

Dr inż. Wacław MUZYKIEWICZ

Mgr inż. Andrzej ŁACH

Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Metali Nieżelaznych, Kraków

Analiza możliwości wykonania gęstych perforacji blach niekonwencjonalnymi technikami wysokoenergetycznymi

Analysis of the possibility to make dense perforations in sheet metal using unconventional high-energy techniques

Streszczenie

W pracy dokonano krótkiego przeglądu niekonwencjonalnych, wysokoenergetycznych metod cięcia. Opisano przeprowadzone doświadczenia w zakresie wykonania perforacji (otworów o średnicy 3 mm w układzie heksagonalnym ze skokiem 6 mm) w blasze stalowej niskowęglowej o grubości 1 mm laserem (z gazem roboczym azotem i tlenem), strumieniem wody, tlenem i strumieniem plazmy. Dokonano oceny jakości uzyskanych perforacji oraz opisano wady wyrobów, powstające podczas cięcia. Stwierdzono, iż możliwe jest wykonanie dobrej jakości gęstych perforacji blach techniką cięcia laserowego oraz strumieniem wody. Na tym etapie, wyeliminowano z dalszych badań wycinanie tlenem i plazmą.

Abstract

This paper is a short review of unconventional, high-energy cutting techniques. In the experimental part a perforation has been done (3 mm diameter holes in hexagonal layout with 6 mm pitch) in 1 mm low-carbon steel sheet, with laser (nitrogen, oxygen), oxygen, water and plasma streams. Quality assessment of the perforations has been made as well as a description of flaws created in the cutting process. It has been found that it is possible to make good quality dense perforations in sheet metal with laser and water stream cutting techniques. On this stage oxygen and plasma stream cutting have been eliminated from further examination.

Słowa kluczowe: wysokoenergetyczne metody cięcia (laserem, wodą, gazowe), blacha perforowana

Key words: high-energy cutting techniques (laser, water, gas), perforated sheet metal

1. WSTĘP

Stosowanie nowoczesnych metod cyfrowej obróbki materiałów w praktyce produkcyjnej nie jest tendencją do zastępowania nią wszystkich innych konwencjonalnych sposobów obróbki, a chęcią spopularyzowania tej metody tam, gdzie jej cechy technologiczne są szczególnie korzystnie. Zasada ta, zaczerpnięta ze strony internetowej jednej z firm, była podstawą podjęcia badań, celem weryfikacji możliwości perforowania blach metodami niekonwencjonalnymi, wysokoenergetycznymi, mającymi coraz szersze zastosowanie do obróbki (cięcia) różnych materiałów, w tym metali. Dotychczas, podstawowym sposobem

wykonywania perforacji w blasze jest wykrawanie otworów na prasie szeroko perforującej, rzędowej lub rewolwerowej. W przeprowadzonych badaniach dokonano oceny wpływu różnych metod wykonywania perforacji na jakość i właściwości wyrobu oraz możliwości wykorzystania tych metod w przemyśle.

2. NIEKONWENCJONALNE METODY CIĘCIA

Istotą cięcia jest pokonanie spójności materiału. Proces ten wymaga wkładu energii. W zależności od rodzaju energii i sposobu

oddziaływania na obrabiany materiał można wyróżnić [1]:

- cięcie mechaniczne, gdy pracę cięcia wykonuje przemieszczające się narzędzie, wywierające nacisk na odkształcany materiał,
- cięcie wiązką promieni lasera, znajdujące coraz szersze zastosowanie przy cięciu blach,
- cięcie strumieniem wody, wypływającej z wąskiej dyszy pod ciśnieniem rzędu 4.000 atm.,
- cięcie gazowe (tlenem, plazmą), przy którym następuje topienie i utlenianie ciekłego materiału w strumieniu gazów.

W procesie mechanicznego przecięcia materiału, w żądanym przekroju trzeba doprowadzić do odpowiedniej koncentracji odkształceń. Uzyskuje się to najczęściej przez wywarcie na materiał odpowiedniego nacisku za pośrednictwem dwu elementów tnących. Rozróżnia się tutaj cięcie na różnego rodzaju nożycach (zależnie od ich rodzaju – wzdłuż linii prostej lub wytrasowanej linii innego kształtu) oraz wykrawanie przedmiotów na wykrojnikach (najczęściej wzdłuż linii zamkniętej dowolnego kształtu).

