

*cięcie laserowe, cięcie plazmowe,
chropowatość, przemiana fazowa,
przemiana strukturalna*

Stanisław ZABORSKI¹
Tomasz STECHNIJ²

LASEROWE I PLAZMOWE CIĘCIE BLACH ZE STALI NIESTOPOWYCH I KWASOODPORNYCH

W referacie porównano, możliwe do uzyskania w warunkach przemysłowych, parametry jakości ciętych powierzchni, wyznaczonych na krawędziach typowych konstrukcyjnych materiałów metalowych. Celem działań eksperymentalnych było udzielenie pragmatycznej odpowiedzi na pytanie o wynikowe chropowatości powierzchni podczas cięcia laserowego i plazmowego dla identycznych elementów wykonanych ze stali niestopowej S235JRG2 oraz austenitycznej nierdzewnej 0H18N9. Zaprezentowano wyniki wielowariantowych prób przecinania metodami skoncentrowanej wiązki energii (plazma, laser), pokazując różnorodne możliwości kształtowania geometrii powierzchni obrabianych elementów. Publikacja ma charakter prezentacji praktycznego doświadczenia przemysłowego i formułuje użyteczne wnioski.

1. ZARYS PODOBIENSTW I RÓŻNIC PROCESÓW CIĘCIA LASEROWEGO I PLAZMOWEGO

Przemysłowo stosowane przecinarki laserowe i plazmowe, a także gazowe, to współcześnie dominujące obrabiarki w zakresie kształtowania materiałów. Przedmiotowe metody są klasyfikowane jako termiczne, co sugerowałoby ich podobieństwo. Ze względu na obserwowane zjawiska towarzyszące pracy obu urządzeń, podobieństwo w sterowaniu (CNC), a także w zakresie widocznych rezultatów – obrabiarki laserowe oraz plazmowe są podobne. Jednak ze względu na fizykę procesu cięcia – podobne nie są. Laser emituje wiązkę fotonów, której energia falowa/korpuskularna jest przenoszona w przestrzeń ciętego materiału, od którego własności (absorpcji światła, budowy krystalicznej etc.) zależy cały zespół zjawisk, np.: gradient temperatury procesu i przepływy ciepła. Plazma jako strumień jonów i elektronów unosi energię w postaci ciepła oraz w postaci energii kinetycznej. Strumień ten ma w przecinarkach zazwyczaj temperaturę pomiędzy 10000-30000K. Parametr temperatury w przecinarkach laserowych uzyskiwany jest dopiero w momencie reakcji wiązki światła z materiałem. Wiązka laserowa nie jest charakteryzowana taką funkcją stanu jak temperatura, w klasycznym rozumieniu termodynamiki.

¹ Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji, Politechnika Wrocławska

² Wydział Zarządzania i Informatyki PWSZ im. Witelona w Legnicy

Tabela 1. Jakościowe porównanie cięcia plazmą i laserem
 Table 1. The qualitative comparison, plasma and laser cutting

Aspekt obróbki/technologia	Plazma	Laser
Metoda transportu energii	Strumień jonów i elektronów	Strumień fotonów
Zalecane materiały cięte	Metale żelazne i nieżelazne, przewodniki elektryczności	Szeroki zakres, trudności przy materiałach o wysokim współczynniku odbicia światła
Szybkość cięcia	Duża	Umiarkowana
Strefa wpływu ciepła wzdłuż linii podziału materii	Względnie szeroka	Relatywnie wąska, potencjalnie niewielkie naprężenia własne po obróbce
Zdolność cięcia materiałów pokrytych warstwami, np. rdzą, zgorzeliną	Dobra	Dostateczna
Wymagalność obróbki wykańczającej, dodatkowej	Zazwyczaj wymagana	Zazwyczaj niewymagana
Odchylenie prostopadłości płaszczyzny przecięcia	Względnie duże	Małe
Dopuszczalna grubość materiału	Średnie i duże grubości	Małe i średnie grubości
Operatywność dla części wielkogabarytowych	Dopuszczalna	Mała
Zaawansowanie wycinanych kształtów	Niewielkie	Znaczne

