

Dr inż. Wacław MUZYKIEWICZ

Mgr inż. Andrzej ŁACH

Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Metali Nieżelaznych, Kraków

# Analiza wpływu techniki perforacji blach na jakość i właściwości wyrobu

## *Analysis of the influence of the sheet metal perforation technique on the quality and the properties of the product*

### **Streszczenie**

W artykule przedstawiono wyniki badań własności mechanicznych blachy stalowej niskowęglowej o grubości 1 mm, perforowanej laserem (z gazem roboczym azotem i tlenem), strumieniem wody i metodą cięcia mechanicznego (wykrawania). Omówiono wpływ techniki wykonania perforacji na jakość i właściwości blachy na przykładzie perforacji z heksagonalnym układem otworów okrągłych, ze skokiem równym dwóm średnicom otworu. Scharakteryzowano strefy wpływu ciepła w procesie cięcia laserowego oraz mikrostrukturę materiału ciętego strumieniem wody.

### **Abstract**

*This paper shows the results of the examination of the mechanical properties of the 1 mm thick low-carbon steel sheet perforated with laser (nitrogen, oxygen), water jet and mechanical cutting. Influence of the perforation technique on the quality and the properties of the sheet has been discussed on the example of the test sheet with round perforations in hexagonal layout with the skip equal to the size of two diameters of the hole. Heat influence zones in the laser cutting as well as microstructure of the material cut with water jet have been characterised.*

**Słowa kluczowe:** blacha perforowana, cięcie laserem, cięcie strumieniem wody, wykrawanie mechaniczne, własności mechaniczne blach

**Key words:** perforated sheet metal, laser cutting, water jet cutting, mechanical cutting, mechanical properties of sheet metal

## **1. WSTĘP**

Podstawowym sposobem wykonywania perforacji w blasze jest wykrawanie otworów na prasie szeroko perforującej, rzędowej lub rewolwerowej [1-4]. W pracy [5] dokonano, na podstawie danych literaturowych i informacji technicznych, zamieszczonych w internecie, przeglądu wysokoenergetycznych metod cięcia, które znajdują coraz szersze zastosowanie do obróbki metali. Praktyczna weryfikacja efektów perforowania blach tymi niekonwencjonalnymi metodami wykazała możliwość wykonywania dobrej jakości gęstych perforacji techniką cięcia laserowego (zarówno z gazem roboczym azotem jak i tlenem) oraz strumieniem wody [5]. Z dalszych badań wyeliminowano wycinanie

tlenem i plazmą. Metody te, w tym konkretnym zastosowaniu, wymagałyby szerszych badań, optymalizujących parametry procesu cięcia.

## **2. CEL I ZAKRES BADAŃ**

Celem prezentowanych badań była ocena wpływu techniki wykonania perforacji na jakość i własności mechaniczne wytworzonych blach perforowanych. Przeprowadzono je na blasze stalowej niskowęglowej o grubości 1 mm i następującej charakterystyce mechanicznej:  $R_{02} = 202,5$  MPa,  $R_m = 313,8$  MPa,  $A_{80} = 39,6$  % i  $A_r = 26,6$  %, anizotropia normalna  $r = 1,5$  i płaska  $\Delta r = 0,79$  ( $r_p = 1,72$ ), wykładnik umocnienia  $n = 0,24$ .

Badaniom własności mechanicznych oraz badaniom metalograficznym poddane zostały blachy, których perforację wykonano metodą cięcia laserowego w osłonie tlenu i azotu oraz strumieniem wody. Wyniki zostały porównane z rezultatami, uzyskanymi dla blach perforowanych tradycyjnie – poprzez wykrawanie otworów na prasie szeroko perforującej FINN POWER 2000 [5]. Badania przeprowadzono dla perforacji z heksagonalnym (H) układem otworów okrągłych (o) o średnicy 3 mm i skoku (s) równym 6 mm (skok – parametr siatki, równy odległości pomiędzy środkami otworów w kierunku ich najgęstszego upakowania). Przyjęto następujące oznaczenie takiej perforacji: Ho3s6.

### 3. WYBRANE WYSOKOENERGETYCZNE METODY CIĘCIA

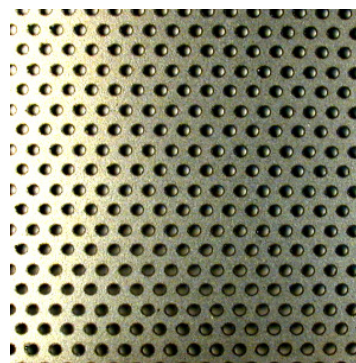
W odróżnieniu od klasycznego cięcia mechanicznego, we wszystkich procesach cięcia termicznego i podczas cięcia strumieniem wody nie ma bezpośredniego kontaktu narzędzia z obrabianym przedmiotem. Ma natomiast miejsce punktowe (lokalne) oddziaływanie medium tnącego.