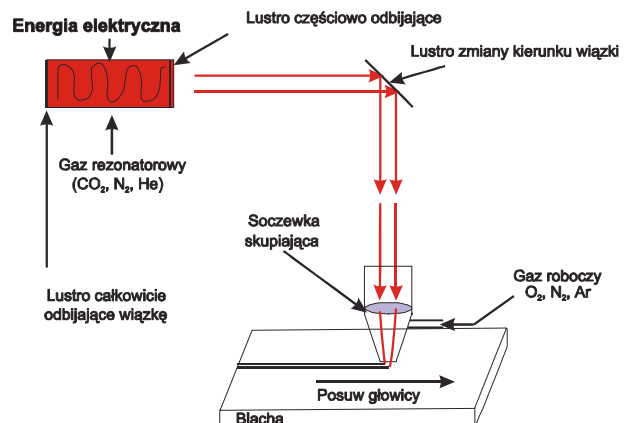
We wszystkich procesach cięcia termicznego oraz podczas cięcia strumieniem wody nie ma bezpośredniego kontaktu narzędzia z obrabianym przedmiotem, nie ma więc nacisku na ten przedmiot. Ma miejsce punktowe (lokalne) oddziaływanie medium tnącego.

2.1. Cięcie laserem

Przełomem w zastosowaniu laserów do obróbki metali było zbudowanie laserów molekularnych CO₂, mających moc rzędu 0,5÷10 kW i mogących pracować w sposób ciągły, który polega na nieprzerwanym generowaniu promieniowania, przez co czas jego oddziaływania na metal jest znacznie dłuższy [2]. Technika laserowa stosowana jest do cięcia blach o grubości do 6 mm [1]. Nowoczesne lasery tną z prędkością do 25 m/min, zaś posuw jałowy wynosi do 55 m/min.

Cięcie laserowe charakteryzuje mała strefa wpływu ciepła, wąska szczelina cięcia, niewielka ilość wprowadzonego ciepła, minimalna deformacja, a także czyste i prostopadłe krawędzie oraz bardzo małe nierówności powierzchni rozdzielenia [3,4]. Warunkiem uzyskania dobrej jakości cięcia i utrzymania tolerancji wymiarów ciętych elementów konstrukcyjnych jest dokładne prowadzenie strumienia tnącego w połączeniu z dobrą, stabilną maszyną do cięcia o dużej odporności na drgania i o dobrej powtarzalności ruchów roboczych.

Najczęściej stosowanym rodzajem lasera jest laser CO₂ (rys. 1). Charakteryzuje się on dużą mocą wyjściową i wysoką sprawnością procesu. Obecnie dostępne są lasery o mocy do 25 kW. W rezonatorze CO₂ stosowane są mieszanki gazowe, składające się z dwutlenku węgla, azotu i helu, przy czym charakterystyczne promieniowanie laserowe wytwarzane jest tylko z wyładowania w gazie CO₂.



Rys. 1. Współdziałanie gazów rezonatorowych i roboczych przy cięciu laserem CO₂ [5]

Fig. 1. Joint action of resonator and working gases in CO₂ laser cutting [5]

Do procesów cięcia, opisywania, znakowania, spawania miedzi i aluminium, a także do procesów powierzchniowych, takich jak napawanie, stopowanie, przetapianie, obróbka cieplna, stosowane są lasery krystaliczne Nd:YAG (Neodym: Itr–Aluminium–Granat).

Coraz większe zastosowanie w produkcji przemysłowej mają lasery excimerowe (lasery gazowe w zakresie UV) [6,7], mające główne zastosowanie w medycynie. Lasery te pracują w zakresie długości fal 193÷351 nm.

Parametry procesu cięcia laserowego metali oraz jakość powierzchni rozdzielania (jakość wyrobu) zależą od metody cięcia tą techniką, wśród których należy wymienić:

- cięcie przez wytapianie szczeliny,
- cięcie przez spalanie,
- cięcie sublimacyjne.

W przypadku *cięcia przez wytapianie* obrabiany metal zostaje lokalnie roztopiony i wydmuchany przy pomocy doprowadzonego do strumienia laserowego oczyszczonego gazu obojętnego (azotu). Maksymalna szybkość cięcia wzrasta z wydajnością lasera i spada w przybliżeniu odwrotnie proporcjonalnie do grubości blachy oraz ciepła topnienia materiału. Przy danej wydajności lasera, czynnikiem ograniczającym jest ciśnienie gazu w szczelinie oraz przewodnictwo cieplne obrabianego materiału. Szczególnie dobre wyniki daje cięcie ciśnieniowe stali nierdzewnych. *Laserowe cięcie poprzez spalanie* różni się od poprzedniej metody tym, że jako gazu wspomagającego proces cięcia używa się tlenu lub mieszaniny gazów zawierających tlen, który oddziałuje na metal rozgrzany promieniem lasera do temperatury zapłonu. Spalanie materiału w strumieniu tlenu generuje dodatkową energię cieplną, która wyraźnie przyspiesza proces cięcia. Uzyskiwane w tym przypadku prędkości cięcia są znacznie większe niż podczas cięcia przez wytapianie przy użyciu lasera o tej samej mocy. Jednak proces ten może prowadzić do pogorszenia jakości ciętej powierzchni. Powstawać mogą szersze szczeliny, głębsze nierówności i strefy wpływu temperatury, gorsza może być jakość krawędzi po cięciu. Jest to najczęściej stosowana metoda cięcia laserowego, standardowa dla stali węglowych. Materiał obrabiany podczas *laserowego cięcia sublimacyjnego* w obszarze szczeliny cięcia ulega odparowaniu w atmosferze gazu obojętnego. Grubość blach nie powinna zasadniczo przekraczać średnicy strumienia, gdyż w przeciwnym razie powstająca podczas cięcia para materiałowa ulegnie skropleniu (kondensacji) na ściankach szczeliny i w konsekwencji ponownie ją zamknie. Energia odparowania w przypadku laserowego cięcia sublimacyjnego jest znacznie większa niż energia konieczna do wytopienia materiału, dlatego prędkość cięcia sublimacyjnego jest

mniejsza od prędkości cięcia laserowego przez wytapianie.