Te zasadnicze różnice [2],[6],[7] w podstawach procesu cięcia laserem oraz plazmą należy w praktyce przemysłowej przełożyć na wnioski stosowalne w technice (tabela 1). Analiza przemian zachodzących w strukturach stali, zawarta w niniejszym artykule pozwala wnioskować o różnych przebiegach rozpraszania energii podczas cięcia omawianych materiałów technikami laserowymi i plazmowymi. W ramach projektowania technologii wykonania elementu wiodącymi parametrami jest nie tylko estetyka elementu, ale też szybkość wykonania oraz energochłonność i czasochłonność. Niezwykle ważne jest rozpoznanie powstałych naprężeń własnych w materiale, przemian fazowych czy też zmian twardości na linii rozdziału materiału. W całym szeregu parametrów, cięcie laserowe w szeroko rozumianym przemyśle metalowym i maszynowym jest efektywniejsze od plazmowego i gazowego, a tym bardziej od metod konwencjonalnych. Interesujące możliwości posiadają także obrabiarki EDM czy WEDM, ale ogniskują się one wokół zupełnie innego sektora zastosowań niż stołowe dwuwymiarowe przecinarki laserowe.

Liczne cechy przyczyniły się do powodzenia laserów w przemyśle, najistotniejsze to:

- powtarzalność ustawień lasera a tym samym finalnych elementów, podatność na zautomatyzowanie, sterowalność;
- umiarkowany hałas, umiarkowane ilości czynników szkodliwych dla człowieka (pyłów, promieniowania przenikliwego, ryzyka porażenia prądem elektrycznym);
- trwałość narzędzia oraz przewidywalność eksploatacyjna;
- szerokie spektrum zastosowań: cięcie, spawanie, spiekanie, obróbka cieplna;
- niskie straty materiałowe podczas cięcia.

2. PRZEPROWADZONE EKSPERYMENTY

W badaniach stosowano wycinarkę plazmową Soltec Gensis 90 /CNC-AVE, wycinarkę laserową Bystronic BTL 3500, sprzęt pomocniczy: pomiarowy, optyczny, fotograficzny. Zastosowany rezonator laserowy oparty jest o CO₂, gazem pomocniczym jest N₂, jako mieszanina plazmotwórcza stosowane było powietrze. Typy i skład chemiczny ciętych materiałów podano w tabeli 2.

Zastosowane podstawowe parametry przedstawiają się następująco:

- cięcie laserowe stali niestopowej (15mm) - moc 2000W, posuw 300mm/min, częstotliwość 80Hz, ciśnienie gazu 170kPa;
- cięcie laserowe stali nierdzewnej (5mm) - moc 2000W, posuw 1000mm/min, częstotliwość 300Hz, ciśnienie gazu 170kPa;
- cięcie plazmowe stali niestopowej (15mm) - prąd 90A, posuw 600mm/min, średnica dyszy 1,1mm, odległość próbki od dyszy 5mm, ciśnienie gazu 400kPa;
- cięcie plazmowe stali nierdzewnej (5mm) - prąd 90A, posuw 1500 mm/min, średnica dyszy 1,1mm, odległość próbki od dyszy 5mm, ciśnienie gazu 400kPa.

Tabela 2. Oznaczenie i skład obrabianej stali [%]
Table 2. Type-matter and composition of steel [%]

Stal		C	Cr	Ni	Mn
PN 0H18N9	EN 1.4301	< 0,07	17,0 -19,0	8,0 -10,5	< 2,0
PN S235JRG2	EN 1.0038	< 0,22	0,3	0,3	1,1





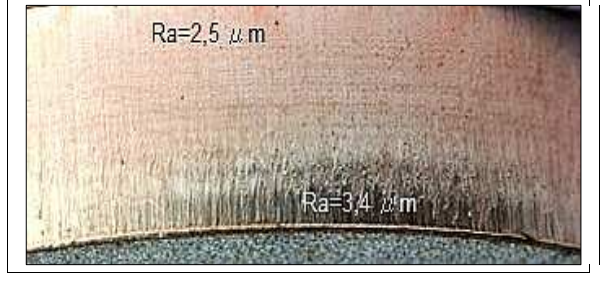
Oczywiście parametry były stosownie modyfikowane w zależności od grubości materiałów. Wykonano po kilkadziesiąt prób dla każdego typu stali, analizując mikroskopowo (rys. 1), na bieżąco strefę wpływu ciepła i orientacyjną strukturę geometryczną powierzchni. Najkorzystniejsze rezultaty czyli minimalne Ra oraz minimalna wielkość strefy zmodyfikowanej cieplnie, przy dopuszczalnych dla praktyki produkcyjnej parametrach i czasach obróbki, zaprezentowano w tabeli 3.

