

Henryk HOLKA¹
Tomasz JARZYNA¹
Maciej MATUSZEWSKI¹
Janusz MUSIAŁ¹

WPŁYWY STANU KWALIFIKACYJNEGO STALI NA EFEKTY CIĘCIA STRUGĄ WODNO-ŚCIERNĄ

W artykule przedstawiono rezultaty badań weryfikujących skutki procesu przecinania strugą wodno-ścierną stali o różnej twardości. Przecinano próbki ze stali 1.2080: normalizowane (23HRC), ulepszone (43HRC) i hartowane (63HRC). Jako kryterium oceny przyjęto stan powierzchni cięcia, a miarami oceny były wybrane parametry chropowatości: Ra , Rz oraz Rq . Czynnikiemmi zmiennymi w badaniach były prędkość posuwu oraz ciśnienie strugi. Stwierdzono istotny i zróżnicowany wpływ badanych czynników na wartość mierzonych parametrów.

1. WPROWADZENIE

Cięcie to operacja technologiczna bardzo często występująca we współczesnych procesach produkcyjnych. Operacji tej poddaje się bardzo szerokie spektrum materiałów: od technicznych jak: metale i tworzywa sztuczne, przez surowce mineralne i materiały pochodne, aż po materiały biologiczne jak: drewno i tkanka organiczna, w tym kości i mięśnie. Taka różnorodność ciętych materiałów powoduje, że z operacją cięcia mamy do czynienia w wielu sferach: w przemyśle wielu różnych branż, medycynie, usługach itd.

Różnorodność ciętych materiałów powoduje także zróżnicowanie metod i sposobów cięcia, a także kryteriów oceny rezultatów tej operacji. W niniejszej pracy przedstawiono rezultaty badań cięcia stali, a więc materiału konstrukcyjnego używanego w wielu zastosowaniach technicznych. W prezentowanych badaniach zastosowano cięcie skoncentrowanym strumieniem mieszaniny wody i ścierniwa (*Abrasive Water Jet Machining* – AWJM), a więc metodę, która dzięki swoim zaletom rozwija się dynamicznie [1],[2],[3], lecz obecnie zaliczana jest jeszcze do obróbek niekonwencjonalnych [4],[5].

Celem prezentowanych badań było stwierdzenie na ile parametry cięcia metodą AWJM wpływają na strukturę geometryczną przecinanych powierzchni elementów stalowych o zróżnicowanej twardości.

¹ Wydział Inżynierii Mechanicznej, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy

Wiedza w tym zakresie może być przydatna do porównania rezultatów obróbki znanymi i opisanymi metodami tradycyjnymi z wynikami uzyskanymi stosując metody konwencjonalne.

2. OBIEKT I ZAKRES BADAŃ

Badania dotyczyły cięcia próbek o przekroju prostokątnym ($b \times h$) 30 x 10mm, wykonanych ze stali stopowej o numerze 1.2080 i symbolu wg EN X210Cr12 (wg starych oznaczeń NC11). Jest to bardzo często stosowana stal narzędziowa przeznaczona na ciągadła, wykrojniki, gwintowniki, szczęki do walcowania gwintu na zimno, noże, zestawy narzędziowe do wykrawania i cięcia, narzędzia do tłoczenia blach, matryce i stemple do wyciskania, używana zarówno w stanie normalizowanym, ulepszonym jak i hartowanym. Z tego powodu badano próbki o różnej twardości $H = 23, 43$ oraz 63HRC.

Operacje cięcia AWJM realizowano na wycinarce wodnej DWJFB 1313 wyprodukowanej w Chinach, charakteryzującej się następującymi cechami:

- wymiar stołu roboczego ($X \times Y$): 1300x1300mm,
- przesuw w osi Z: 160mm,
- dokładność pozycjonowania: $\Delta = \pm 0,1$ mm,
- powtarzalność: ± 25 μ m,
- zakres parametrów pracy:
 - maksymalna prędkość posuwu $f_{max} = 15\ 000$ mm/min,
 - maksymalne ciśnienie strugi: $p_{max} = 300$ MPa.

Proces cięcia realizowano przy następujących wartościach parametrów:

- ciśnienie strumienia cieczy roboczej: $p = 200$ oraz 250MPa,
- prędkość posuwu: $v = 64, 80$ oraz 96mm/min.

Cieczą roboczą w prezentowanych badaniach była mieszanina wody i ścierniwa Garnet o granulacji mesh 80, a dysza w głowicy tnącej miała średnicę 1,016mm i oddalona była od górnej powierzchni ciętego elementu o 2mm.

