

	Organizatorzy:	<b>XXXVIII NAUKOWA SZKOŁA OBRÓBKİ ŚCIERNEJ</b> <b>Łódź - Uniejów</b> 09-11.09.2015	
	Politechnika Łódzka		
	Wydział Mechaniczny		
• Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn • Katedra Technologii Maszyn			

## Warstwa wierzchnia elementów wycinanych wysokociśnieniowym strumieniem wodnościernym

The surface layer of elements cutting high-pressure abrasive water jet

RAFAŁ KUDELSKI  
KRZYSZTOF ZAGÓRSKI  
EDWARD WANTUCH  
MANUELA REBEN \*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.374

W referacie zaprezentowano wyniki badań wybranych cech stereometrycznych i fizycznych warstwy wierzchniej elementów po wycinaniu wysokociśnieniowym strumieniem wodnościernym i laserowo na materiałach wykonanych ze stali konstrukcyjnej. Badania prowadzono w odniesieniu do fizycznych cech warstwy wierzchniej, mikrotwardości oraz gradientu umocnienia. W przeprowadzonych badaniach cech stereometrycznych WW uzyskano dane dotyczące cech wertykalnych i horyzontalnych parametrów profilu chropowatości łącznie z krzywymi nośności powierzchni.

**SŁOWA KLUCZOWE:** cięcie wysokociśnieniowym strumieniem wodnościernym, warstwa wierzchnia, mikrotwardość, chropowatość

*The paper presents the results of research of selected stereometrical and physical features of the surface layer elements made of steel after abrasive water jet cutting and laser cutting. The study was conducted in relation to the physical characteristics of the surface layer, microhardness and strengthening gradient. In this study stereometric features of the surface layer obtained data on the characteristics parameters of vertical and horizontal surface profile including carrying capacity curves surfaces.*

**KEYWORDS:** abrasive water jet cutting, the surface layer, microhardness, surface roughness

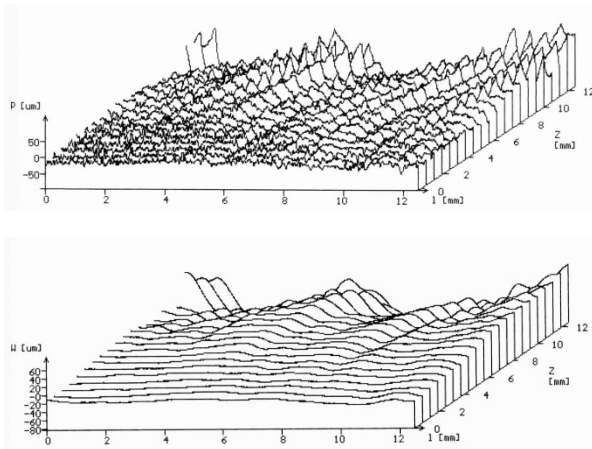
Technologia cięcia wysokociśnieniowym strumieniem wodnościernym, znajduje obecnie szereg zastosowań przy wycinaniu przedmiotów o złożonych kształtach wykonanych

z różnych materiałów o silnie zróżnicowanych cechach wytrzymałościowych i mechanicznych. Dokładność wykonanych w ten sposób elementów uzależniona jest w głównej mierze od doboru parametrów cięcia kształtujących zdolność skrawną wysokociśnieniowego strumienia wodnościernego, rozumianej jako zdolności do przecinania materiałów, przy zachowaniu wymaganych parametrów jakości powierzchni [4, 5]. Przy założeniu poprawnie dobranej zdolności skrawnej wysokociśnieniowego strumienia względem przecinanego materiału, dokładność wykonania przedmiotu o wymiarach nie przekraczających 1000 mm, powinna się mieścić w zakresie  $\pm 0,15 \div 0,40$  mm. Znaczący udział w niedokładności wykonania, posiadają błędy uwarunkowane technologicznie, które mogą być wielokrotnie większe od podanego zakresu, w przypadku krzywoliniowych zarysów przedmiotu z punktami nieciągłości [7]. Dla wielu przypadków zastosowań technologii cięcia wodnościernego najważniejszym parametrem kształtowanej warstwy wierzchniej (WW) przedmiotu jest jednak chropowatość powierzchni otrzymanego przedmiotu określana parametrem  $R_a$ . W zależności od zdolności skrawnej strumienia wodnościernego powierzchnia cięcia charakteryzuje się występowaniem nierówności, typu błędów kształtu powierzchni, powiększających się wzdłuż drogi strumienia w przecinanym przedmiocie (rys.1). W skrajnych przypadkach niewłaściwego doboru zdolności skrawnej strumienia względem cech materiału przedmiotu obrabianego, rozrzut chropowatości powierzchni jest tak znaczący, że pojawia się konieczność wprowadzenia kategorii błędu kształtu przecinanej powierzchni. Dlatego w przypadkach względnie jednorodnej chropowatości powierzchni cięcia, w prezentowanych wynikach badań zastosowano współczynnik rozrzutu w postaci ilorazu chropowatości mierzonej na wyjściu strumienia z materiału do chropowatości powierzchni mierzonej w odległości 2 mm od górnej powierzchni materiału. Równie ważną dla wielu szczególnych zastosowań technologii wysokociśnieniowego strumienia wodnościernego jest ocena