2.2. Cięcie strumieniem wody

Cięcie wodą jest procesem ubytkowym. Odbywa się przez skierowanie bardzo wąskiego strumienia wody pod wysokim ciśnieniem, który skupia całą swoją energię na niewielkiej powierzchni materiału ciętego, usuwa materiał na swojej drodze i dokonuje przecięcia. Energia kinetyczna strumienia jest przekształcana w pracę dekohezji materiału. Szerokość szczeliny po cięciu wynosi 0,2 do 1,5 mm, a szybkość strumienia wody u wylotu dyszy dochodzi do 1.000 m/s. Uzyskiwane ciśnienie wynosi około 400 MPa, w zależności od użytej pompy. Cięcie wodą zdecydowanie różni się od pozostałych metod tym, że odbywa się na zimno – temperatura procesu nie przekracza 40 °C [8].

Technologia cięcia wodą stosowana jest do obróbki prawie wszystkich materiałów technicznych. Czysty strumień wody wykorzystuje się do cięcia materiałów miękkich, łatwych do obróbki, takich jak gumy, włókniste materiały kompozytowe, tworzywa piankowe, masy celulozowe itp. Dodanie do wody środka ściernego umożliwia cięcie materiałów twardych, trudnych do obróbki, takich jak stal, metale i stopy z metali nieżelaznych (miedź, brąz, mosiądz, stopy aluminium, tytanu i inne), kamienie naturalne, szkło, ceramika, materiały kompozytowe. Grubość materiału ciętego, w przypadku metali może dochodzić do 80 mm, a w przypadku tworzyw sztucznych do 150 mm.

Cięcie strumieniem wody jest technologią stosunkowo nową. Dużym krokiem w jej rozwoju było skonstruowanie w 1983 roku pierwszej maszyny tnącej wodą z dodatkiem środków ściernych. Rozwiązanie to umożliwiło cięcie większości materiałów o znacznej grubości. Wiele gałęzi przemysłu, w tym lotniczy, samochodowy i metalowy, wykorzystuje maszyny do cięcia wodą ze względu na niepodważalne zalety tego procesu [9], wśród nich:

- uniwersalność zastosowania – możliwość cięcia za pomocą jednego urządzenia nieograniczonej ilości różnych materiałów,
- wspomniany już, brak bezpośredniego styku obrabianego przedmiotu z narzędziem,
- brak stref oddziaływania cieplnego – nie obserwuje się w związku z tym zmian struktury materiału, hartowania miejscowego, naprężeń wewnętrznych materiału, indukowania mikropęknięć,
- bardzo dobra jakość powierzchni rozdzielania (krawędzi ciętej),
- łatwość automatyzacji procesu i sterowania (integracji z robotami i systemami komputerowymi),
- duża prędkość cięcia (do kilkudziesięciu m/min) i wysoka wydajność,
- ekologiczność procesu (cięcie odbywa się wodą i piaskiem).

2.3. Cięcie tlenem i strumieniem plazmy

Rodzaje napędów oraz konstrukcje przecinarek tlenowych i plazmowych są niemal identyczne. Oznacza to, że maszyna po przebrojeniu może ciąć tlenem lub plazmą. Przecinarki tlenowe służą głównie do cięcia stali węglowych i niskostopowych, zaś plazmą można ciąć, oprócz wymienionych materiałów, stale stopowe oraz metale i stopy żelazne [10]. Cięcie gazowe (tlenem, plazmą) pozwala ciąć płyty do grubości ponad 300 mm [1] według dowolnego rozkroju, zaprogramowanego na pulpicie sterowniczym przecinarki.

W wyniku nagrzewania metalu podczas cięcia tą metodą należy spodziewać się dużej ilości zgorzeliny, a skutek zetknięcia nagrzanego materiału z tlenem, także utlenionej powierzchni cięcia [11].

Cięcie tlenem

Przecinarki tlenowe konstruowane są tak, aby umożliwić wypalanie wykrojów w blasze z dużą wydajnością i dokładnością, bez dużych kosztów inwestycyjnych (są wielokrotnie tańsze od lasera). Dokładność cięcia wynosi 1 mm, przy czym przy dużych szybkościach

cięcia oraz przy cienkich blachach jakość powierzchni rozdzielania ulega pogorszeniu.