Ciśnienie cieczy roboczej p mieściło się w górnych przedziałach wartości możliwych do uzyskania na obrabiarce, chciano bowiem określić chropowatość powierzchni przecinanej z możliwie dużą efektywnością. Średnią prędkość posuwu f_{sr} maszyna dobierała sama na podstawie danych materiałowych i geometrycznych przecinanej próbki. Kolejne wartości posuwu przyjmowano odpowiednio: $0,8 f_{sr}$ oraz $1,2 f_{sr}$. Przecinanie powtarzano 5-krotnie uzyskując w ten sposób dla każdej prędkości 10 obrabianych powierzchni. Do analiz przyjmowano średnią arytmetyczną wyników uzyskanych dla każdej kombinacji parametrów wejściowych.

Rezultaty procesu oceniano na podstawie pomiarów wybranych parametrów chropowatości:

- Ra – średnia arytmetyczna rzędnych profilu,
- Rz – największa wysokość profilu,
- Rq – średnia kwadratowa rzędnych profilu.

Mierzono je w trzech miejscach: 0,25, 0,50 i 0,75 wymiaru b na odcinkach pomiarowych 4,0mm, usytuowanych w połowie grubości h próbek, za pomocą profilografo-

metru Hommelwerke T 2000. Jako chropowatość każdej powierzchni przyjmowano średnią arytmetyczną tych trzech pomiarów.

Badania miały charakter wstępny, weryfikujący możliwości. Ten trzejelementowy zbiór parametrów mierzonych za pomocą wspomnianej aparatury uznano więc za wystarczający.

3. WYNIKI BADAŃ

Rezultaty uzyskane w przeprowadzonych badaniach zestawiono w poniższej tabeli 1. Zamieszczone wartości parametrów chropowatości stanowią średnią z pomiarów na 10 powierzchniach cięcia. Należy zauważyć, że powtarzalność wyników była dobra, o czym mogą świadczyć wartości odchylenia standardowego S . Wartości tego odchylenia, obliczone dla największych stwierdzonych wartości średnich parametrów chropowatości (Tabela 1), wynosiły odpowiednio: 0,21 (Ra), 2,54 (Rz), 0,23 (Rq).

Tabela 1. Wartości mierzonych parametrów chropowatości powierzchni stalowych próbek przecinanych metodą AWJM
Table 1. Values of measured roughness parameters of steel samples surfaces cut by means of AWJM method

Posuw, f , mm/min Twardość, H , HRC	64		80		96	
	p , MPa					
	200	250	200	250	200	250
Ra , μm						
23	2,82	2,95	2,89	2,97	2,95	3,20
43	2,16	2,42	2,68	2,85	2,77	2,95
63	1,96	2,25	2,24	2,55	2,52	2,79
Rz , μm						
23	16,78	17,48	17,09	17,95	17,67	19,01
43	11,20	13,29	11,80	14,42	13,17	15,99
63	10,20	12,09	10,95	12,88	12,57	14,25
Rq , μm						
23	3,55	3,71	3,62	3,74	3,68	3,99
43	2,74	3,13	3,26	3,59	3,37	3,75
63	2,46	2,83	2,80	3,24	3,17	3,52

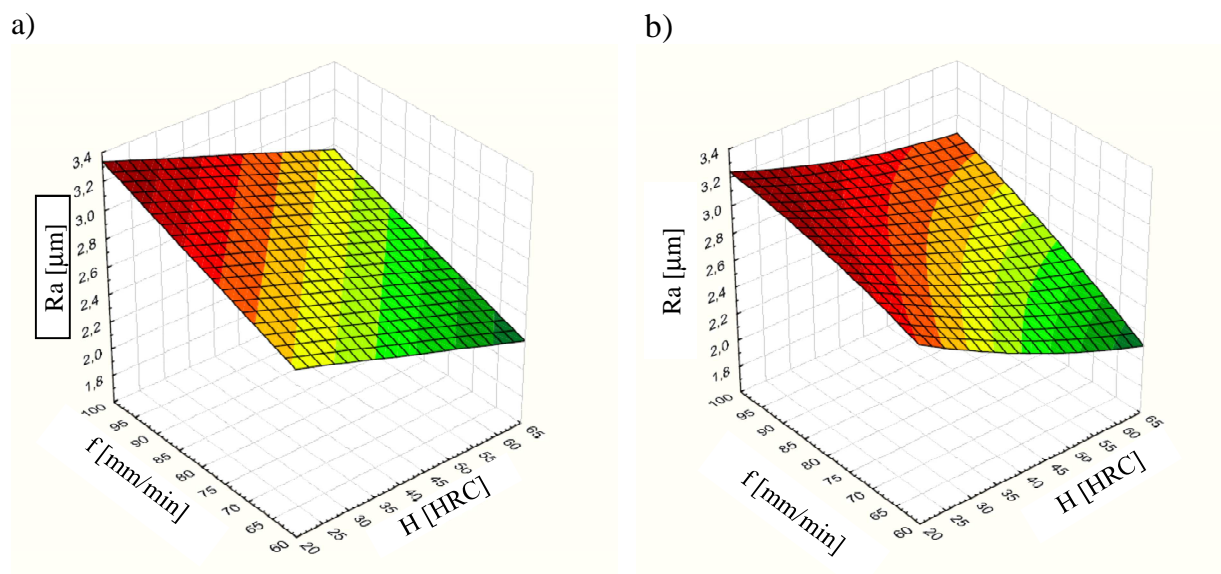
Wartości parametru chropowatości Ra dla przyjętych w badaniach zakresów zmiennych niezależnych różnią się w niewielkim stopniu. Największą chropowatość określoną tym parametrem (3,20 μm) stwierdzono dla największych: prędkości posuwu f i ciśnienia p , i najmniejszej twardości H próbki. Najmniejszą wartość parametru Ra

