśnienie tego rzędu spowoduje wymuszenie przepływu wody przez dyszę wodną z otworem o typowej średnicy $0,18 \pm 0,4$ mm. Powstaje w ten sposób struga wody o bardzo dużej szybkości i energii. Średnica strumienia wody wynosi $0,2 \pm 0,7$ mm, a jej prędkość dochodzi do 1000 m/s. Do cięcia wodą zostało zastosowane urządzenie WATER JET, które umożliwia wycinanie dowolnych, niczym nieograniczonych kształtów z szerokiej gamy materiałów:

- stal (węglowa, stopowa, konstrukcyjna, gatunkowa, jakościowa, narzędziowa, trudnościeralna typu Hardox, Xar, pancerna, ocynkowana itp.),
- stal nierdzewna, żaroodporna, itp.,
- blachy platerowane,
- metale nieżelazne i ich stopy (aluminium, miedź, tytan, mosiądz itp.),
- kamień naturalny (granit, marmur, konglomerat, piaskowiec itp.),
- ceramika (płytki ceramiczne, gresowe itp.),
- guma i tworzywa sztuczne: m.in. poliuretan, poliamid, glastherm itp.,
- materiały uszczelnkowe i cierne,
- szkło klejone, pancerne, warstwowe, walcowane itp.,
- płyty drewnopochodne [6, 7].

Przykładowa maszyna do cięcia strumieniem wodno-ściernym

Centrum obróbcze JetMachining to precyzyjne narzędzie służące do wycinania skomplikowanych części płaskich z większości materiałów, bezpośrednio na podstawie rysunku CAD lub pliku dxf.

W tablicy II przedstawiono dane techniczne centrum obróbczego.

Tablica II. Dane techniczne urządzenia OMAX 55100

Table II. Technical data of OMAX 55100 equipment

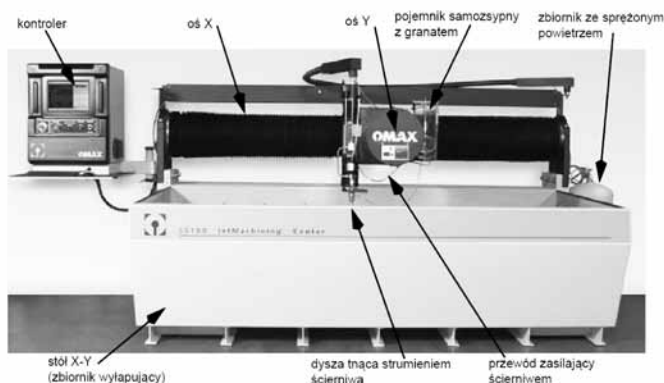
Dokładność ruchu	
Na całym przebiegu	$\pm 0,076$ mm
Powtarzalność	$\pm 0,051$ mm
Przy prostopadłości	0,051 mm/m
Przy prostoliniowości	0,076 mm/m
Luz	max 0,018 mm
Wymiary maszyny	
Obrys maszyny	3937 mm x 2388 mm
Wysokość maszyny	2998 mm
Waga (pusty zbiornik)	3,629 kg
Masa robocza (pełny zbiornik)	10,000 kg
Wielkość stołu / zasięg roboczy	
Zasięg roboczy osi X-Y	2540 x 1397 mm
Rozmiar stołu	3200 x 1650 mm
Maksymalne obciążenie stołu	1,200 kg/m

Podstawowe elementy centrum obróbczego JetMachining

Na system OMAX JetMachining (rys. 7) składają się cztery główne sekcje:

- kontroler – maszyna OMAX jest sterowana za pomocą standardowego komputera PC z uruchomionym oprogramowaniem OMAX Make. Kontroler uruchamia i zatrzymuje pompę, włącza i wyłącza przepływ