\* Mgr inż. Rafał Kudelski, AGH w Krakowie, (kudelski@agh.edu.pl)  
Dr inż. Krzysztof Zagórski, AGH w Krakowie, (zagkrzys@agh.edu.pl)  
Prof. dr hab. Inż. Edward Wantuch, AGH w Krakowie, (ewan-tuch@agh.edu.pl)  
Dr hab. inż. Manuela Reben, AGH w Krakowie, (manuelar@agh.edu.pl)

fizycznych cech WW, a zwłaszcza mikrotwardości obrobionej powierzchni.

W celu zrelatywizowania badanej mikrotwardości WW otrzymanej po cięciu wodnościernym, odniesiono otrzymane zależności do takich samych wyników ale uzyskanych po cięciu laserowym [1, 6].



Rys. 1. Obraz 3D chropowatości powierzchni cięcia (góra), obraz 3D błędów kształtu powierzchni cięcia, po odfiltrowaniu nierówności stanowiących chropowatość (dół) [8]

W osi Z podano odległość od czoła przedmiotu (wejście strumienia).

### Badania chropowatości powierzchni

Jako miarę oceny nierówności powierzchni przedmiotu (stal S355J2H) przyjęto chropowatość powierzchni  $R_a$ , określoną na prostoliniowym fragmencie konturu wycinanego elementu. Znany jest duży rozrzut chropowatości powierzchni po obróbce wysokociśnieniowym strumieniem wody [3][2], który może być na tyle znaczący, że iloraz długości fali nierówności do jej wysokości przyjmuje wartości większe od 1000, co odpowiada kategorii błędów kształtu. Jeżeli jednak dobrać odpowiednią zdolność skrawną wysokociśnieniowego strumienia wodnościernego, nierówności obrobionej powierzchni stają się bardziej jednorodne i mogą być kwalifikowane jako chropowatość powierzchni.

Zgodnie z zasadami planowania eksperymentu przyjęto program badań PS/DS.-P:L(L) w celu identyfikacji postaci funkcji aproksymacji, na podstawie uzyskanych wyników badań chropowatości powierzchni. Jako wielkość badaną wybrano średnią chropowatość powierzchni, która jest bardziej miarodajną oceną powierzchni od punktowych ocen chropowatości. Jako wielkość uzupełniającą, wskazującą na rozrzut chropowatości wybrano wskaźnik rozrzutu chropowatości jako iloraz chropowatości mierzonej na wyjściu strumienia z materiału, do chropowatości na jego wejściu. Odpowiednie równania regresji przedstawiono wzorem (1) oraz (2), odpowiadające im płyty powierzchni podano na rys.2, rys.3, rys.4, rys.5, rys.6, rys.7.

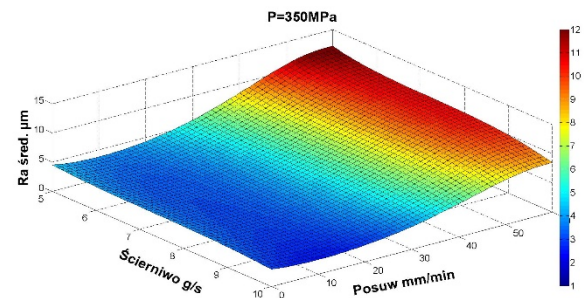
$$Ra = -0,17 * p + 0,0006 * p^2 - 7,14e - 7 * p^3 - 0,302190 * q + 0,0004 * p * q - 0,00007 * p * v + 0,0098 * q^3 + 0,212 * q^2 + 0,00027 * q * v - 1,43 * q - 0,00002 * v^3 + 0,002 * v^2 + 0,0134 * v + 20,12 \quad (1)$$

$$Wskaźnik Ra = -0,16 * p + 0,0006 * p^2 - 6,66e - 7 * p^3$$

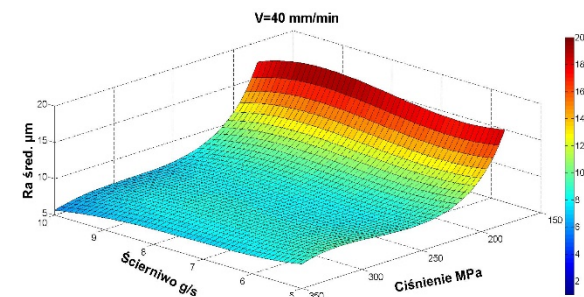
$$-0,677 * q - 0,001 * p * q - 0,00008 * p * v - \quad (2)$$