#### 3.1. Cięcie laserem

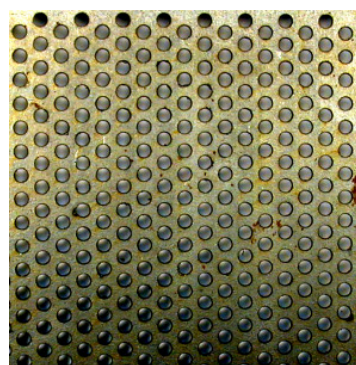
Cięcie laserowe charakteryzuje mała strefa wpływu ciepła, wąska szczelina cięcia, niewielka ilość wprowadzonego ciepła, minimalna deformacja, a także czyste i prostopadłe krawędzie oraz bardzo małe nierówności powierzchni rozdzielania [6,7]. Warunkiem uzyskania dobrej jakości cięcia i utrzymania tolerancji 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 narzędzia.

Parametry procesu cięcia laserowego oraz jakość powierzchni rozdzielania zależą od metody cięcia tą techniką, wśród których należy wymienić cięcie przez wytapianie szczeliny, cięcie sublimacyjne i cięcie przez spalanie. W przypadku cięcia przez wytapianie obrabiany metal zostaje lokalnie roztopiony

i wydmuchany przy pomocy doprowadzonego do strumienia laserowego oczyszczonego gazu obojętnego (azotu). Materiał obrabiany podczas laserowego cięcia sublimacyjnego w obszarze szczeliny cięcia ulega odparowaniu w atmosferze gazu obojętnego. Najczęściej stosowaną metodą cięcia laserowego (standardową dla stali węglowych) jest laserowe cięcie poprzez spalanie. Różni się ono od poprzednich metod 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 przyspiesza proces cięcia. Zjawisko to może jednak prowadzić do pogorszenia jakości ciętej powierzchni. Powstawać mogą szersze szczeliny, głębsze nierówności i strefy wpływu ciepła, gorsza może być też jakość krawędzi po cięciu.



(a)



(b)

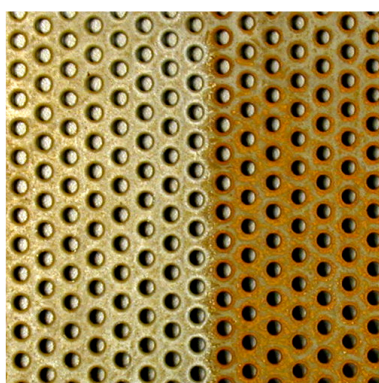
Rys. 1. Perforacja wykonana laserem: a) gaz wspomagający – azot, b) gaz wspomagający – tlen [5]

Fig. 1. Perforation made with nitrogen (a) and oxygen (b) laser [5]

W omawianych badaniach własnych, cięcie laserem z azotem jako gazem wspomagającym było przeprowadzone na maszynie PRIMA ELEKTRONIK (Laseryne 780, Beamdirector 2.500 W). Cięcie odbywało się przy posuwie roboczym 600 mm/min i mocy 790 W. Z kolei, cięcie laserem z tlenem jako gazem wspomagającym przeprowadzono na maszynie BYSTRONIK LASER AG (BTL – 3.000 W). Cięcie odbywało się przy posuwie roboczym 7.200 mm/min i mocy 2.850 W. Przykładowe wyroby przedstawiono na rys. 1.

### 3.2. Cięcie strumieniem wody

Cięcie wodą jest procesem ubytkowym. Odbywa się przez skierowanie na materiał cięty bardzo wąskiego strumienia wody pod wysokim ciśnieniem, który skupia całą swoją energię na niewielkiej powierzchni, usuwając materiał na swojej drodze i dokonuje przecięcia. Energia kinetyczna strumienia jest przekształcana w pracę dekohezji materiału. Cięcie wodą zdecydowanie różni się od pozostałych metod tym, że odbywa się na zimno – temperatura procesu nie przekracza 40 °C [8]. Dodanie do wody środka ściernego umożliwia cięcie materiałów twardych, trudnych do obróbki, takich jak stal, metale i stopy nieżelazne, kamienie naturalne, szkło, ceramika, materiały kompozytowe [9].