Urządzenia te posiadają lekką konstrukcję portalową (z profili zamkniętych), pozwalającą na budowanie maszyn o dowolnej długości i szerokości (od 1,5 do 7 metrów). Napęd maszyny może być jednostronny lub dwustronny. Serwo-silniki prądu stałego umożliwiają ekstremalnie krótkie czasy przyspieszania i hamowania maszyny. Przecinarki tlenowe tną z prędkością od 200 do 600 mm/min, w zależności od grubości blachy. Możliwe jest przecinanie materiałów o grubości nawet 100 mm, przy czym trudno jest przy dużych grubościach uzyskać prostopadłość płaszczyzny cięcia do powierzchni blachy (płyty).

Przecinarki tlenowe mogą być sterowane komputerowo lub fotooptycznie. Parametry ich pracy można płynnie (w czasie rzeczywistym) regulować z pulpitu sterowniczego podczas wypalania. Zastosowanie specjalnych palników umożliwia cięcie pod lustrem wody, co eliminuje zapylenie powstające podczas procesu [10].

Cięcie strumieniem plazmy

Obróbkę plazmową można zakwalifikować do metod specjalnych, w skład których wchodzi techniki umożliwiające tworzenie kształtu „atom po atomie”, jak w metodach galwanicznych i chemicznych lub fizycznego osadzania próżniowego. Obejmują one także różne sposoby napyłania, w których materiał wsadowy jest topiony przez bezpośrednie ogrzewanie w strumieniu plazmy oraz napyłany na podłoże. Są to metody stosowane do produkcji małej liczby niewielkich części, np. dla przemysłu lotniczego [12].

Cięcie plazmą polega na działaniu na metal strumienia gazu o wysokiej temperaturze (około 10.000 °C) i wysokim stopniu jonizacji. Strumień plazmy wytwarza się w specjalnym palniku. Najczęściej stosowanymi gazami są argon i azot. Maszyny plazmowe wykorzystuje się do cięcia blach, nagrzewania powierzchni i jej hartowania, a także natryskiwania powierzchni wybranym materiałem, który w postaci proszku jest wprowadzany w strumień plazmy [2]. Obecnie, szeroko

stosowane są wąskostrumieniowe urządzenia plazmowe do cięcia palnikami maszynowymi lub ręcznymi, w tym również do żłobienia plazmą wszystkich elektrycznie przewodzących materiałów.

O dużej popularności tej technologii cięcia zdecydowały jej zalety: cięcie wszystkich elektrycznie przewodzących materiałów, wąskie szczeliny cięć i związane z tym niewielkie straty materiału, wysoka jakość obu przeciętych krawędzi, płynne nacinanie i przebijanie, możliwość zastosowania palników chłodzonych wodą.

3. CEL I ZAKRES BADAŃ

Różnorodne zastosowania blach perforowanych zależą nie tylko od rodzaju i własności samej blachy oraz typu perforacji, ale i od sposobu wykonania otworów. Rozpoznanie możliwości zastosowania określonej techniki – w szczególności, niekonwencjonalnych metod wysokoenergetycznych, opisanych w rozdziale 2 - do wycięcia gęstej siatki otworów i ocena uzyskanego rezultatu, były głównym celem prezentowanych badań.

Zadanie sprowadzało się do praktycznej weryfikacji możliwości zastosowania wykrawania laserem (w osłonie tlenu i azotu), strumieniem wody, tlenem i strumieniem plazmy do wykonania gęstej perforacji blachy stalowej niskowęglowej o grubości 1 mm otworami okrągłymi o średnicy 3 mm i skoku 6 mm w układzie heksagonalnym (Ho3s6). Eksperymenty przeprowadzono w pięciu różnych firmach z całej Polski:

- Autosan S.A. – Sanok,
- WSK PZL – Rzeszów,
- Wafro-Met Sp. z o.o. – Nowa Dęba,
- Wafro Sp. z o.o. – Brzozów,
- Water Jet Sp. z o.o. – Gdynia.

4. WYNIKI BADAŃ

Perforacje poszczególnymi niekonwencjonalnymi, wysokoenergetycznymi technikami zostały wykonane na podanych niżej maszynach:

- cięcie laserem (gaz wspomagający cięcie – azot): PRIMA ELEKTRONIK (Laserdyne 780, Beamdirector 2.500 W)
Cięcie odbywało się przy posuwie roboczym 600 mm/min i mocy 790 W.
- cięcie laserem (gaz wspomagający cięcie – tlen): BYSTRONIK LASER AG (BTL – 3.000 W)
Cięcie odbywało się przy posuwie roboczym 7.200 mm/min i mocy 2.850 W.
- cięcie wodą: WATER JET SWEDEN (NC 400)
- cięcie tlenem i plazmą: ECKERT, zestaw BL-2/2000

Klasyczne wykrawanie otworów prowadzono na prasie szeroko perforującej FINN POWER 2000 w firmie Perfopol Sp. z o.o., Starachowice.