$$-0,0074 * q^3 + 0,15 * q^2 + 0,00061 * q * v - 0,68 * q -$$

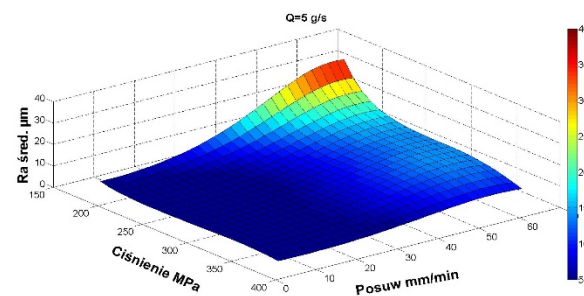
$$-0,00001 * v^3 + 0,001 * v^2 + 0,028 * v + 15,95$$



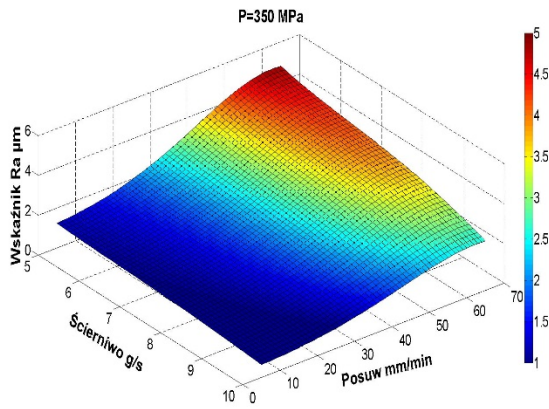
Rys. 2. Zależność chropowatości powierzchni obrobionej od posuwu cięcia oraz ilości dozowanego ścierniwa przy ciśnieniu wody 350MPa, materiał stal S355J2H, ścierniwo GARNET #80, dysza wodna  $d_w = 0,35$  mm, dysza mieszająca  $d_o = 1$  mm, grubość materiału 25 mm



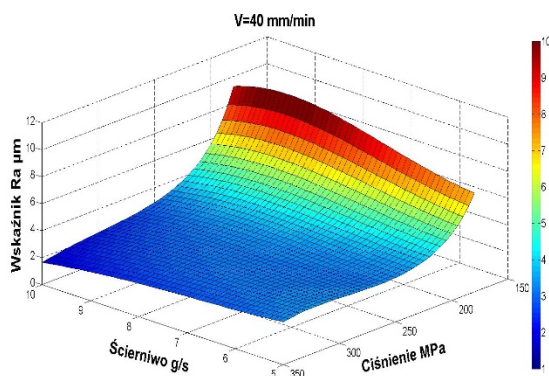
Rys. 3. Zależność chropowatości powierzchni obrobionej od ciśnienia wody oraz ilości dozowanego ścierniwa przy posuwie cięcia 40mm/min, materiał stal S355J2H, ścierniwo GARNET #80, dysza wodna  $d_w = 0,35$  mm, dysza mieszająca  $d_o = 1$  mm, grubość materiału 25 mm



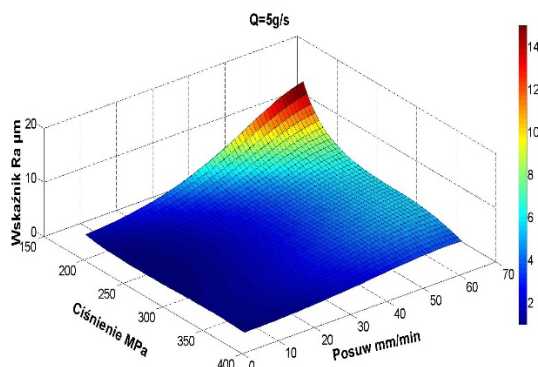
Rys. 4. Zależność chropowatości powierzchni obrobionej od ciśnienia wody oraz posuwu przy ilości dozowanego ścierniwa 5 g/s, materiał stal S355J2H, ścierniwo GARNET #80, dysza wodna  $d_w = 0,35$  mm, dysza mieszająca  $d_o = 1$  mm, grubość materiału 25 mm



Rys. 5. Zależność wskaźnika rozrzutu chropowości Ra powierzchni obrabianej od posuwu oraz ilości dozowanego ścierniwa przy ciśnieniu wody 350MPa, materiał stal S355J2H, ścierniwo GARNET #80, dysza wodna  $d_w=0,35$  mm, dysza mieszająca  $d_o=1$  mm, grubość materiału 25 mm