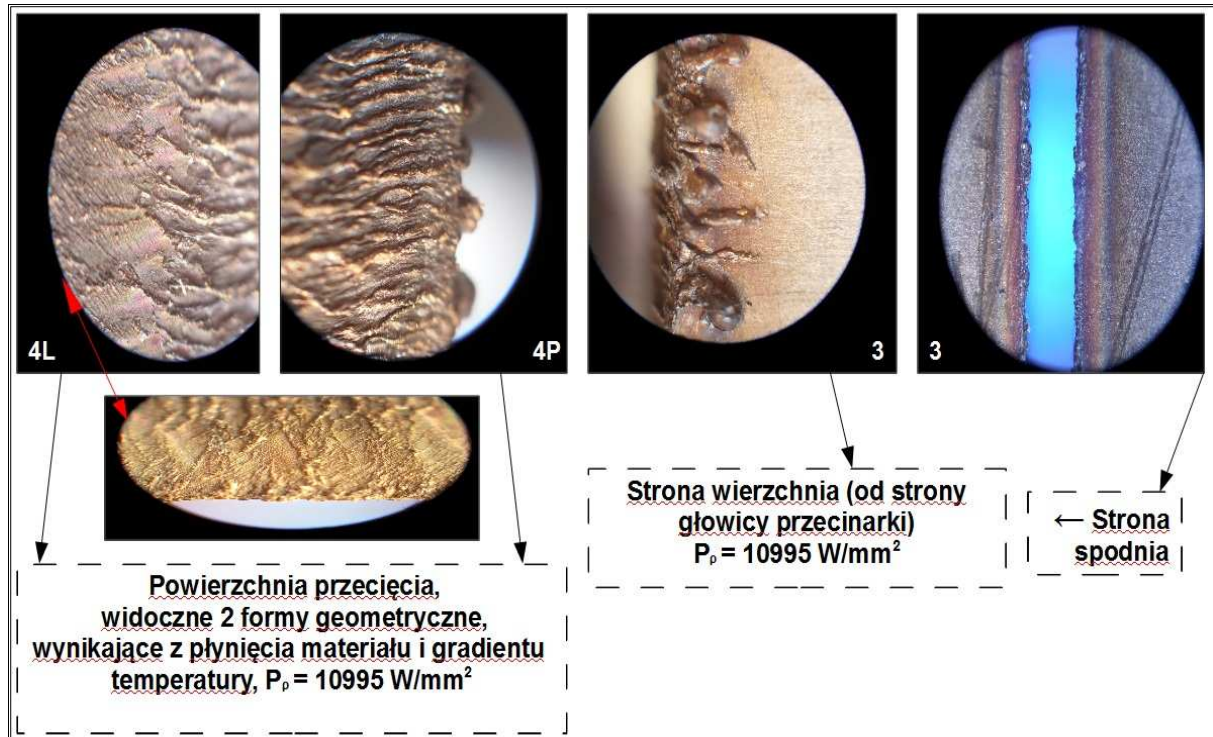
3. PREZENTACJA MATERIAŁU MAKROSKOPOWEGO, MIKROSKOPOWEGO ORAZ PROFILOGRAMÓW

Kolejna tabela ilustruje reprezentatywne wyniki cięcia badanych materiałów. Były to elementy o nieskomplikowanych kształtach krawędzi, prostokątne lub kołowe.

Zaprezentowano elementarny parametr chropowatości Ra mierzony od strony działania wiązki oraz od strony przeciwległej.