Rys. 2. Perforacja wykonana techniką cięcia strumieniem wody [5]

Fig. 2. Perforation made with water jet cutting technique [5]

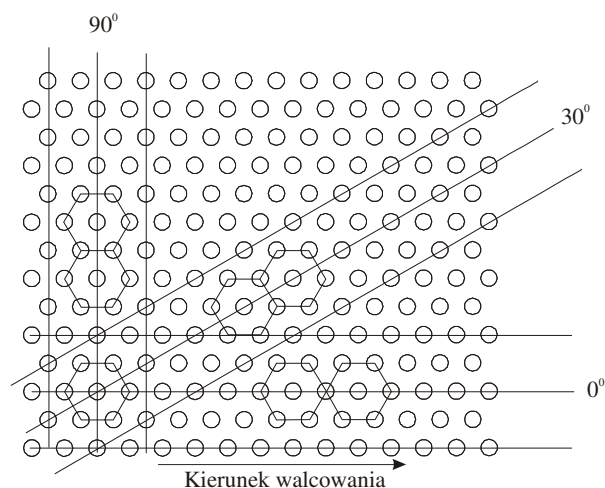
Na rys. 2 pokazano przykładowy wynik perforacji blachy wodą, przeprowadzonej na maszynie WATER JET SWEDEN (NC 400).

## 4. PROCEDURA I WYNIKI BADAŃ

### 4.1. Własności mechaniczne

Własności mechaniczne wyznaczono na podstawie statycznej próby rozciągania, przeprowadzonej na maszynie wytrzymałościowej INSTRON z komputerową rejestracją wyników. Prędkość odkształcenia wynosiła  $2,4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . Wyznaczono umowną granicę plastyczności  $R_{0,2}$  i wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$  oraz wydłużenie względne całkowite  $A_{80}$  i równomierne  $A_r$  blachy perforowanej. W każdym przypadku wynik końcowy jest średnią arytmetyczną pomiarów, wykonanych na trzech próbkach z każdego spośród badanych kierunków. Badano własności blach w kierunku najgęstszego upakowania otworów ( $0^\circ$ ) i w kierunkach do niego prostopadłych ( $90^\circ$  i  $30^\circ$ ) (rys. 3).

W celu zapewnienia symetrii rozciąganych próbek z blach perforowanych, przyjęto warunek, aby oś symetrii próbki przebiegała przez środek otworów z danego charakterystycznego kierunku perforacji, a krawędzie boczne by przecinały otwory pośrodku (rys. 3). Spełnienie tego warunku wymagało zróżnicowania szerokości pasków do rozciągania. Dla kierunku ( $0^\circ$ ) wynosiła ona 20,78 mm, dla kierunków poprzecznych ( $90^\circ$  i  $30^\circ$ ) 18 mm.



Rys. 3. Kierunki badania ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $90^\circ$ ) i schematy wycięcia próbek do wyznaczenia własności mechanicznych blach perforowanych Ho3s6

( $0^\circ$  – kierunek najgęstszego upakowania otworów;  $30^\circ$ ,  $90^\circ$  – kierunki do niego prostopadłe)

Fig. 3. Directions of the examination ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $90^\circ$ )

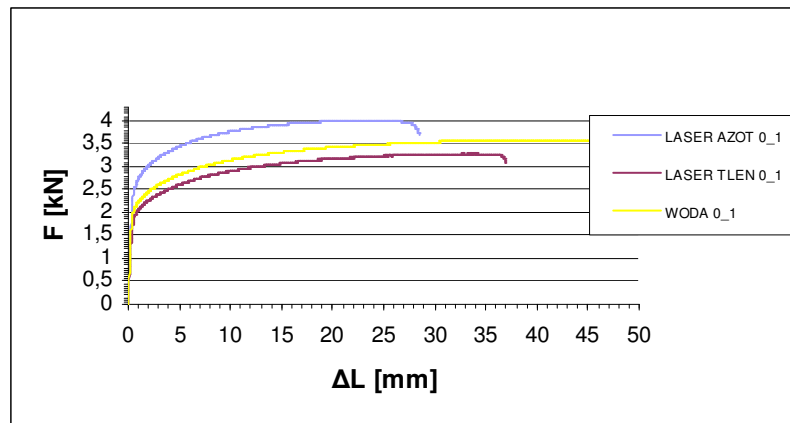
and sample cutting diagrams for the assessment of the mechanical properties of perforated sheet metal Ho3s6

( $0^\circ$  – the direction of the most dense hole packing;  $30^\circ$ ,  $90^\circ$  – perpendicular directions)

Badania potwierdziły dominujący wpływ na własności blachy perforowanej jej niejednorodności, spowodowanej anizotropią cech geometrycznych siatki otworów [1-4]. Krzywe rozciągania (rys. 4 i 5) pokazują silną zależność własności i niejednorodności odkształcania od rozmieszczenia otworów w stosunku do obciążenia zewnętrznego. Charakteryzuje je brak wyraźnej granicy plastyczności i niestateczność siły rozciągania w kierunkach prostopadłych do kierunku najgęstszej upakowania otworów ( $30^{\circ}$  i  $90^{\circ}$ ).