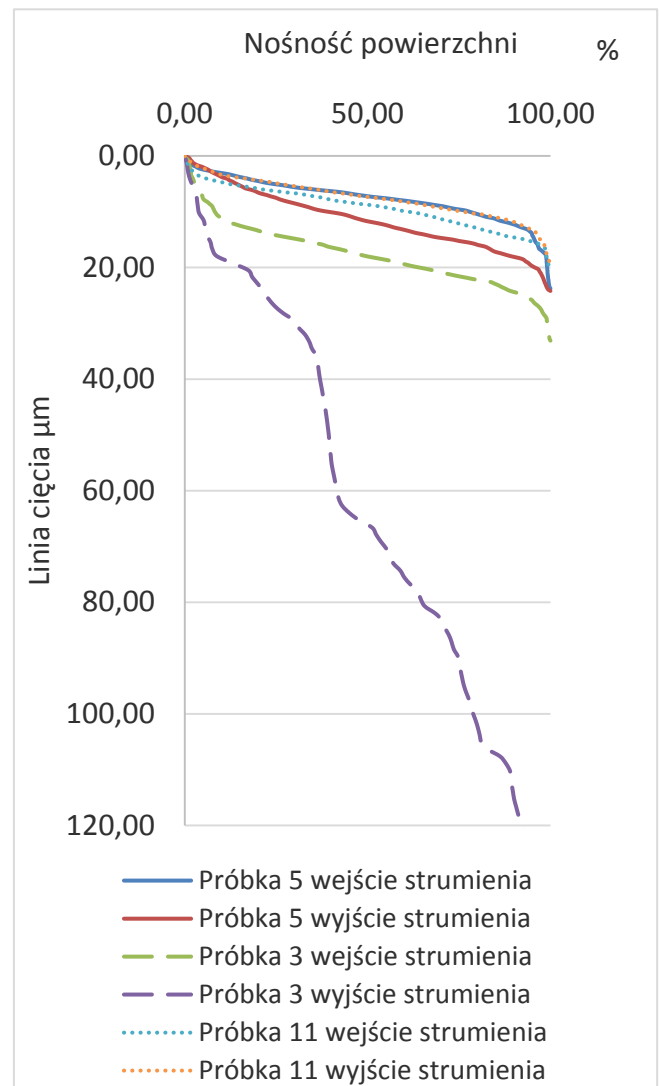


Rys. 6 Zależność wskaźnika rozrzutu chropowości Ra powierzchni obrabianej od ciśnienia wody oraz ilości dozowanego ścierniwa przy posuwie cięcia 40mm/min, materiał stal S355J2H, ścierniwo GARNET #80, dysza wodna  $d_w=0,35$  mm, dysza mieszająca  $d_o=1$  mm, grubość materiału 25 mm



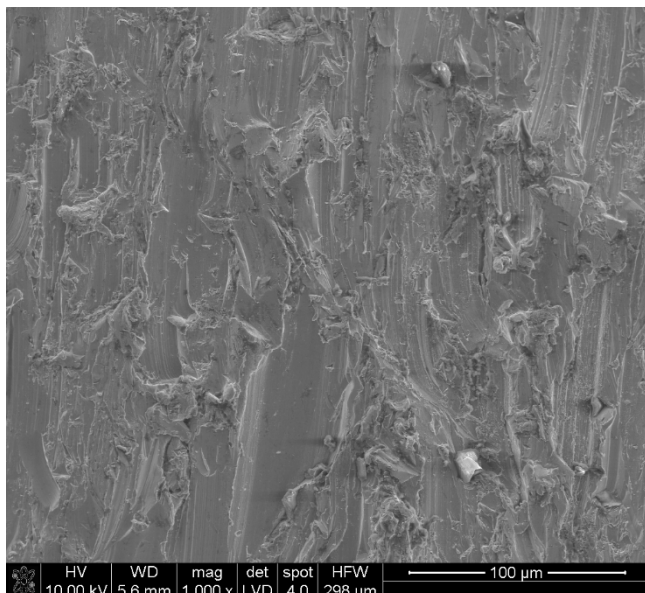
Rys. 7. Zależność wskaźnika rozrzutu chropowości Ra powierzchni obrabianej od ciśnienia wody oraz posuwu przy ścierniwe 5 g/s, materiał stal S355J2H, ścierniwo GARNET #80, dysza wodna  $d_w=0,35$  mm, dysza mieszająca  $d_o=1$  mm, grubość materiału 25 mm

Na podstawie uzyskanych wyników można wnioskować, że w dobranym zakresie parametrów cięcia wysokociśnieniowym strumieniem wodnościernym możliwym jest uzyskanie jakości powierzchni przedmiotu ze stosunkowo niskim wskaźnikiem zmienności chropowości nie przekraczającym 1,5. Najniższą średnią chropowość obrabianej powierzchni uzyskuje się przy relatywnie dużym zakresie zmienności posuwu cięcia od 10 do 35 mm/min, przy maksymalizacji ilości dozowanego ścierniwa. W porównaniu z prędkością najniższą, wynoszącą  $v_f=5$  mm/min, wskaźnik rozrzutu chropowości różnie wraz ze wzrostem prędkości cięcia osiągając sześciokrotną wartość przy prędkości 65 mm/min.