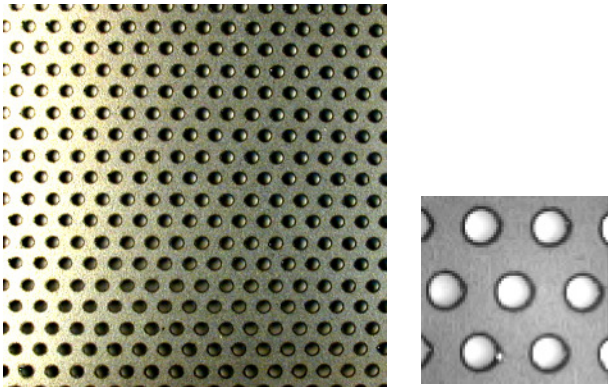
4.1. Makroskopowy opis wykonanych perforacji

Obserwacje makroskopowe wykonano przy użyciu mikroskopu stereoskopowego Zeiss Stemi 2000-C w celu identyfikacji błędów cięcia badanymi metodami.

Z obserwacji fotografii próbek, zamieszczonych na rys. 2-6 w dwu różnych powiększeniach wynika, że dobrą jakość perforacji i zadowalającą dokładność wykonania uzyskano metodami wycinania laserowego, zarówno w atmosferze azotu jak i tlenu jako gazów wspomagających (rys. 2 i 3) oraz techniką cięcia strumieniem wody (rys. 4). Obraz perforacji uzyskanych tymi metodami jest podobny do perforacji wykonanej tradycyjnie, metodą wykrawania na prasie [14]. Obrabiana blacha, w przypadku cięcia laserowego, uległa lekkiej deformacji. Zjawisko to nie wystąpiło podczas cięcia wodą. Miała natomiast miejsce w tym przypadku korozja powierzchni blachy po cięciu.

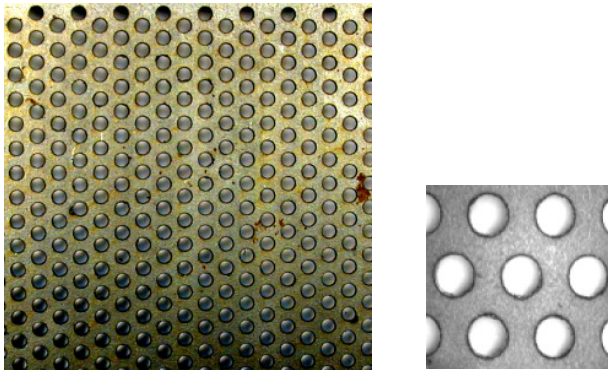
Wycinanie tlenem (rys. 5) i plazmą (rys. 6), w dostępnych na tym etapie badań warunkach, nie dało zadowalających wyników. Wystąpiły duże nadtopienia oraz przegrzanie materiału w obrębie otworów, co doprowadziło do przebarwień obrabianego materiału, rozka-

librowania otworów oraz bardzo dużej deformacji blachy.



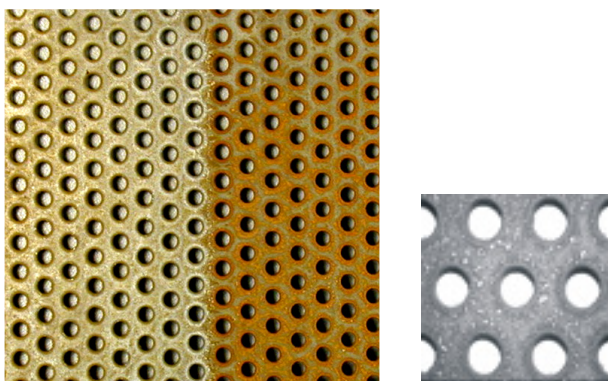
Rys. 2. Perforacja wykonana laserem
(gaz wspomagający – azot)

Fig. 2. Perforation made with nitrogen laser



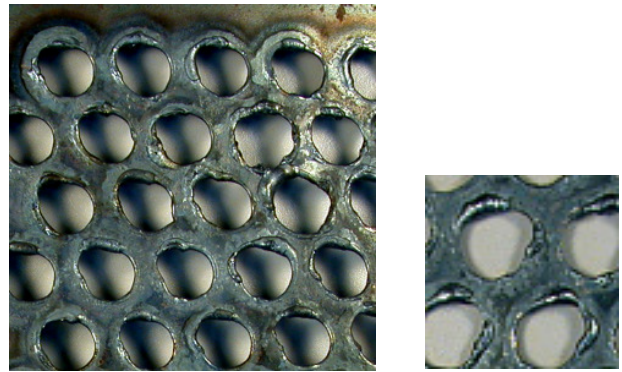
Rys. 3. Perforacja wykonana laserem
(gaz wspomagający – tlen)