- wody i ścierniwa oraz prowadzi strumień tnący po precyzyjnej ścieżce narzędzia,
- wysokociśnieniowa pompa wodna – nadaje ciśnienie wodzie używanej przez dyszę tnącą maszyny OMAX,
 - precyzyjny stół X-Y – składa się ze sztywnych osi z wózkami X i Y, zamontowanych nad wielkim zbiornikiem zawierającym wodę, wylapującym drobiny ścierniwa i fragmenty metalu pozostałe po cięciu. We wszystkich maszynach niezbędne jest powietrze pod ciśnieniem, które umożliwia działanie zaworu wł./wył. i zaworu ścierniwa. W modelach 55100 zainstalowany jest zbiornik ze sprężonym powietrzem, które jest wykorzystywane do pracy zaworów pneumatycznych i sterowania poziomem wody w zbiorniku,
 - system cięcia strumieniem ścierniwa – woda pod wysokim ciśnieniem przepływa w dyszy maszyny tnącej przez kryzę, by utworzyć wąski strumień, którego prędkość dochodzi do 760 m/s. Strumień ten powoduje powstanie ssania, które wciąga powietrze i ścierniwo przez przewód zasilający. W skład systemu cięcia strumieniem ścierniwa wchodzi wysokociśnieniowa dysza i system zasilania granatem (pojemnik samozasypny).



Rys. 7. Centrum obróbcze OMAX JetMachining, model 55100
Fig. 7. The OMAX JetMachining Processing Centre, 55100 model

Wysokociśnieniowa pompa OMAX

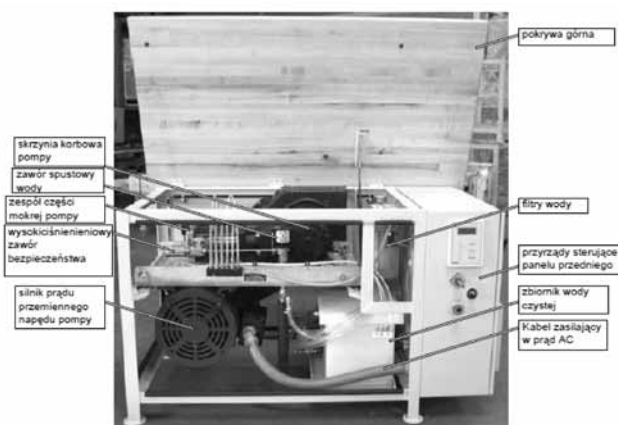
Wysokociśnieniowa pompa OMAX (rys. 8 i 9) z regulacją prędkości obrotowej jest napędzana elektrycznie z wału korbowego pompą z regulacją prędkości, wyporową, trójnurnikową, która dostarcza wody o wysokim ciśnieniu niezbędnej do pracy systemu JetMachining OMAX. Zawiera kilka właściwości, które sprawiają, że jest tańsza w eksploatacji i utrzymaniu:

- całość wody chłodzącej wykorzystywanej przez pompę jest poddawana recyrkulacji i ponownie używana,
- pompa OMAX obejmuje własny układ pompy uzupełnienia wody i filtra, tak aby mogła być zasilana z niskociśnieniowego źródła wody,
- cały wysokociśnieniowy zespół części mokrej może zostać zdemontowany jako całość przez wykręcenie jedynie ośmiu nakrętek,

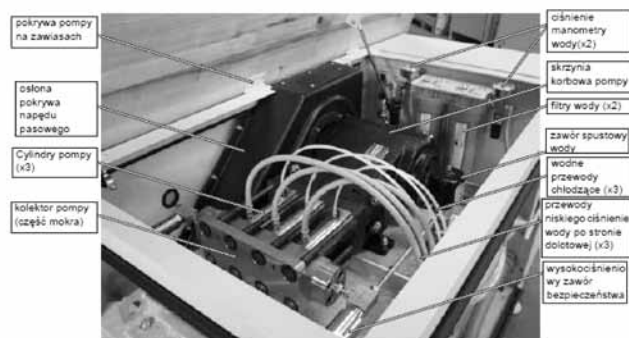
- wszystkie elementy pompy zaprojektowano pod kątem niskiego poziomu hałasu (ok. 72 dB),
- pompa OMAX pracuje przy niskim poziomie drgań, co oznacza ograniczenie zużycia jej elementów i przyległych połączeń.