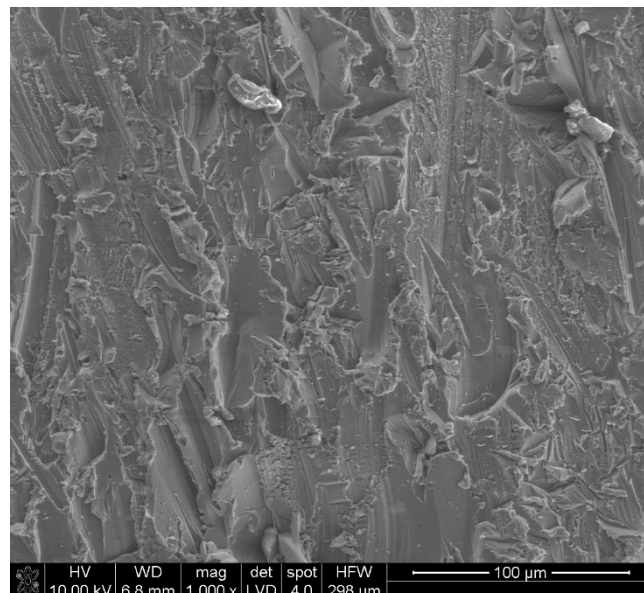


Rys. 8. Nośność powierzchni przy wejściu i wyjściu strumienia podczas cięcia próbek, gdzie: Próbka 3 (ciśnienie 220,5 MPa; posuw 52,8 mm/min; wydatek ścierniwa 4,4 g/s); Próbka 5 (ciśnienie 220,5 MPa; posuw 17,2 mm/min; wydatek ścierniwa 8,6 g/s); Próbka 11 (ciśnienie 280 MPa; posuw 5 mm/min; wydatek ścierniwa 6,5 g/s)

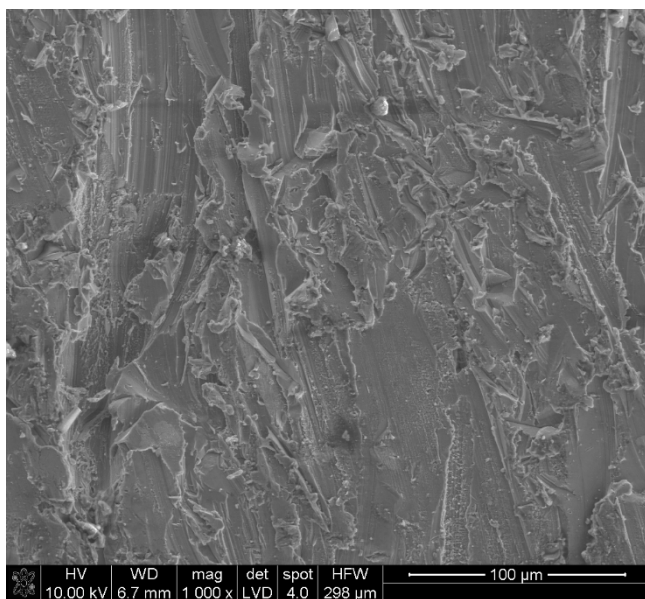




Rys. 9. Topografia powierzchni po cięciu wysokociśnieniowym strumieniem wodnościernym przy wejściu strumienia w materiał, ciśnienie 350 MPa, posuw 100 mm/min, ilości dozowanego ścierniwa 4,5 g/s, materiał stal S355J2H, ścierniwo GARNET #80, dysza wodna  $d_w=0,35$  mm, dysza mieszająca  $d_o=1$  mm, grubość materiału 25 mm



Rys. 11 Topografia powierzchni po cięciu wysokociśnieniowym strumieniem wodnościernym przy wyjściu strumienia z materiału, ciśnienie 350 MPa, posuw 100 mm/min, ilości dozowanego ścierniwa 4,5 g/s, materiał stal S355J2H, ścierniwo GARNET #80, dysza wodna  $d_w=0,35$  mm, dysza mieszająca  $d_o=1$  mm, grubość materiału 25 mm



Rys. 10. Topografia powierzchni po cięciu wysokociśnieniowym strumieniem wodnościernym w połowie grubości cięcia, ciśnienie 350 MPa, posuw 100 mm/min, ilości dozowanego ścierniwa 4,5 g/s, materiał stal S355J2H, ścierniwo GARNET #80, dysza wodna  $d_w=0,35$  mm, dysza mieszająca  $d_o=1$  mm, grubość materiału 25 mm