Fig. 3. Perforation made with oxygen laser



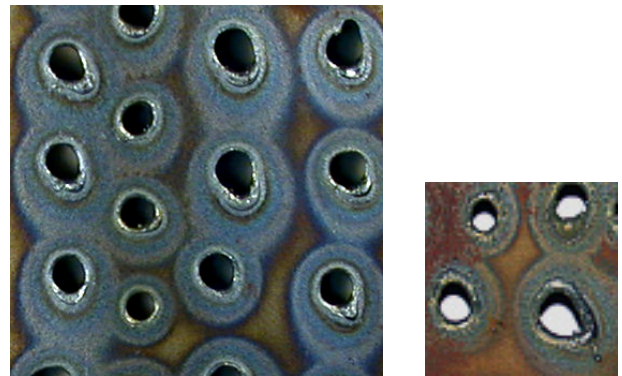
Rys. 4. Perforacja wykonana techniką cięcia
strumieniem wody

*Fig. 4. Perforation made with water stream
cutting technique*



Rys. 5. Perforacja wykonana przecinarką tlenową

Fig. 5. Perforation made with oxygen cutter



Rys. 6. Perforacja wykonana przecinarką plazmową

Fig. 6. Perforation made with plasma cutter

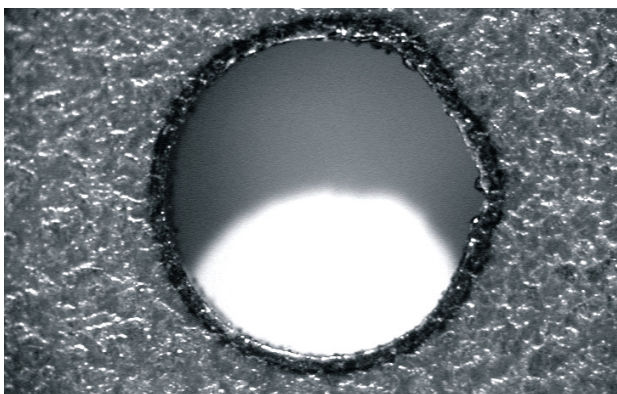
Otwory perforacji miały średnicę 3 mm, a wycinane były w układzie heksagonalnym, ze skokiem 6 mm (w nazewnictwie produkcyjnym: otwory cylindryczne układ 60°). Dokładność wycięcia otworów można analizować jedynie w przypadku trzech pierwszych technologii. I tak, wynosiła ona: dla cięcia laserem z azotem – 0,16 mm, dla cięcia laserem z tlenem – 0,06 mm, a w przypadku cięcia wodą – 0,07 mm.

4.2. Wady wyrobów powstające podczas procesów cięcia

Wykonane obserwacje na mikroskopie optycznym Nikon Epiphot 300, wyposażonym w cyfrową kamerę Nikon DS-5, pozwoliły między innymi na obserwację wad wyrobów, które powstały podczas analizowanych procesów cięcia. Najczęściej spotykane wady zilustrowano na rys. 7-13. Są to:

- nadtopienia w obrębie linii cięcia (rys. 7-9),
- nawisy metalowe, tzw. grat (rys. 10-12).

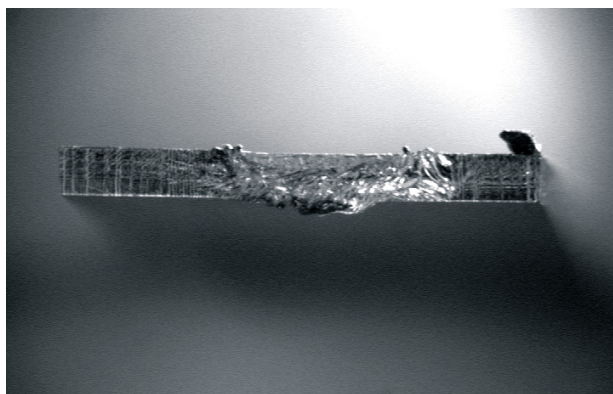
Nadtopienie w obrębie linii cięcia powstaje podczas zatrzymania wiązki, na przykład przy wpalaniu (rys. 8). Trudność zapobiegania nadtopieniom wynika stąd, że nie jest to wada, która powtarza się periodycznie w określonych warunkach. Próbę jej wyeliminowania powinno się podejmować już na etapie programowania, poprzez właściwe zaprojektowanie ścieżki wpalenia oraz wyjścia z linii cięcia. Nadtopienia występują głównie wówczas, gdy jest problem z przebiciem się wiązki laserowej przez materiał. Ważna jest również prędkość cięcia. Przy zbyt dużej prędkości gaz techniczny może nie wydmuchać roztopionego metalu i cięcie będzie przerwane. Ponowne wpalenie się spowoduje uszkodzenie powierzchni. Z kolei, przy zbyt małej prędkości powierzchnia cięcia może zostać przegrzana, co prowadzi do zmian w strukturze materiału.