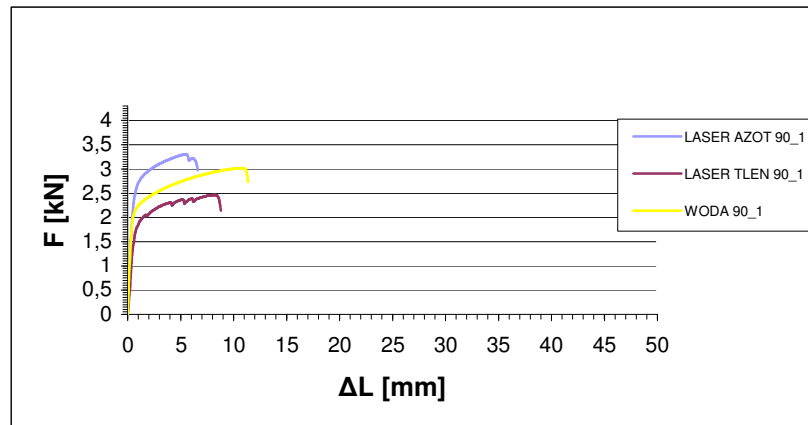
W kierunkach najgęstszej upakowania otworów blacha perforowana Ho3s6 wykazuje najwyższą plastyczność, zaś w kierunkach do nich prostopadłych ma najwyższe własności wytrzymałościowe. Również kierunki pęknięcia próbek są typowe dla badanego typu perforacji [1].

Własności mechaniczne blach perforowanych Ho3s6, różniących się techniką wykonania perforacji, zestawiono w tabelicy 1 i na rys. 6-8. Wyznaczono je dla kierunków charakterystycznych dla heksagonalnego układu otworów.



Rys. 4. Krzywe rozciągania próbek z blachy o perforacji Ho3s6 w kierunku najgęstszej upakowania otworów ( $0^{\circ}$ )

Fig. 4. Force-elongation curves for the samples of the perforated sheet metal Ho3s6 in the direction of the most dense hole packing ( $0^{\circ}$ )

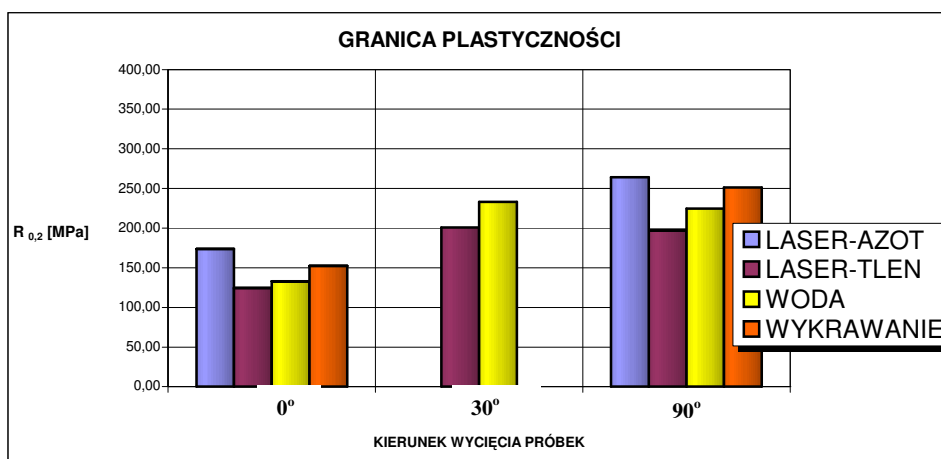


Rys. 5. Krzywe rozciągania próbek z blachy o perforacji Ho3s6 w kierunku prostopadłym do najgęstszej upakowania otworów ( $90^{\circ}$ )

Fig. 5. Force-elongation curves for the samples of the perforated sheet metal Ho3s6 in the direction perpendicular to the direction of the most dense hole packing ( $90^{\circ}$ )

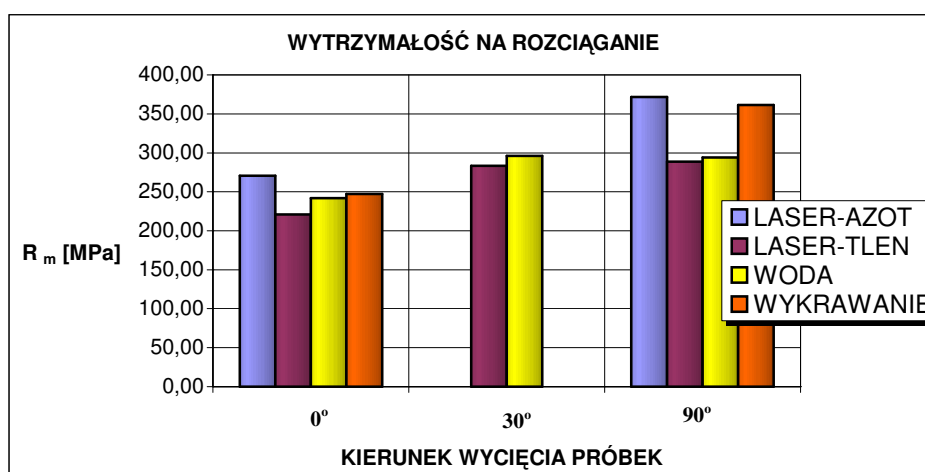
Tablica 1. Własności mechaniczne blachy perforowanej Ho3s6  
 Table 1. Mechanical properties of the perforated sheet metal Ho3s6