Główne elementy napędu zespołu pompy obejmują napęd z regulacją częstotliwości, główny silnik elektryczny, napęd pasowy pomiędzy silnikiem a pompą wysokociśnieniową oraz napęd wysokociśnieniowej pompy z wału korbowego. Elektroniczny VFD umożliwia ciągłe zmiany prędkości silnika elektrycznego, a zatem prędkości pompy przez zmianę częstotliwości zasilania elektrycznego głównego silnika. Napęd o zmiennej częstotliwości to dostosowanie do niewielkich rozbieżności charakterystyki przepływu przez dyszę, brak udaru prądowego po rozruchu i wysokie współczynniki mocy, jak również oszczędność silnika w całym zakresie mocy użytecznej.

Pompa podająca odpowiada za cyrkulację wstępną wody przez zbiornik wody czystej oraz przewody chłodzące. Przepływ ten powoduje upuszczenie wody gorącej ze zbiornika wody oraz z przewodów chłodzących przed uruchomieniem pompy wysokociśnieniowej. Stosowanie wody schłodzonej powoduje wydłużenie żywotności uszczelki pompy wysokociśnieniowej. Następnie woda ta jest recyrkulowana z powrotem do zbiornika wody czystej.



Rys. 8. Pompa z otwartą górną pokrywą oraz zdjętym panelem przednim
Fig. 8. A pump with an open top lid and a removed front panel



Rys. 9. Pompa od góry z otwartą pokrywą wierzchnią
Fig. 9. A view on the pump from the top with an opened top lid

Głowica

Głowica MaxJet 5 (rys. 10), wykonana do stosowania w systemach OMAX JetMachining, jest pierwszą przemysłową głowicą do cięcia wodą ze ścierniwem, używaną również w obróbce precyzyjnej. Trwała i dokładna MaxJet 5 charakteryzuje się kryzą o trwałej i taniej konstrukcji, która zapobiega dostępowi do kryzy pod prąd cząsteczkom ścierniwa z przesuwanego się strumienia. Osiągnięty w rezultacie strumień o wysokiej zwartości jest ściśle skupiony, żeby wytworzyć małe nacięcie z minimalnym wychłodzeniem, prążkami powierzchniowymi i stożkowatością. Połączona z opatentowanym przez OMAX oprogramowaniem sterującym napędem MaxJet 5 oferuje powtarzalną jakość cięcia wyższą od jakiegokolwiek głowicy na rynku.

Korzyści ze stosowania takiej głowicy:

- solidny i oszczędny w eksploatacji zespół kryzy jest wykonany tak, aby zapobiegać powrotowi cząsteczek ścierniwa ze strumienia, w celu wydłużenia żywotności głowicy,
- kryza i tuba miksująca jest zestrojona do prostych operacji, a konstrukcja miękkiego uszczelnienia pozwala na łatwy serwis,
- czterocalowej długości tuba miksująca zapewnia maksymalną żywotność i wyższą jakość cięcia,
- trwały otwór wlotowy cylindra głowicy charakteryzuje się wysoką wytrzymałością na zmęczenie i odpornością na zużywanie,
- obudowa głowicy nie ma kontaktu ze ścierniwem lub wodą pod bardzo wysokim ciśnieniem, co skutkuje dużą żywotnością,
- możliwe jest zamontowanie diamentowej kryzy,
- wszystkie części są tak wymiarowane, by zapewnić łatwe przeglądy i naprawy,
- dokładne usytuowanie końcówek narzędziowych umożliwia zastosowanie wraz z oprzyrządowaniem głowicy uchylniej.