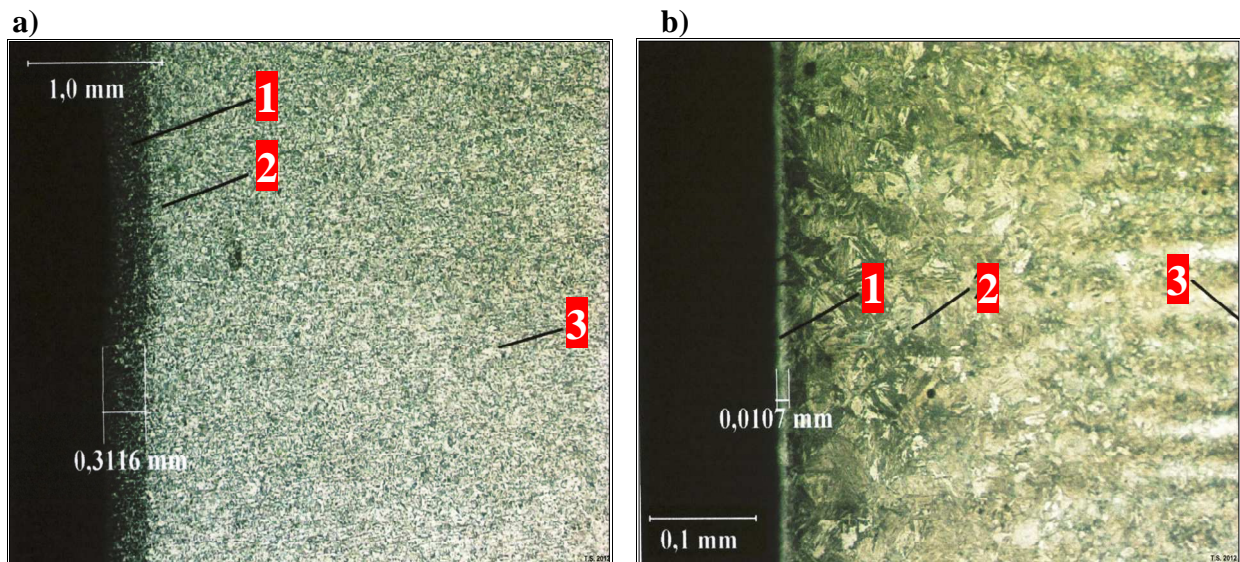
Tabela 3. Fotografie makroskopowe wybranych wynikowych powierzchni
 Table 3. The macroscopic photos of chosen surfaces

Numer, opis elementu, zastosowane techniki podziału materii			Fotografia makroskopowa
1.	Cięcie laserem stali niestopowej o grubości 5mm	$R_a=2,7\mu\text{m} \rightarrow$ $R_z=16,9\mu\text{m}$ $R_p=7,8\mu\text{m}$ $R_p=10,2\mu\text{m}$ $R_z=18,4\mu\text{m}$ $R_a=3,1\mu\text{m} \rightarrow$	
2.	Cięcie laserem stali niestopowej o grubości 15mm	Profilogram znajduje się na rysunkach 3a i 3b. Zgład metalograficzny pokazano na rysunku 2a.	
3.	Cięcie laserem stali niestopowej o grubości 25mm	$R_a=5,3\mu\text{m} \rightarrow$ $R_z=26,7\mu\text{m}$ $R_p=12,5\mu\text{m}$ $R_p=50,5\mu\text{m}$ $R_z=92,7\mu\text{m}$ $R_a=25,3\mu\text{m} \rightarrow$	
4.	Cięcie laserem stali nierdzewnej o grubości 5mm	$R_a=1,2\mu\text{m} \rightarrow$ $R_z=6,1\mu\text{m}$ $R_p=4,6\mu\text{m}$ $R_p=7,6\mu\text{m}$ $R_z=10,7\mu\text{m}$ $R_a=1,6\mu\text{m} \rightarrow$	
5.	Cięcie laserem stali nierdzewnej o grubości 10mm	$R_a=2,5\mu\text{m} \rightarrow$ $R_z=12,2\mu\text{m}$ $R_p=8,7\mu\text{m}$ $R_p=14,5\mu\text{m}$ $R_z=17,1\mu\text{m}$ $R_a=3,4\mu\text{m} \rightarrow$	