Badania udziału nośnego otrzymanych powierzchni po cięciu wodnościernym przedstawione w postaci wykresów nośności powierzchni (rys.8) wskazują na silne zróżnicowanie tego parametru topografii powierzchni (rys. 9, rys. 10, rys. 11), wynikające z różnic interakcji wysokociśnieniowego strumienia z materiałem obrabianym przy wejściu i wyjściu strumienia (odpowiednie krzywe oznaczone na rys.8). Różnice w oddziaływaniu strumienia wodnościernego z materiałem uzyskują swe potwierdzenie na obrazach prezentujących topografię powierzchni, na których można zidentyfikować ślady ziaren wykonujących pracę mikroskrabania, zwłaszcza w obszarze wejścia (rys.9), wskazujące na przeformowywanie plastyczne materiału przez ziarna odbite od płaszczyzny cięcia oraz penetrację wody w strefie wyjścia. W strefie wyjścia strumienia wysokociśnieniowego z przedmiotu (rys.11) obserwują się tory ziaren o kierunkach odbiegających od kierunku ruchu głównego. Sugeruje to zwiększoną liczbę odbić ziaren ściernych od powierzchni szczeliny. Natomiast strefa środkowa szczeliny cięcia prezentowana na rys. 10 posiada cechy pośrednie w stosunku do obu scharakteryzowanych poprzednio. W typowych warunkach cięcia stali S355J2H i ziarnie Garnet #80, 50% udział nośny przecinanych powierzchni uzyskuje się na poziomie ok. 10  $\mu\text{m}$  w przedziale zmienności chropowatości powierzchni. Natomiast przy warunkach cięcia odpowiadających granicy potencjału skrawnego udział nośny powierzchni na wejściu i wyjściu strumienia jest trudno porównywalny ze względu na istniejące znaczne różnice tej wielkości (rys. 8 Próbką 3), wynikające z wpływu błędów kształtu powierzchni cięcia. Tego rodzaju warunki obróbki indukują powstawanie błędów kształtu powierzchni przecinanej, co powoduje duży zakres zmienności nierówności powierzchni w strefie wyjścia strumienia z przedmiotu, w porównaniu do zakresu zmienności nierówności tworzących w obszarze wejścia strumienia. Jednocześnie w tego rodzaju badaniach zauważono prawidłowość polegającą na tym, że w warunkach cięcia, przy których uzyskuje się duży udział nośny powierzchni, skupiony na stosunkowo niewielkiej głębokości, powstająca szczelina cięcia ma zbieżność

ujemną (rozbieżną). Natomiast warunki cięcia, które powodują powstawanie szczeliny o zbieżności dodatniej (zbieżnej) sprzyjają tworzeniu powierzchni o bardzo niekorzystnym profilu nośności obrazowanym na rysunku 8 (Próbka 3).

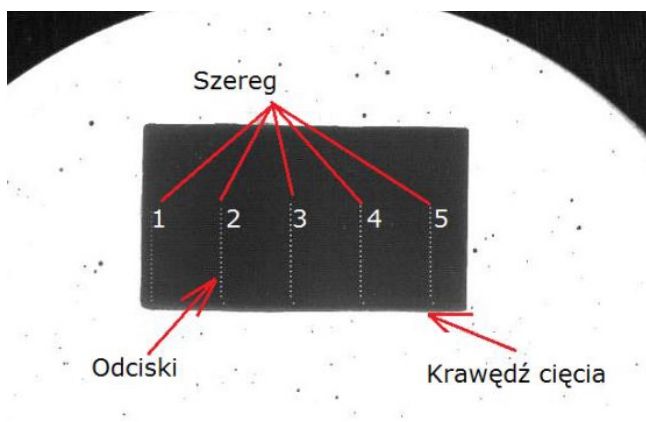
### Badania mikrotwardości powierzchni

Pomiary mikrotwardości przeprowadzono przy pomocy twardościomierza DuraScan - 70 firmy Struers (rys. 12), charakteryzującym się szerokim zakresem obciążeń pomiarowych od 0,098 do 98 N do pomiarów metodą Vickersa i Knoppa. Badania wykonano wykorzystując metodę Vickersa i przeprowadzono je zgodnie z normą EN ISO 6507-1:2005.



Rys. 12. Twardościomierza DuraScan – 70 firmy Struers

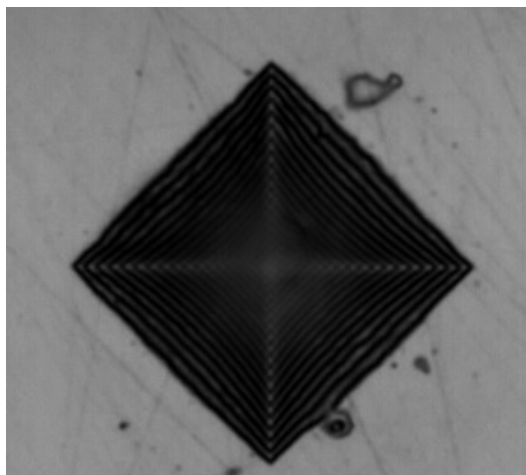
Na każdej próbce przeprowadzono po 100 pomiarów mikrotwardości, rozłożonych w pięciu szeregach po 20 punktów, oddalonych od siebie o 15  $\mu\text{m}$  (rys.13). Pierwszy szereg pomiarów został wykonany przy krawędzi powierzchni powstałej w wyniku przecinania laserowo. Analogiczny pomiar dokonano na próbkach po cięciu wysokociśnieniowym strumieniem wodnościernymi.