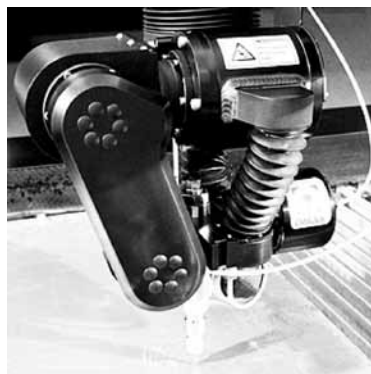


Rys. 10. Głowica MaxJet 5
Fig. 10. The MaxJet 5 head

Centrum obróbcze jest wyposażone również w mechanizm ruchomej głowicy Tilt-A-Jet (rys. 11), który stanowi ostatnią innowację OMAX, powstałą w trakcie kontynuowania badań nad bardziej dokładną obróbką przy użyciu strumienia wody. Tilt-A-Jet pozwala centrom obróbczym OMAX JetMachining osiągnąć rzeczywistą zerową stożkowatość przy obróbce większości materiałów. Mechanizm głowicy Tilt-A-Jet może pozycjonować głowicę pod wyliczonym przez program kątem, żeby dokładnie wyeliminować stożkowatość powstającą przy odchyleniu się strumienia wody i ścierniwa.

Stożkowanie nie znika, ale zostaje użyte do usuwania części materiału w taki sposób, aby pozostawić obrabiany element z idealnie prostopadłymi krawędziami.

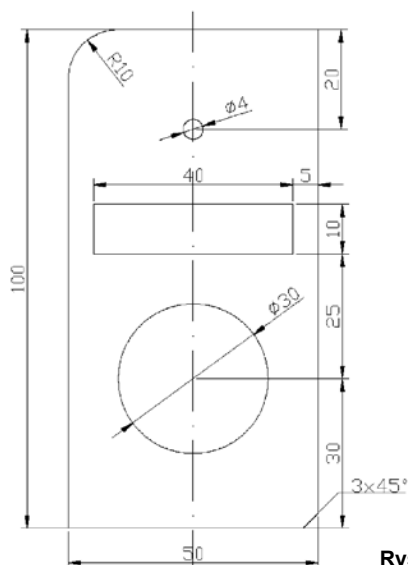
Tilt-A-Jet nie ma części zużywających się, nie wymaga żadnych przeglądów ani nie zużywa materiałów eksploatacyjnych. Występuje mały dodatkowy pobór energii elektrycznej potrzebnej do serwomotorów, ale nieznaczny. Nawet „wypionowanie osi Z” (tzn. upewnianie się, że oś Z jest dokładnie prostopadła do powierzchni listew, jeżeli nawet ulegała wstrząsom) wykonywane jest przez 15 s z poziomu programu po uruchomieniu funkcji „Square Z-axis”.



Rys. 11. Głowica Tilt-A-Jet
Fig. 11. The Tilt-A-Jet head

Badanie własne

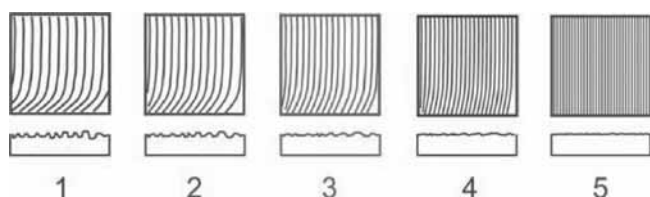
Badania przeprowadzono na specjalnie zaprojektowanym elemencie, wykonanym ze stali konstrukcyjnej niskowęglowej, którego zarys przedstawiono na rysunku 12. Wymiary gabarytowe detalu wynoszą 100 x 50 mm. W celu lepszego określenia aspektów technologicznych jeden róg przedmiotu zaokrąglono promieniem R10, a także zastosowano 3 rodzaje typowych otworów: $\varnothing 4$, $\varnothing 30$ oraz prostokątny 40 x 10. Materiał, jaki wykorzystano, to stal konstrukcyjna S235JR wg EN10027-1 dostępna grubość 3, 6, 10 i 12 mm. Element został wykonany na wykrawarce laserowej niemieckiej firmy TRUMPF (obróbka fotonowa) i amerykańskim centrum obróbczym OMAX (obróbka wodno-ścierna).