Rys. 7. Czarna obwódka powstała przy cięciu laserem
Fig. 7. Black rim created during laser cutting

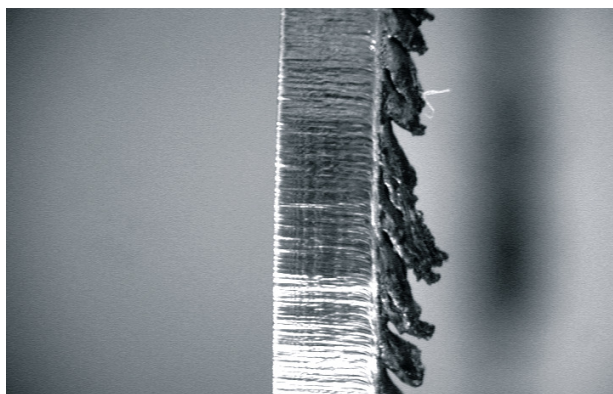


Rys. 8. „Wulkan” powstały podczas wpalania się wiązki laserowej (w wyniku trudności z przepaleniem blachy)
Fig. 8. "Volcano" created while the laser beam was burning in

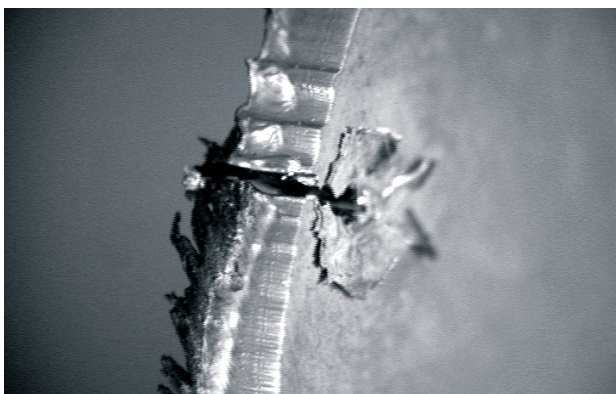


Rys. 9. Nadtopienie ścianki elementu na dużej długości cięcia
Fig. 9. Partial melting of the element wall on long cutting length

Powstające podczas cięcia laserowego nawisy metalowe, zwane również gratem, są zakrzepniętym metalem, osadzającym się na blasze od strony wyjścia wiązki laserowej przy powierzchni cięcia (rys. 10-12). Można je w znacznym stopniu wyeliminować, pokrywając powierzchnię blachy przed cięciem specjalnym płynem, który utrudnia „przyklejanie się” wydychanego roztopionego metalu do pomalowanej dolnej części blachy.



Rys. 10. Nawis metalowy przy wyjściu wiązki laserowej
Fig. 10. Metal overhang on the laser beam exit



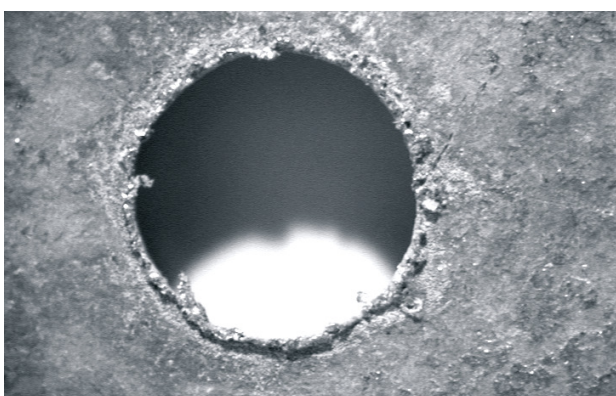
Rys. 11. Nawis metalowy przy wyjściu wiązki oraz nadpalenie (wulkan) przy wejściu wiązki laserowej

Fig. 11. Metal overhang on the exit and burning (volcano) on the entrance of the laser beam



Rys. 12. Nawis metalowy w dużym powiększeniu

Fig. 12. Metal overhang in big magnification



Rys. 13. Grat występujący w elemencie wyciętym strumieniem wody

Fig. 13. Fin found in water stream cut element

Nieco inaczej wygląda typowa wada w procesie cięcia wodą (rys. 13). Są to zadziory – bardzo ostre, wyraźnie wyczuwalne pod palcami oraz dobrze trzymające się blachy macierzystej. W tym sensie są one podobne do zadziorów powstających w procesie wykra-

wania. Zapobieganie im jest trudne, jedynie można je usunąć w sposób mechaniczny, na przykład przez zeszlifowanie [13].

Grat, pozostający przy krawędzi cięcia w badanych technologiach można by scharakteryzować następująco: laser (azot) – śladowy, wyczuwalne bardzo małe kropelki zakrzepniętej stali; laser (tlen) – minimalny, wyczuwalny pod palcami po stronie wyjścia wiązki; woda – bardzo wyraźny, wyczuwalny i widoczny gołym okiem. Minimalny grat występuje również w przypadku cięcia tlenem i plazmą.