Rys. 13. Widok próbki z wykonanymi odciskami pomiarowymi

Pomiar mikrotwardości przeprowadzono metodą Vickersa przy małej sile obciążającej 2,942 N (HV 0,3 – symbol twar-

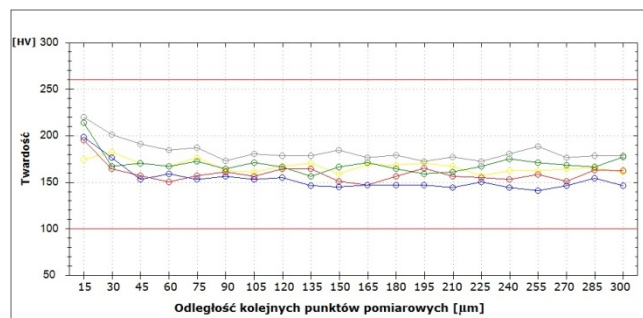
dości). Wartość siły obciążającej dobrano metodą prób, poprzez zwiększanie obciążenia wgłębnika, aż do uzyskania odcisku, który charakteryzował się równymi krawędziami rys.14.



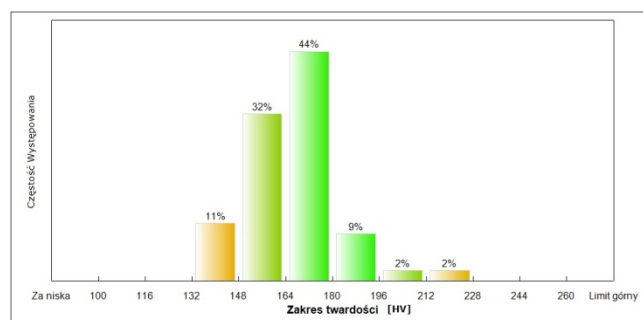
Rys. 14. Fotografia poprawnego odcisku podczas pomiaru mikrotwardości próbki po cięciu laserowym

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania ecos Workflow. Cykl pomiarowy przeprowadzony był w pełni automatyczny po wcześniejszym ustawieniu metody pomiarowej HV0,3, liczby wykonywanych odcisków w serii i miejsca rozpoczęcia pomiaru ( wykonanie odcisku, regulacja ostrości obrazu, pomiar twardości). Po zakończeniu wszystkich serii pomiarowych oprogramowanie „ecos Workflow” automatycznie generowało raport z badań.

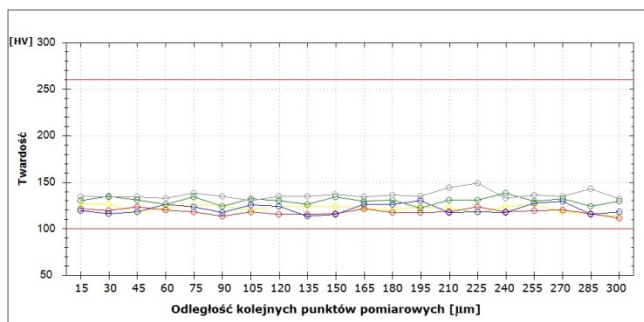
Na przykładowych wykresach przedstawiono wyniki badań mikrotwardości dla próbek stalowych o grubości 12 mm oraz 6 mm (rys.15, rys.17), a także histogram częstości występowania pomiarów w przedziałach zmienności mikrotwardości (rys.16, rys.18).



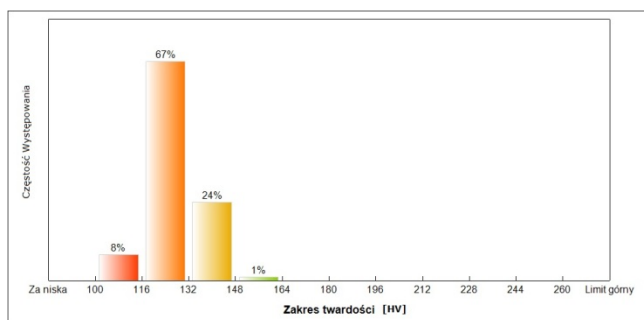
Rys. 15. Przykładowy wykres mikrotwardości dla próbki stalowej o grubości 12 mm wycinanej laserem