Rys. 12. Badany element
Fig. 12. An examined element

Porównanie parametrów technologicznych cięcia

Cięcie strugą wodno-ścierną ma pięć wariantów jakości do wyboru. Wariant pierwszy jest wariantem najszybszym, lecz co za tym idzie, jakość cięcia jest najgorsza. Natomiast wariant piąty pozwala uzyskać najwyższą jakość cięcia kosztem prędkości. Wykrawarka laserowa ma parametry technologiczne do cięcia jakościowego standardowych materiałów takich jak S235, 0H18N9 czy PA11. Zła powierzchnia blachy, np. zendra, ślady korozji, zmusza operatorów do modyfikacji tych parametrów w celu uzyskania jak najlepszej jakości i prędkości cięcia. Podczas cięcia wycinarką wodną nie ma znaczenia powierzchnia blachy ani ewentualne zanieczyszczenia składu chemicznego. Zobrazowanie jakości cięcia przedstawiono na rysunku 13. W tabelicy III porównano prędkość cięcia i czas obróbki dla poszczególnych grubości materiałów w obu tych metodach.



Rys. 13. Zobrazowanie jakości cięcia, 1 – najgorsza, 5 – najlepsza jakość

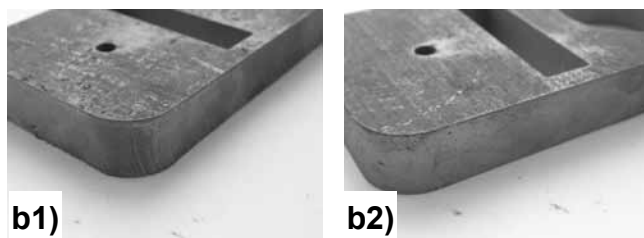
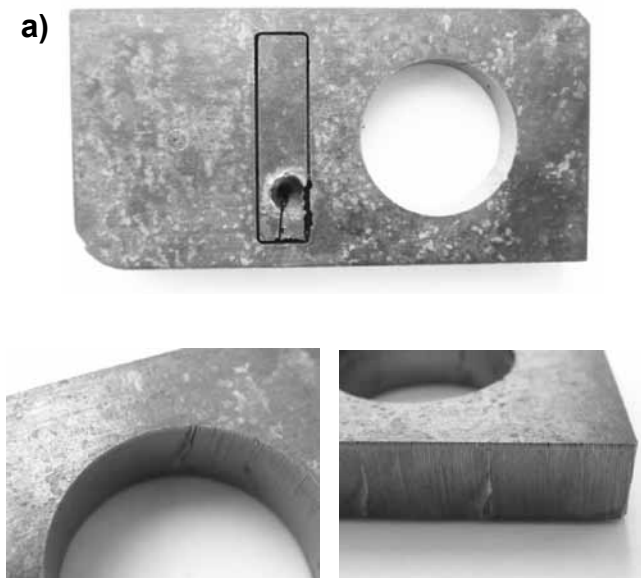
Fig. 13. Illustration of a cutting quality, 1 – the worst, 5 – the best

Tablica III. Wartości prędkości cięcia i czasu dla poszczególnych grubości

Table III. The values of the cutting speed and the time for particular thickness

Grubość mm	Średnia prędkość cięcia, mm/min			Czas, s		
	Laser	Woda		Laser	Woda	
		Jakość 1	Jakość 5		Jakość 1	Jakość 5
3	3600	663	291	11	68	142
6	2200	381	175	26	111	232
10	1300	227	102	54	180	390
12	900	175	81	48	232	492

Z parametrów tych wynika, że wykrawarka laserowa wycina ponad pięć razy szybciej niż centrum obróbcze OMAX w jakości pierwszej, czyli najszybszej. Jak pokazano na rysunku 14, powierzchnia elementu ciętego na maszynie TRUMPF jest nieco gorsza niż pierwsza jakość cięcia na wykrawarce wodno-ściernej. Wynika to z ograniczenia mocy jaką dysponuje ten typ wykrawarki laserowej. Jakość piąta wycinanego elementu strugą wodno-ścierną jest znacznie lepsza niż ciętego na wykrawarce laserowej, ale za to czas cięcia był ponad 12 razy dłuższy. W przypadku blach o grubości poniżej 10 mm, jakość elementu wycinanego na urządzeniu TRUMPF już nie odbiega, a nawet jest lepsza niż pierwsza jakość elementu ciętego na wykrawarce wodno-ściernej.