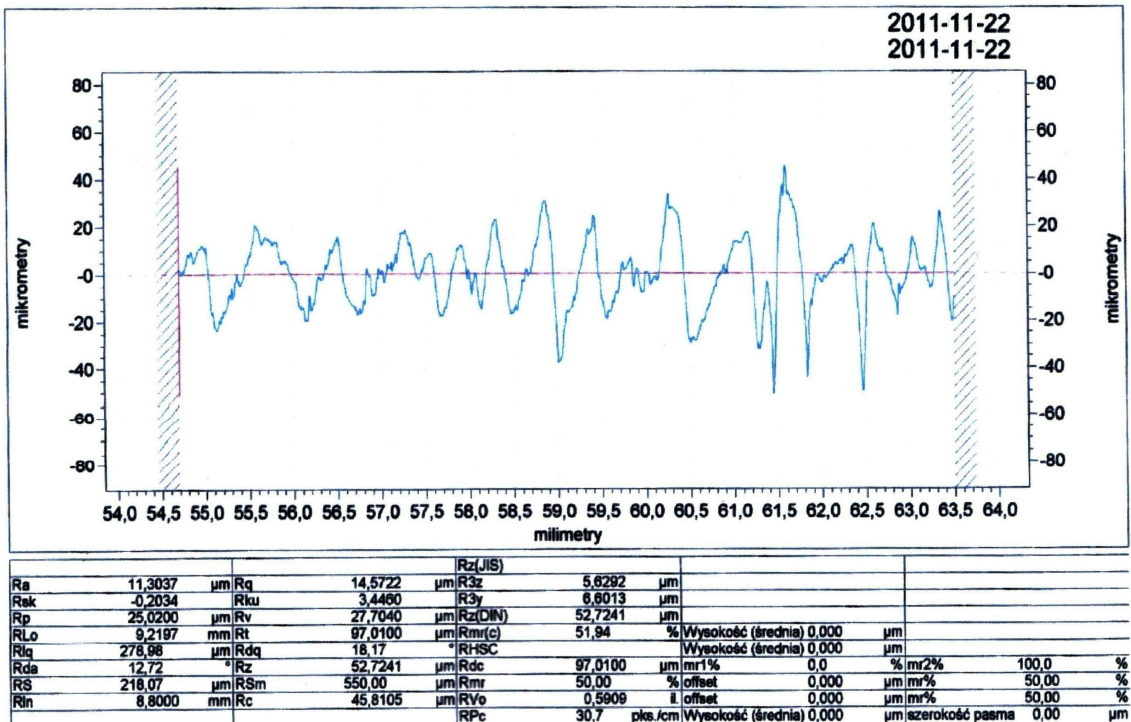
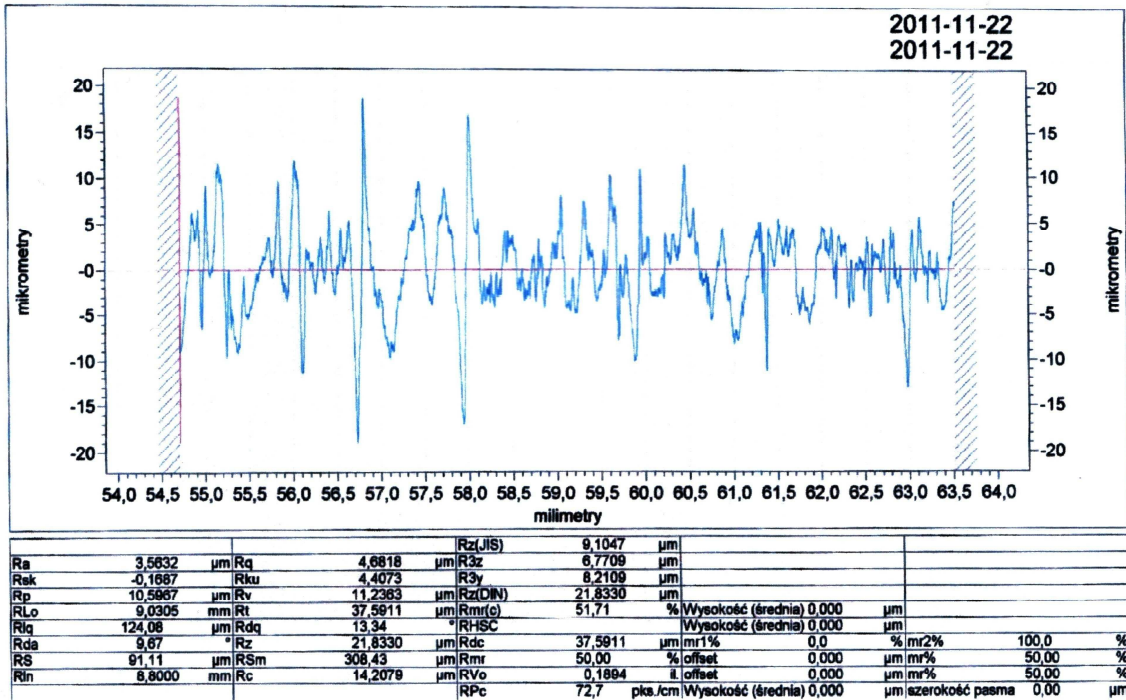
Rys. 1. Fotografie powierzchni stali nierdzewnej (5mm), cięcie plazmowe, ($P=25\times$)