zarejestrowano dla największej twardości i najmniejszym posuwie i ciśnieniu. Rozkłady wartości pozostałych parametrów chropowatości, tj. R_z i R_q były podobne.

Analizując wyniki pomiarów zawarte w tabeli 1, można w procesie cięcia strugą wodno-ścierną zaobserwować pewne trendy dotyczące rezultatów cięcia. Dla zwiększającej się twardości H próbek obserwuje się zmniejszenie wartości parametru R_a , zwiększenie ciśnienia skutkuje natomiast większą uzyskiwaną chropowatością. Taki sam trend obserwuje się w przypadku zmian prędkości posuwu f .

Podobne jakościowo relacje obserwuje się analizując pozostałe parametry chropowatości, tj. R_z i R_q .

Na podstawie danych zawartych w tabeli 1 opracowano modele matematyczne, które określają relacje między zmiennymi niezależnymi (wejściowymi) a parametrami badanymi (wyjściowymi). Analizowano dwie formy modeli: równanie I stopnia oraz równanie II stopnia. Model liniowy jest niewątpliwie prostszy i dla celów praktycznych może być on bardziej przydatny niż model II stopnia, jednak uproszczona jego forma nie zawierała wszystkich informacji o relacjach między badanymi wielkościami. Jest to wyraźnie widoczne na wykresach tych modeli. Jeden z przykładów przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Graficzne obrazy dwóch form modeli: I stopnia (a) i II stopnia (b) ujmujących zależność parametru chropowatości R_a od zmiennych: posuwu f i twardości H materiału próbki, dla ciśnienia strugi $p = 250\text{MPa}$
 Fig. 1. Graphic form of two kinds of models: I degree (a) and II degree which formulate relationship between roughness parameter R_a and variable factors: feed rate f and hardness H , for abrasive-water jet pressure $p = 250\text{MPa}$

Modele matematyczne, opracowane w wyniku obróbki statystycznej rezultatów badań przy ciśnieniu strugi wodno-ścierniej $p = 200\text{MPa}$ mają postać:

$$Ra = 1,6429 - 0,0488f + 0,0449H + 6,6667 \cdot 10^{-5} H^2 + 0,0003H \cdot f - 0,0003f^2$$