Rys. 14. Element z grubości 12 mm i jego krawędzie: a) cięty wykrawarką laserową, b) cięty strugą wodno-ścierną, b1) jakość 1, b2) jakość 5

Fig. 14. A 12 mm thick element and its edges: a) cut by a laser puncher, b) cut by a water-abrasive jet, b1) quality 1, b2) quality 5

Element cięty technologią laserową z grubości 12 mm został wycięty w krótszym czasie niż z grubości 10 mm, chociaż średnia prędkość cięcia jest niższa. Wynika to z tego, że otwór $\Phi 4$ został tylko wygrawerowany, gdyż przy mocy lasera 2000 W program obsługujący wycinarkę automatycznie potraktował ten obrys jako za mały do wycięcia przy tej mocy maszyny.

Koszty

Całkowity koszt zakupu maszyny wraz z oprogramowaniem i szkoleniem pracowników porównano w tabelicy IV.

Tablica IV. Całkowite koszty wybranych obrabiarek
Table IV. Total costs of chosen machine tools

Maszyna	TRUMPF L3030	OMAX 55100
Całkowita wartość sprzedaży, €	465 000	202 250

Tablica V. Ceny wyciętych elementów dla różnych technologii wykonania

Table V. Prices of cut elements for different operating technologies

Technologia	Jakość	Grubość blachy, mm	Cena netto za szt., zł
Cięcie laserem	-	3	1,77
		6	4,16
		10	8,71
		12	7,74
Cięcie wodą	1	3	5,60
	5		11,80
	1	6	9,3
	5		19,30
	1	10	15,10
	5		32,6
	1	12	19,30
	5		41,20

Koszty wyciętych elementów pozyskane z działów handlowych przedstawiono w tablicy V. Zapytanie ofertowe zostało złożone do firm posiadających maszyny opisane powyżej, przy założeniu wykonania całej serii 4 szt.

W tablicy VI porównano ilości wyciętych elementów z poszczególnych grubości blachy w ciągu 1 h cięcia i ich wartości oraz ilości wykonanych elementów za sumę równą wartości zakupu maszyn. Jeżeli przyjąć cenę za 1 szt. wykonanego elementu jako zysk, to ilość dni potrzebnych do spłacenia maszyny jest porównywalna. Natomiast ilość części wyciętych np. z grubości 12 mm, gdzie jakość powierzchni – przy cięciu strugą wodno-ścierną w jakości pierwszej – jest porównywalna, wynosi jak 5:1 na korzyść wykrawarki laserowej.

Wymiary

Wyniki pomiarów oraz analizę zgodności wymiarowej zgodnej z 14 klasą dokładności elementów (wykonanych w odchyłce h(H), czyli w głąb materiału) wyciętych technologiami cięcia laserem i strumieniem wodno-ściernym przedstawiono w tablicach VII i VIII.

W budowie maszyn przyjmuje się, że wymiary nietolerowane mają klasę dokładności wykonania IT14. Wszystkie wymiary wyciętych próbek, poza jednym (przy grubości 12 mm wymiar 10 mm), spełniają wymagania tej klasy. Podczas zetknięcia się promienia laserowego z materiałem wytwarza się ciepło (producent zakłada, że minimalna średnica wycinanego otworu, powinna być większa lub równa grubości ciętego materiału). Rozgrzany, podczas przebijania, materiał wpływa na ostateczny wymiar wycinanego otworu.