Technika wykonania perforacji	Kierunek	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>80</sub>
		MPa	MPa	%	%
Cięcie laserem (azot)	0°	174	271	25,6	30,2
	90°	264	372	4,9	6,2
Cięcie laserem (tlen)	0°	124	221	34,2	36,9
	30°	202	283	4,8	6,5
	90°	197	289	8,7	10,2
Cięcie wodą	0°	133	242	41,0	44,9
	30°	233	296	5,3	6,7
	90°	224	294	5,9	6,6
Wykrawanie	0°	152	247		47,4
	90°	251	362		11,7



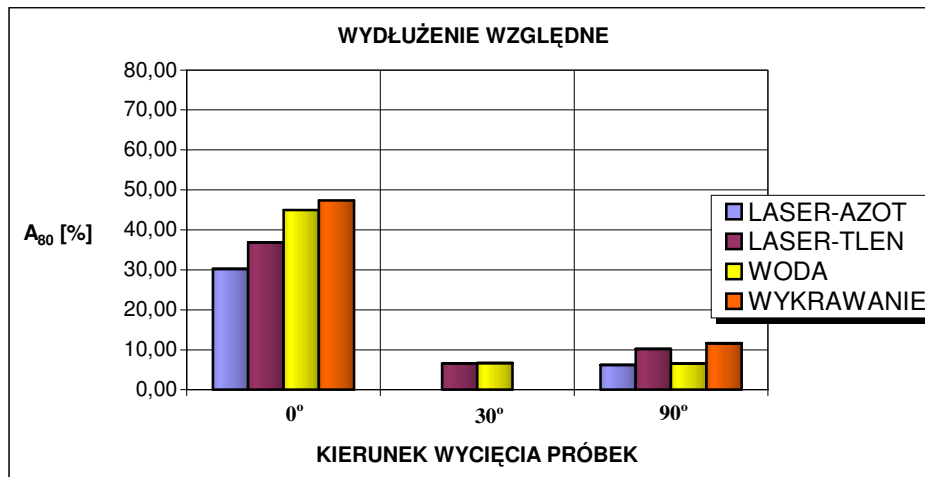
Rys. 6. Wpływ techniki cięcia na granicę plastyczności blachy perforowanej Ho3s6

Fig. 6. Influence of the cutting technique on the offset yield strength of the perforated sheet metal Ho3s6



Rys. 7. Wpływ techniki cięcia na wytrzymałość blachy perforowanej Ho3s6

Fig. 7. Influence of the cutting technique on the tensile strength of the perforated sheet metal Ho3s6



Rys. 8. Wpływ techniki cięcia na własności plastyczne blachy perforowanej Ho3s6

Fig. 8. Influence of the cutting technique on the plastic properties (% elongation) of the perforated sheet metal Ho3s6

Mimo dominującego wpływu anizotropii siatki otworów na rozkład własności blachy w płaszczyźnie, zauważalny jest wpływ technologii cięcia na poziom mierzonych własności. W przypadku cięcia laserem, mimo trudności porównań, wynikającej z odmiennych parametrów cięcia, można przypuszczać, że jednym z czynników wpływających na otrzymane wyniki jest gaz techniczny, wspomagający proces. Wnikający w materiał w wyniku dyfuzji azot może go umacniać w okolicy powierzchni cięcia (płaszczyzny rozdzielania) [10].

Najwyższą wytrzymałość na rozciąganie ma blacha z perforacją wyciętą laserem z gazem technicznym azotem, również nieco wyższą od blach perforowanych na prasach. Najniższą wytrzymałość miała blacha z perforacją wyciętą laserem z gazem technicznym tlenem. Najwyraźniejsze zróżnicowanie własności plastycznych wystąpiło na kierunku najgęstszego upakowania otworów (0°). Najmniejsze wydłużenie ma blacha z perforacją wykonaną laserem z gazem technicznym azotem, największe – blacha z perforacją wykrawaną oraz wycinaną strumieniem wody.