Fig. 1. The photos of stainless steel surface (5mm), plasma cutting (mag. = 25x)



Rys. 2 Przekrój poprzeczny powierzchni: a) przecięcia laserowego dla elementu numer 2, Struktury: 1- martenzytyczno-bainityczna, 2- martenzytyczno-bainityczna z wydzieleniami ferrytu, 3- materiał bazowy, b) przecięcia plazmowego dla elementu analogicznego do elementu numer 2, Struktury: 1- warstwa biała, 2- niskowęglowy martenzyt, 3- materiał bazowy

Fig. 2 The cross-section of the surface: a) laser cutting of the unit number 2, Structures: 1) martensite - bainite, 2) martensite - bainite with liberation of ferrite, 3) basic material b) plasma cutting of element corresponding to the element number 2, Structures: 1- white shell, 2- low carbon martensite, 3-basic material



Rys. 3. Wybrane profilogramy dla elementu numer 2: a) od strony działania wiązki, b) od strony przeciwległej
 Fig. 3 Chosen surface profiles for element No 2: a) from the side of the beam action, b) from the opposite side

4. ANALIZA METALOGRAFICZNA ORAZ CHROPOWATOŚĆ POWIERZCHNI

Struktury geometryczne powierzchni, występujące po cięciu metodą laserową, wykazują systematyczności. Wszystkie posiadają regularne rozkłady rzędnych profilu, zbliżone do normalnego. Występuje w nich typowy stosunek $R_z/R_a \approx 4,5$. Powierzchnie nie zawierają zbyt wielu ekstremalnych miejscowych wzniesień ani wgłębień. Aczkolwiek wartości wskaźnika R_t w stosunku do R_a są dla cięcia laserowego wysokie i oscylują w granicach od 7 do 8. Podobne wnioski sugerują wartości R_p oraz R_v , czyli występujące maksymalne wzniesienia i zagłębienia.

Powstałe po cięciu laserowym powierzchnie należy sklasyfikować jako anizotropowe losowe, a w rzadkich przypadkach anizotropowe okresowe [3],[8].

Geometria powierzchni po cięciu plazmowym (rys. 1), jest strukturą praktycznie nieobrobioną i w większości zastosowań nie będzie posiadała stosownych parametrów, oscylując wokół $R_z \in <150; 250\mu\text{m}>$. Są to zazwyczaj powierzchnie anizotropowe mieszane.

Powierzchnie po cięciu laserowym i plazmowym zawsze przejawiają ukierunkowanie równoległe, czasami w dwóch kierunkach. Nigdy nie są izotropowe.

Opis analizy mikroskopowej dotyczy wybranego przykładu cięcia laserowego (rys. 2a) oraz plazmowego (rys. 2b) stali niestopowej. Podczas cięcia laserowego próbki nr 2 stwierdzono zmianę mikrostruktury na długości $\sim 0,35\text{mm}$. Przepływ ciepła wywołany reakcją stali z wiązką lasera był przyczyną powstania struktury martenzytyczno-bainitycznej. W dalszym obszarze materiału przechodzi ona w martenzytyczno-bainityczną z wydzieleniami ferrytu. W odległości $\sim 2\text{mm}$ od krawędzi występuje już struktura materiału rodzimego. Przemiana martenzytyczna zachodzi przy mocno ograniczonej dyfuzji w materiale a struktury martenzytyczne powstają w wyniku szybkiej ujemnej zmiany temperatury. W omawianym przypadku warunki te zaszły podczas gwałtownego skoku temperatury w czasie przejścia wiązki lasera. Obecne w materiale struktury bainityczne powstają podczas przechłodzenia austenitu [1],[4]. Przemiany te zapewne doprowadziły do wzrostu twardości powierzchni przełomu.