Rys. 16. Przykładowy histogram częstości występowania zakresów mikrotwardości dla próbki stalowej o grubości 12 mm wycinanej laserem



Rys. 17. Przykładowy wykres mikrotwardości dla próbki stalowej o grubości 6 mm przecinanej wysokociśnieniowym strumieniem wodnościernym



Rys. 18. Przykładowy histogram częstości występowania zakresów mikrotwardości dla próbki stalowej o grubości 6 mm wycinanej strumieniem wodnościernym

W celu uzyskania bardziej miarodajnej oceny stanu fizycznego warstw wierzchnich po cięciu wysokociśnieniowym strumieniem wodnościernym, przeprowadzono badania cięcia tego samego materiału o tej samej grubości metodą laserową. Wyniki badań mikrotwardości warstwy wierzchniej przedmiotów wycinanych laserowo wykazują wzrost mikrotwardości na powierzchni przedmiotu, który daje się określić w postaci gradientu utwardzenia, co przedstawia rysunek 19. Na podstawie uzyskanych szeregów pomiarów mikrotwardości za pomocą oprogramowania „DIAdem” firmy „National Instruments” zostały wyznaczone funkcje aproksymacyjne uzyskanych wyników pomiarów mikrotwardości (rys.19), w postaci wielomianowej. Na tej podstawie wyznaczono gradient utwardzenia w przypadku cięcia laserowego, który wynosi 3,32 HV/ $\mu\text{m}$ .

$$f(x)=248,608-2,33*x+0,0309*x^2-0,000198*x^3+6,07*10^{-7}*x^4-7046*10^{-10}*x^5 \quad (3)$$



Rys. 19. Przykładowy wykres twardości z naniesioną funkcją aproksymacyjną dla próbki stalowej grubości 12 mm wyciętej laserem

## Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że cechy stereometryczne warstwy wierzchniej przecinanego przedmiotu wysokociśnieniowym strumieniem wodnościernym uzależnione są od wyboru zdolności skrawnej strumienia, określonej podstawowymi parametrami cięcia. Najmniejszy rozrzut chropowatości powierzchni określony chropowatością w strefie wejścia oraz wyjścia, a także najmniejszy rozrzut nośności obrabianych powierzchni uzyskuje się w przypadku wysokiej zdolności skrawnej strumienia. Wysoko zdolność skrawna skutkuje dużym udziałem procesu mikroskrawania ziaren, tworzących bardziej jednorodną strukturę powierzchni, charakteryzującą się relatywnie małą chropowatością powierzchni i stosunkowo wysokim udziałem nośnym powierzchni. Przy padki zbyt niskiej zdolności skrawnej strumienia będą powodować zwiększony udział innych mechanizmów destrukcji materiału, powodujących wzrost chropowatości oraz znikomy udział nośny tworzonych powierzchni cięcia.

Fizyczne cechy warstwy wierzchniej, których ocenę przeprowadzono przy wykorzystaniu pomiarów mikrotwardości wykazują brak oddziaływania mikroskrawania ziaren ściernych na utwardzenie warstwy wierzchniej, co może być rozstrzygające w przypadku wyboru metody cięcia dla elementów specjalnego przeznaczenia. W takich przypadkach rozstrzygnięcie metody cięcia laserowego lub wodnościernego jest jednoznaczne.

## LITERATURA

1. Akkurt A., Surface properties of the cut face obtained by different cutting methods from AISI 304 stainless steel materials, *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, Vol. 16, Dec. 2009, pp. 373-384, 2009.
2. Borkowski J., Sutowska M., The quality of surface cut after high-pressure abrasive-water cutting, *Journal of Machine Engineering*, Vol.7(3), pp.19-28, 2007.
3. Chen F.L., Wang J., Lemma E., Siores E., Striation formation mechanisms on the jet cutting surface, *Journal of Materials Processing Technology*, 141, s. 213–218, 2003.
4. Kulekci M.K., Processes and apparatus developments in industrial waterjet applications, *Journal of Materials Tools & Manufacture*, 42, s. 1297–1306, 2002.
5. Miranda R.M., Quintino L., Microstructural study of material removal mechanisms observed in abrasive waterjet cutting of calcareous stones, *Materials Characterization*, Vol.54(4), pp.370-377, 2005.
6. Radziszewska, A. Kusiński, J., Laser alloying of the plain carbon steel surface layer, *Archives of Foundry Engineering*, 2008, Vol. 8, iss. 2, 175-179.
7. Vikram G., Ramesh Babu N., Modeling and analysis of abrasive water jet cut surface topography, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, no. 42, s. 1345–135, 2002.
8. Wantuch E., Kot R., Problem dokładności odwzorowania toru krzywoliniowego przy obróbce wysokociśnieniowym strumieniem wodnościernym, in: *XXVI Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej*, Łódź, s. 329–337, 2003.