Cięcie wodą nie prowadzi do zmian w materiale przy powierzchni rozdzielania (rys. 12). Prawdopodobną przyczyną niższych własności wytrzymałościowych od blachy z perforacją wykrawaną mogą być w tym przypadku nierówności (grat) na powierzchni (przy krawędzi) cięcia. Mogą one stanowić zarodki pęknięć podczas rozciągania. Obydwa

procesy prowadzone są na zimno, jednakże podczas wykrawania ma miejsce znaczne umocnienie materiału przy powierzchni otworu.

#### 4.2. Badania metalograficzne

Badania metalograficzne pozwoliły na opis zmian strukturalnych powierzchni i określenie strefy wpływu ciepła, która w istotny sposób może wpływać na własności mechaniczne blach perforowanych, otrzymanych badanymi wysokoenergetycznymi metodami. Wykonano je na próbkach nie odkształconych. Miały one na celu porównanie mikrostruktury *materiału rodzimego* (MR) ze strefą przy powierzchni cięcia.

Próbki do badań metalograficznych wycięto przy pomocy drażarki elektroiskrowej, inkludowano w epidianie. Szlifowanie i polerowanie zgładów prowadzono na polerze Struers LaboPol-5. Trawiono za pomocą nitalu. Zdjęcia struktur wykonano na mikroskopie optycznym Nikon Epiphot 300, wyposażonym w cyfrową kamerę Nikon DS-5.

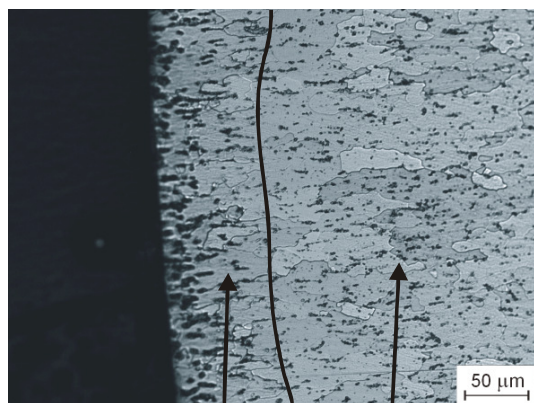
Metoda cięcia laserowego, bez względu na rodzaj użytego gazu technicznego, jest procesem, w którym właściwości mechaniczne są zmieniane w sposób chemiczny. Podczas cięcia strumieniem wody, podobnie jak przy wykrawaniu, materiał umacnia się mechanicznie.

Przy cięciu laserowym, niezależnie od rodzaju zastosowanego gazu technicznego, zaobserwowano wyraźną *strefę wpływu ciepła*

(SWC) przy powierzchni cięcia (rys. 9 i 10). Jej struktura różni się zdecydowanie od mikrostruktury materiału rodzimego MR. Szerokość strefy SWC zależy od wielkości energii liniowej (ilości energii na jednostkę długości linii cięcia, potrzebnej do rozdzielenia materiału). Wraz ze wzrostem energii liniowej rośnie strefa SWC. Wpływ na ten parametr ma również przewodność cieplna ciętego materiału. Zmiany składu fazowego w strefie przy powierzchni cięcia najprawdopodobniej zaszły na skutek dyfuzji gazu technicznego w wysokiej temperaturze.



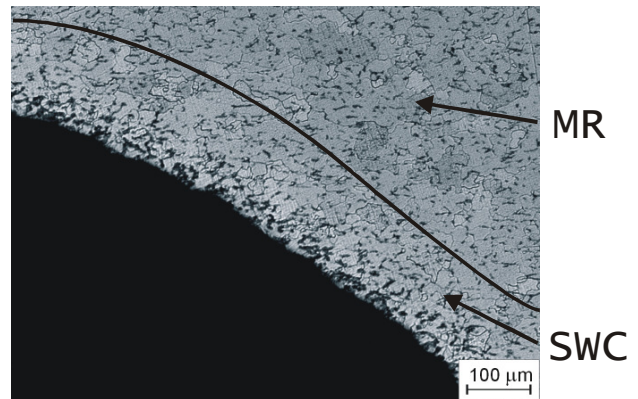
SWC MR  
(a)



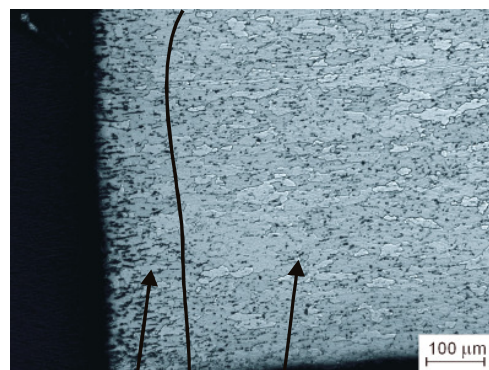
SWC MR  
(b)