Analizując wygląd linii cięcia można zauważyć, że po cięciu laserem z użyciem azotu otwory mają czarną obwódkę (rys. 7) i niemal w każdym otworze widoczny jest punkt zakończenia cięcia. W otworach wyciętych laserem z użyciem tlenu znajdują się maleńkie kropelki zakrzepniętej stali. Kształt otworów wyciętych strumieniem wody jest lekko eliptyczny, a ich ścianki nieznacznie zukosowane.

5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania potwierdzają, że możliwe jest wykonanie dobrej jakości gęstych perforacji blach techniką cięcia laserowego oraz strumieniem wody. Wycinanie tlenem i plazmą wymagałoby dalszych badań (optymalizacji parametrów procesu).

Niekonwencjonalne metody cięcia mają szereg zalet, możliwych do wykorzystania przy produkcji blach perforowanych. Należy do nich duża elastyczność każdej z tych technologii (łatwość zmiany układu otworów), możliwość wykonania perforacji o dowolnym kształcie, także układów przestrzennych oraz możliwość cięcia różnorodnych materiałów.

W przypadku dużych serii (zwłaszcza typowych układów regularnych otworów), wykonanie perforacji tymi metodami będzie droższe oraz znacznie wolniejsze niż w procesie wykrawania na prasach. Ale już w przypadku niewielkich ilości (zwłaszcza złożonych układów i kształtów otworów) technologie te, tak pod względem kosztów jak i czasu, mogą okazać się bardzo konkurencyjne, a nawet niezastąpione.

Analiza uzyskanych wyników, przeprowadzona pod kątem makroskopowej oceny jakości wykonanych perforacji, pozwoliła wyeliminować z dalszych badań blachę perforowaną tlenem i plazmą (wyrób nie spełnia w najmniejszym stopniu wymagań jakościowych). Dalszym badaniom własności mechanicznych oraz badaniom metalograficznym poddane zostały blachy, których perforację wykonano metodą cięcia laserowego w osłonie tlenu i azotu oraz strumieniem wody. Wyniki zostaną porównane z rezultatami, uzyskanymi dla blach perforowanych tradycyjnie – poprzez wykrawanie otworów na prasie szeroko perforującej.

LITERATURA

- [1] Marciniak Z.: *Konstrukcja tłoczników*. Ośrodek Techniczny A. Marciniak Sp. z o.o., Warszawa 2002
- [2] Przybyłowicz K., Przybyłowicz J.: *Materiałoznawstwo w pytaniach i odpowiedziach*. WNT, Warszawa 2000
- [3] Grosman F.: *Tendencje rozwoju obróbki plastycznej metali*. *Obróbka Plastyczna Metali*, 2000, nr 3, 7-11
- [4] Kopp R., Dürr O.: *Innovative metal forming processes to manufacture future sheet metal products*. *Advanced Technology of Plasticity*, Vol. 1, 1999, 69-80
- [5] Materiały firmy MESSER, Messer Polska Sp. z o.o., Chorzów
- [6] Dziadoń A., Konieczny M., Grajewski M.: *Wzbogacanie warstwy wierzchniej stopu AlMg₃ przez przetop laserowy niklowo-krzemowego osadu elektrolitycznego*. *Inżynieria Materiałowa*, 2003, nr 2, 84-88
- [7] Klimper A., Kubicki J., Janicki D., Burdek M., Marczak Z.: *Przetapianie laserowe warstwy wierzchniej walców z żeliwa sferoidalnego stopowego*. *Inżynieria Materiałowa*, 2003, nr 2, 88-94
- [8] Flow Polska.: *Technologia cięcia strumieniem wody*. *Mechanik*, 2003, nr 4, 214-216
- [9] Szymańska E.: *Postęp w technologii cięcia strumieniem wodnym i ścierno-wodnym*. *Obróbka Plastyczna Metali*, 2000, nr 5, 55-59
- [10] *Przecinarki serii YUN*. Materiały Zakładu Doświadczalnego Instytutu Spawalnictwa, Gliwice
- [11] Kajzer S., Kozik R., Wusatowski R.: *Wybrane zagadnienia z procesów obróbki plastycznej metali*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997
- [12] Ashby M.F.: *Dobór materiałów w projektowaniu inżynierskim*. WNT, Warszawa 1998
- [13] Kwaśniewski B.: *Nowości w cięciu i obróbce plastycznej blach*. *Obróbka Plastyczna Metali*, 1997, nr 2, 40-43
- [14] Muzykiewicz W.: *Własności blach perforowanych*. Materiały XII Konferencji Sprawozdawczej Komitetu Metalurgii PAN „METALURGIA '98”, Krynica, 1998, 353-358

Strony internetowe:

www.messer.pl
www.laser.bielsko.pl
www.waterjet.se
www.flowgmbh.com
www.cuprum.com/esa-eckert
www.kjellberg.de

Praca sfinansowana w ramach badań statutowych — umowa nr 11.11.180.250.

Autorzy opracowania pragną podziękować Firmom, wymienionym w artykule, za umożliwienie wykonania perforacji na urządzeniach, będących w ich dyspozycji.