$$Rz = 35,7612 - 0,704f - 0,1942H + 0,0054H^2 + 0,0012H \cdot f + 0,0012f^2$$

$$Rq = 3,1586 - 0,0758f + 0,0365H + 0,0002H^2 + 0,0005H \cdot f - 0,0003f^2$$

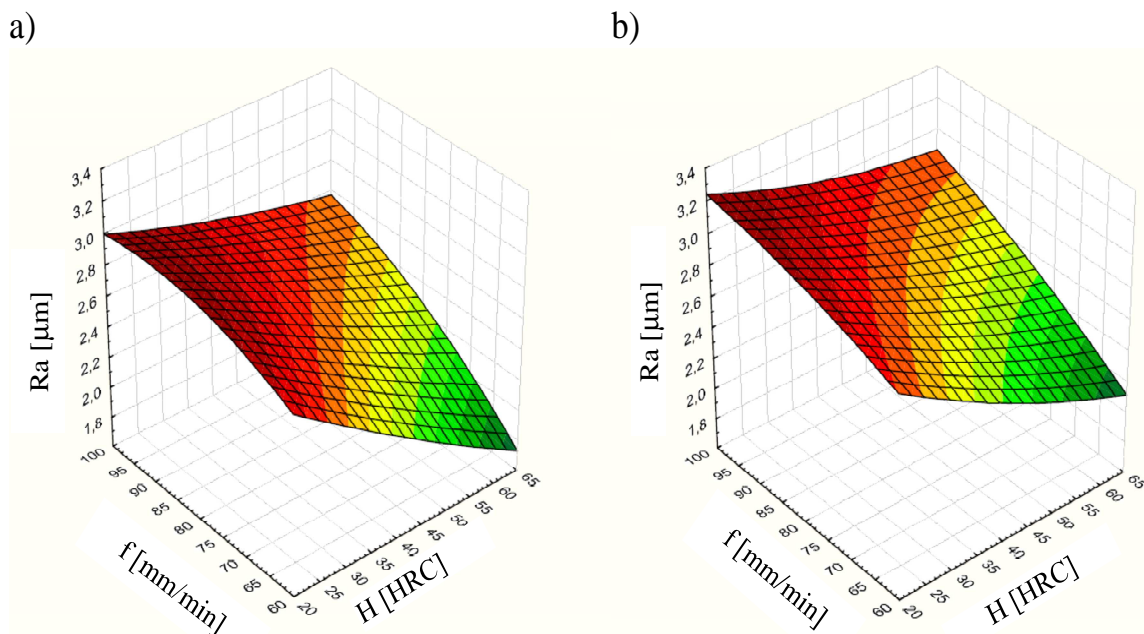
Dla ciśnienia strugi $p = 250$ MPa ich postaci są następujące:

$$Ra = 2,4456 - 0,0406f + 0,0228H + 0,0001H^2 + 0,0002H \cdot f - 0,0001f^2$$

$$Rz = 27,7409 - 0,3905f - 0,1223H + 0,0026H^2 + 0,0005H \cdot f + 0,001f^2$$

$$Rq = 3,1475 - 0,0443f + 0,0247H + 3,75 \cdot 10^{-5} H^2 + 0,0003H \cdot f - 0,0001f^2$$

Na kolejnych rysunkach, rys. 2, 3 oraz 4, przedstawiono wykresy modeli w formie równania II stopnia z interakcjami wyznaczone dla uzyskanych w badaniach wyników.

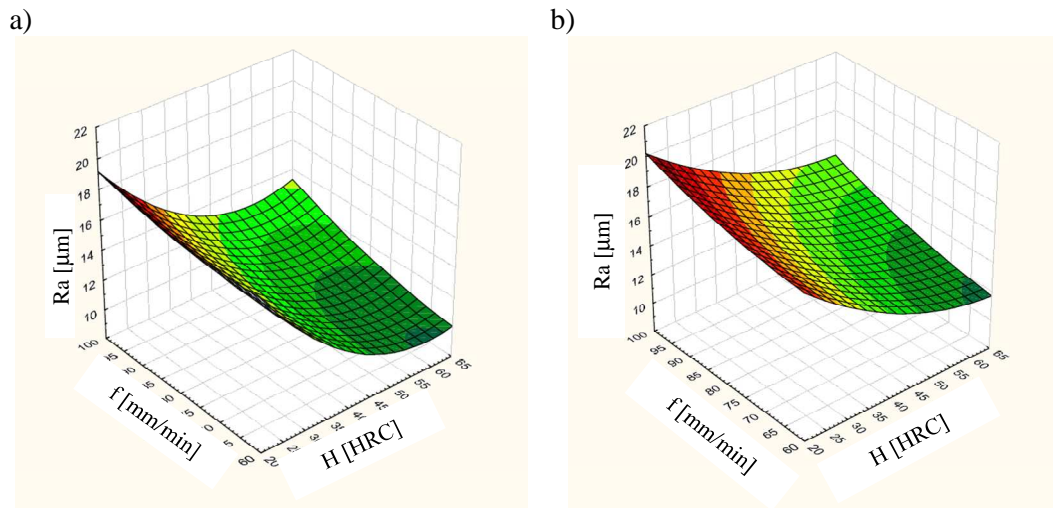


Rys. 2. Wykres zależności parametru chropowatości Ra od zmiennych: posuwu f i twardości materiału próbki H dla dwóch wartości ciśnienia strugi: a) $p = 200$ MPa, b) $p = 250$ MPa

Fig. 2. Graphs of relationship between roughness parameter Ra and variable factors: feed rate f and sample material hardness H , for abrasive-water jet pressure: a) $p = 200$ MPa, b) $p = 250$ MPa

Porównując wykresy zamieszczone na rys. 2, które stanowią graficzny obraz opracowanych modeli matematycznych, można stwierdzić, że w badanym zakresie zmienności wpływ posuwu f na wartość parametru Ra jest niewielki. Większy gradient obserwuje się w przypadku relacji tego parametru z twardością H próbki, przy czym jest on wyraźnie większy dla małych prędkości posuwu f .