Rys. 9. Mikrografia strefy wpływu ciepła (SWC) przy cięciu laserem z gazem technicznym tlenem  
a. powierzchnia blachy, b. przekrój poprzeczny  
(MR – materiał rodzimy)

Fig. 9. Microphotography of the heat influence zone (SWC) in the oxygen laser cutting  
a. sheet surface, b. cross-section  
(MR – initial material)



(a)



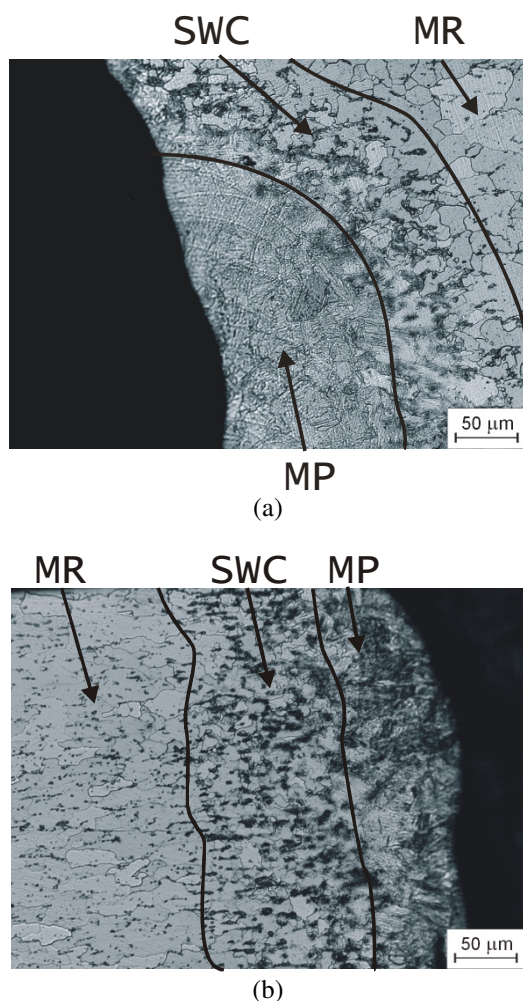
(b)

Rys. 10. Mikrografia strefy wpływu ciepła (SWC) przy cięciu laserem z gazem technicznym azotem  
a. powierzchnia blachy, b. przekrój poprzeczny  
(MR – materiał rodzimy)

Fig. 10. Microphotography of the heat influence zone (SWC) in the nitrogen laser cutting  
a. sheet surface, b. cross-section  
(MR – initial material)

Na zdjęciach metalograficznych próbek ciętych laserem z gazem technicznym azotem zaobserwowano, oprócz strefy wpływu ciepła SWC, duże obszary *materiału przegrzanego* (MP), które powstały na skutek chwilowego zatrzymania wiązki laserowej na linii cięcia (rys. 11). Wynika to ze sposobu zaprogramowania linii wpalenia. W mikrostrukturze brak typowych oznak dla przetopienia, świadczy ona raczej o przegrzaniu punktowym materiału przy linii cięcia. Wiązka laserowa nagrzała materiał do temperatury bliskiej temperaturze topnienia, po czym w efekcie szybkiego odprowadzenia ciepła w głąb materiału nastąpiła przemiana bezdyfuzyjna. Aby precyzyjnie scharakteryzować omawianą strefę MP jak również strefę SWC, należałoby przeprowadzić badania na mikroskopie

skaningowym, określając skład chemiczny fazy.

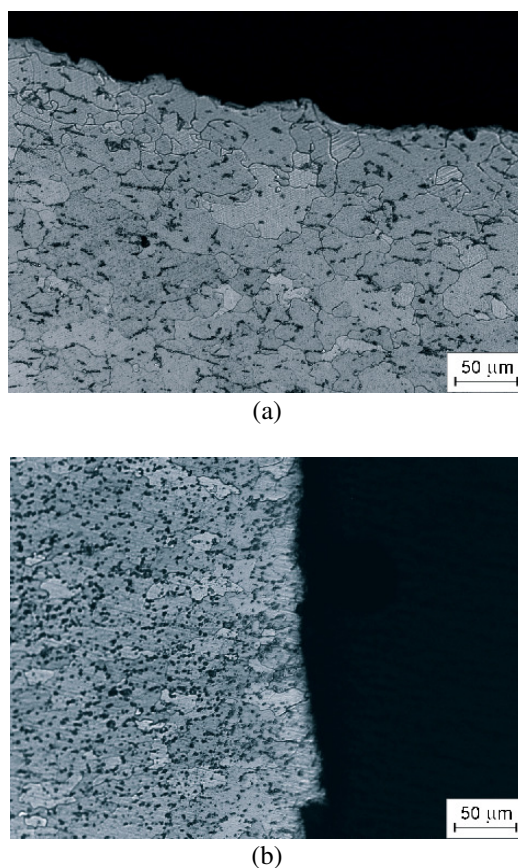


Rys. 11. Mikrofotografia strefy wpływu ciepła (SWC) oraz obszaru materiału przegrzanego (MP) przy cięciu laserem z gazem technicznym azotem  
a. powierzchnia blachy, b. przekrój poprzeczny  
(MR – materiał rodzimy)