Fotografia z rysunku 2b ukazuje analogiczny materiał cięty strumieniem plazmy. Zmiana mikrostruktury obejmuje obszar $\sim 1\text{mm}$ od krawędzi. Na głębokości około $0,01\text{mm}$ występuje warstwa biała. Kolejnym obszarem jest struktura niskowęglowego martenzytu obejmująca obszar do $\sim 0,73\text{mm}$ w głąb materiału. Od punktu oddalonego $\sim 0,85\text{mm}$ od krawędzi można zauważyć materiał rodzimy. Opisane przemiany bez wątpienia wpłynęły na zwiększenie twardości materiału na płaszczyźnie uciętych krawędzi.

W praktyce przemysłowej, analiza makroskopowa pozwala stwierdzić, iż podczas cięcia laserowego blach grubych (15, 20mm) strefa wpływu ciepła jest minimalna. Powstała warstwa wierzchnia nie wymaga, dla większości celów konstrukcyjnych, obróbek dodatkowych. Cięcie plazmowe niemal zawsze generuje nawisy stopionego metalu i żużłu. Szeroka strefa wpływu ciepła podczas cięcia plazmowego stali nierdzewnej zasadniczo dyskwalifikuje tę metodę do cięcia precyzyjnych detali. Stale austenityczne nierdzewne, po strefowym przegrzaniu, są trudne w obróbce wykańczającej (szlifowanie, polerowanie).

5. WNIOSKI PRAKTYCZNE DLA INŻYNIERII PRODUKCJI

Przeprowadzone badania potwierdzają znane fakty związane z obróbką metali. Jednak w praktyce przemysłowej ich znajomość bywa niedoceniana, a proces technologiczny nie zawsze jest świadomie sterowany. Warto zwrócić uwagę na następujące praktyczne wnioski:

- pomimo, że obie omówione metody nazywamy termicznymi, różnią się one jednak znacząco, co do zasady emisji oraz transportu energii; zaś obrabiane metale reagują odmiennymi przemianami dla każdej z obróbek;
- chropowatość powierzchni na wejściu laserowej wiązki tnącej w objętość materiału, jest większa niż na wyjściu, im detal jest grubszy tym owa różnica jest większa;
- cięcie plazmowe powoduje większe niż laserowe niekontrolowane ukosowanie. Cięcie laserowe skutkuje znacznie węższą szczeliną, a zatem mniejszymi stratami materiałowymi;
- ze względu na powstałe mikrostruktury, można wnioskować, iż podczas cięcia plazmowego następuje znaczniejsze zwiększenie twardości przelomu, niż w przypadku cięcia laserowego;
- cięcie laserowe, oprócz szybkości cięcia oraz dopuszczalnych gabarytów detali, przewyższa techniki plazmowe w szerokim zakresie charakterystyk.

LITERATURA

- [1] DOBRZAŃSKI L. A., 1990, *Metaloznawstwo i obróbka cieplna materiałów narzędziowych*, WNT, Warszawa.
- [2] DUBIK A., 1991, *Zastosowania laserów*, WNT, Warszawa.
- [3] NOWICKI B., 1991, *Struktura geometryczna powierzchni. Chropowatość i falistość powierzchni*, WNT, Warszawa.
- [4] BONEK M., 2003, *Struktura i własności warstw wierzchnich uzyskanych w wyniku obróbki laserowej stali narzędziowej stopowej do pracy na gorąco*, Biblioteka Główna Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- [5] POON C.Y., BHUSHAN B., 1995, *Comparison of surface roughness measurements by stylus profiler, AFM, and non-contact optical profiler*, *Wear*, 190, 76-88.
- [6] KUSIŃSKI J., 1986, *Lasery i ich zastosowanie w inżynierii materiałowej*, WNT, Warszawa.
- [7] KUJAWSKI A., SZCZEPAŃSKI P., 1999, *Lasery - podstawy fizyczne*, OW Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- [8] JAKUBIEC W., MALINOWSKI J., 2004, *Metrologia wielkości geometrycznych*, WNT, Warszawa.

THERMAL METHODS OF SHAPING FROM SHEETS OF INOX AND COAL STEELS

The report compares possible to the obtainment, in industrial conditions, parameters of the surfaces quality, on edges in typical constructional materials of metal industry. Allowing the pragmatic answer on the question, about the roughness of the surface, while laser and plasma cutting. Details executed from coal steel S235JRG2 and stainless steel 0H18N9. Showing the varied possibilities of formation the geometry of the surface. The publication has the character of the practical industrial experience and formulates utilitarian conclusions.