Tablica VI. Porównanie cen, czasów cięcia i liczby wyciętych detali z poszczególnych grubości blach

Table VI. A comparison of prices, times of cutting and the number of cut details from particular thickness of metal sheets

Technologia	Jakość	Grubość blachy mm	Cena netto za szt., zł	Czas s	Liczba detali wykonanych w ciągu 1 h	Wartość wykonanych detali w ciągu 1 h	Liczba wykonanych detali za sumę równą cenie zakupu maszyny	Liczba dni potrzebnych do wycięcia detali za sumę równą cenie zakupu maszyny
Cięcie laserem	-	3	1,77	11	327	579,27	1 035 426	132
		6	4,16	26	138	576,00	440 554	133
		10	8,71	54	67	580,67	210 414	132
		12	7,74	48	75	580,50	236 784	132
Cięcie wodą	1	3	5,6	68	53	296,47	142 344	112
	5		11,8	142	25	299,15	67 553	111
	1	6	9,3	111	32	301,62	85 713	110
	5		19,3	232	16	299,48	41 302	111
	1	10	15,1	180	20	302,00	52 790	110
	5		32,6	390	9	300,92	24 452	110
	1	12	19,3	232	16	299,48	41 302	111
	5		41,2	492	7	301,46	19 348	110

Tablica VII. Wyniki pomiarów elementu wyciętego przy wykorzystaniu maszyny OMAX 55100 – analiza zgodności, cięte w jakości 1
Table VII. The results of measurements of a cut element by the OMAX 55100 machine – an analysis of compatibility, cut in quality 1

Wymiar nominalny		gr. 3 mm		gr. 6 mm		gr. 10 mm		gr. 12 mm	
Wymiar żądany mm	Pole tolerancji*)	Wymiar zmierzony mm	Odchyłka rzeczywista mm	Wymiar zmierzony mm	Odchyłka rzeczywista mm	Wymiar zmierzony mm	Odchyłka rzeczywista mm	Wymiar zmierzony mm	Odchyłka rzeczywista mm
100	+0	99,95	0,05	100	0	99,95	0,05	99,9	0,1
	-0,87								
50	+0	49,85	0,15	50	0	49,9	0,1	49,95	0,05
	-0,62								
ø4	+0,3	4,3	0,3	4,25	0,25	4,2	0,2	4,2	0,2
	-0								
ø30	+0,52	29,8	0,2	29,9	0,1	29,9	0,1	29,85	0,15
	-0								
40	+0,62	40,3	0,3	40,15	0,15	40,1	0,1	40,15	0,15
	-0								
10	+0,36	10	0	9,95	0,05	9,9	0,1	10,05	0,05
	-0								

*) zgodna z 14. klasą dokładności
 *) complied with the 14th class of precision

Tablica VIII. Wyniki pomiarów elementu wyciętego przy wykorzystaniu maszyny TruLaser
Table VIII. The results of measurements of a cut element by the TruLaser 3030 machine

Wymiar nominalny		gr. 3 mm		gr. 6 mm		gr. 10 mm		gr. 12 mm	
Wymiar żądany mm	Pole tolerancji*)	Wymiar zmierzony mm	Odchyłka rzeczywista mm	Wymiar zmierzony mm	Odchyłka rzeczywista mm	Wymiar zmierzony mm	Odchyłka rzeczywista mm	Wymiar zmierzony mm	Odchyłka rzeczywista mm
100	+0	100,05	0,05	99,95	0,05	100	0	100	0
	-0,87								
50	+0	50,05	0,05	49,9	0,1	49,9	0,1	49,9	0,1
	-0,62								
ø4	+0,3	3,85	0,15	4,05	0,05	4,1	0,1	-	-
	-0								
ø30	+0,52	29,95	0,05	30,05	0,05	29,85	0,15	29,75	0,25
	-0								
40	+0,62	39,95	0,05	40,05	0,05	40,1	0,1	39,8	0,2
	-0								
10	+0,36	9,95	0,05	10,1	0,1	10	0	10,4	0,4
	-0								

*) zgodna z 14. klasą dokładności
 *) complied with the 14th class of precision

Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań i analizy próbek wyciętych laserem i metodą wodno-ścierną wynika, że:

- elementy cięte wykrawarką laserową mają stosunkowo niską cenę w porównaniu z elementami ciętymi strumieniem wodno-ściernym,
- koszt zakupu wykrawarki laserowej jest około dwa razy większy niż wykrawarki wodno - ściernej, chociaż koszt zakupu obydwu zwraca się w podobnym okresie użytkowania,
- wydajność lasera pozwala na wycięcie pięć razy więcej elementów w tym samym czasie niż urządzenie do cięcia strugą wodno-ścierną,
- jakość wyciętych próbek pod względem chropowatości powierzchni i wymiarów geometrycznych jest porównywalna w obu metodach,
- ze względu na moc lasera istnieje ograniczenie co do grubości ciętych materiałów; urządzenie do cięcia strugą wodno-ścierną również ma takie ograniczenia, ale przy obecnych pompach różnica ta wynosi odpowiednio: TRUMPF – 12 mm, OMAX – 200 mm,

- obrabiarki wodno-ściernie mogą przecinać takie materiały jak szkło, kamień, gąbkę czy gumę; niestety obróbka laserowa nie nadaje się do obróbki tych materiałów.

O wyborze jednej z omawianych metod decydować będą oczekiwania co do rodzaju materiału oraz koszt wykonania elementu, uwzględniający zarówno cenę wycinania przedmiotu, jak i jego dalszą obróbkę. Cięcie strumieniem wodno-ściernym jest niezastąpione przy cięciu grubych blach, czyli tam, gdzie kończą się możliwości cięcia laserowego (ograniczone mocą współczesnych laserów przemysłowych). Można więc stwierdzić, że decyzja o wyborze technologii należy do trudnych. Musi być średnią ważoną oczekiwań dotyczących jakości oraz wielu innych czynników, mających wpływ na funkcjonowanie elementu w zespole części, z którymi będzie współpracował. Należy wziąć pod uwagę także cenę elementu i koszty dalszej, wymaganej obróbki, która pozostaje w ścisłym związku z przyjętą technologią.

Literatura

- [1] Aichele G., Nickenig L.: Laserstrahlschneiden – Laserprinzip Und Arbeitweisen gebräuchlicher Schneidlaser. Der Praktiker, 2013, t. 55, nr 8, s. 230-235.
- [2] Chaskin V. Ju., Lukasenko A.G.: Cięcie korpusów pił tarczowych z zastosowaniem wiązki lasera CO₂. Avtomat. Svarka. 2005, nr 2, s. 47-49.
- [3] Vanschen W.: Vom autogen Brennschneiden bis zum Elektronenstrahlbohren – Laserstrahlschweissen. Praktiker Schweissen und Schneiden. 1994, t. 46, nr 5, s. 236-246.
- [4] Franke J., Schulz W., Herzinger G: Abbrandstabilisiertes Laserstrahlbrennschneiden – ein neues Verfahren. Schweissen und Schneiden. 1993, t. 45, nr 9, s. 490-493.
- [5] Mirski Z., Granat K., Sapijaszko G.: Cięcie laserem molekularnym CO₂ blach elektrotechnicznych. Przegląd Spawalnictwa. 2003, nr 8-10, s. 139-141.
- [6] Andersen C.B.: Abrasive water jet cutting at how water pressure. Applications in the offshore industry. Riv. Ital. 1993, nr 2, s. 151-154.
- [7] Louis H., Pude F., Rad C. i in.: Abrasive water suspension jet technology fundamentals, application and developments. Weld. World. 2007, t. 51, nr 9-10, s. 11-16.

Przegląd Spawalnictwa Welding Technology Review Open Access Library

Przegląd Spawalnictwa uruchomił możliwość wolnego dostępu do pełnych treści artykułów w ramach Open Access Library. Artykuły w języku angielskim w formacie PDF zamieszczone są na stronie internetowej redakcji: www.pspaw.pl.

Autorów zainteresowanych publikacją w Open Access Library prosimy o przesyłanie artykułów w języku polskim i angielskim. W miesięczniku nastąpi publikacja w języku polskim, a tekst w języku angielskim zostanie zamieszczony na stronie internetowej.