*Fig. 11. Microphotography of the heat influence zone (SWC) and the area of the overheated material (MP) in the nitrogen laser cutting  
a. sheet surface, b. cross-section  
(MR – initial material)*

Analizując szerokość strefy wpływu ciepła SWC należy pamiętać o różnych parametrach cięcia laserowego. Znacznie różniła się prędkość cięcia oraz gęstość mocy (moc lasera na jednostkę powierzchni). Przy podobnych prędkościach oraz identycznej mocy lasera, gaz wspomagający tlen, dodatkowo podnoszący temperaturę cięcia sprawia, że proces jest bardziej efektywny. Jednak w takim przypadku również strefa SWC będzie szersza niż przy gazie technicznym azocie, gdy temperatura podczas procesu jest niższa.

Zdjęcia metalograficzne próbek z otworami wyciętymi strumieniem wody potwierdzają, że proces ten nie ma wpływu na mikrostrukturę. Struktura materiału przy płaszczyźnie cięcia nie różni się od mikrostruktury w innej części próbki (rys. 12). Uzyskana powierzchnia cięcia jest nierówna (postrzępiona), co wynika z natury tego procesu.



Rys. 12. Mikrostruktura blachy perforowanej Ho3s6 po cięciu strumieniem wody  
a. powierzchnia blachy, b. przekrój poprzeczny

*Fig. 12. Microstructure of the perforated sheet metal Ho3s6 after water jet cutting  
a. sheet surface, b. cross-section*

## 5. PODSUMOWANIE

Wykorzystując niekonwencjonalne metody cięcia można ingerować we właściwości mechaniczne blach perforowanych. Wiąże się to z wpływem tych metod na właściwości materiału w strefie przy powierzchni rozdzielania.

Szerokość strefy wpływu ciepła przy cięciu laserem jest determinowana warunkami procesu, zależy głównie od prędkości cięcia



oraz użytego gazu. Tlen, dyfundując do strefy wpływu ciepła, pogarsza własności wytrzymałościowe blachy stalowej, azot zaś zwiększa jej wytrzymałość. Niekorzystnym zjawiskiem jest pojawienie się przy powierzchni cięcia materiału przegrzanego.

Proces cięcia strumieniem wody w bardzo małym stopniu umacnia materiał, a nierówności na powierzchni rozdzielania mogą być przyczyną zmniejszenia wytrzymałości blachy perforowanej.

## LITERATURA

- [1] Muzykiewicz W.: *Przeróbka plastyczna blach perforowanych*. Obróbka Plastyczna Metali t. IX nr 4 (1998), 27-36
- [2] Muzykiewicz W.: *Spatial formation of perforated sheet metal*. Proc. of the 8<sup>th</sup> Int. Conf. on Sheet Metal – SheMet 2000, Ed. B. Shirvani, M. Geiger, H.J.J. Kals & U.P. Singh, Birmingham, UK, 2000, 185-194
- [3] Muzykiewicz W.: *Non-uniformity of plastic deformation of perforated sheet metal*. Proc. of the 8<sup>th</sup> Int. Conf. on Metal Forming – Metal Forming 2000, Ed. M. Pietrzyk, J. Kusiak, J. Majta, P. Hartley & I. Pillinger, BALKEMA, Kraków, 2000, 397-404
- [4] Muzykiewicz W., Rękas A.: *Doświadczalne określanie odkształcalności granicznej blach perforowanych*. Polska Metalurgia w latach 2002–2006, Komitet Metalurgii PAN, Wyd. Nauk. AKAPIT, Kraków, 2006, 541-546
- [5] Muzykiewicz W., Łach A.: *Analiza możliwości wykonania gęstych perforacji blach niekonwencjonalnymi technikami wysokoenergetycznymi*. Obróbka Plastyczna Metali t. XVIII nr 1 (2007), 3-11
- [6] Grosman F.: *Tendencje rozwoju obróbki plastycznej metali*. Obróbka Plastyczna Metali t. XI nr 3 (2000), 7-11
- [7] Kopp R., Dürr O.: *Innovative metal forming processes to manufacture future sheet metal products*. Advanced Technology of Plasticity, Vol. 1, 1999, 69-80
- [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 t. XI nr 5 (2000), 55-59
- [10] Malkiewicz T.: *Metaloznawstwo stopów żelaza*. PWN, Łódź 1976

*Praca sfinansowana w ramach badań statutowych — umowa nr 11.11.180.250.*