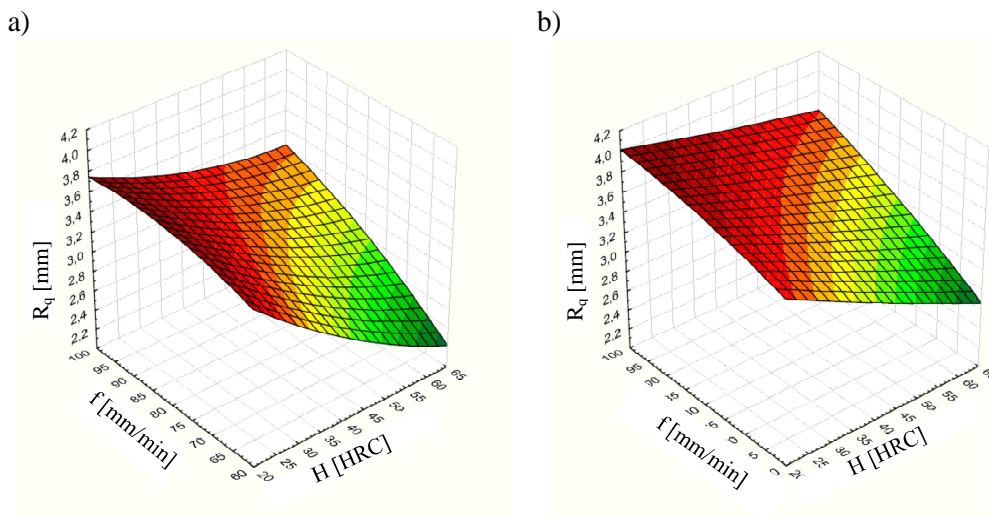
Porównując wykresy zamieszczone na rys. 3 dla $p = 200$ i 250 MPa, można zaobserwować, że gradient ten jest w obydwóch porównywanych przypadkach zbliżony przy dużych prędkościach posuwu f , natomiast dla małych posuwów jest on wyraźnie większy dla $p = 200$ MPa.



Rys. 3. Wykres zależności parametru chropowatości R_z od zmiennych: posuwu f i twardości materiału próbki H dla dwóch wartości ciśnienia strugi: a) $p = 200\text{MPa}$, b) $p = 250\text{MPa}$

Fig. 3. Graphs of relationship between roughness parameter R_z and variable factors: feed rate f and sample material hardness H , for abrasive-water jet pressure: a) $p = 200\text{MPa}$, b) $p = 250\text{MPa}$

Analiza wykresów (rys. 2 – 4) opisujących trzy analizowane parametry chropowatości R_a , R_z , R_q wykazuje, że modele opracowane na podstawie zarejestrowanych zmian w strukturze przecinanych powierzchni są pod względem jakościowym podobne, tzn. stwierdzone trendy są takie same.



Rys. 4. Wykres zależności parametru chropowatości R_q od zmiennych: posuwu f i twardości materiału próbki H dla dwóch wartości ciśnienia strugi: a) $p = 200\text{MPa}$, b) $p = 250\text{MPa}$

Fig. 4. Graphs of relationship between roughness parameter R_q and variable factors: feed rate f and sample material hardness H , for abrasive-water jet pressure: a) $p = 200\text{MPa}$, b) $p = 250\text{MPa}$

Modele matematyczne opracowane dla zarejestrowanych zmian nie mają w przyjętych zakresach zmienności ekstremów lokalnych co powoduje, że nie można na ich podstawie

dobrac parametrów obróbki. Mogą one natomiast służyć jako źródło informacji w jakim kierunku należy dokonywać zmian, aby uzyskać oczekiwane efekty w zakresie chropowatości, np. w celu zmniejszenia chropowatości należy zmniejszyć ciśnienie i prędkość posuwu, albo obydwie wielkości równocześnie.

4. PODSUMOWANIE

Podsumowując analizę porównawczą wykresów przedstawionych na rys. 2, 3 i 4 można stwierdzić, że w przyjętych w badaniach zakresach zmienności wielkości wejściowych stwierdzono występowanie ekstremum jedynie na brzegach przedziałów, a zaobserwowane trendy w relacjach są wyraźne i powtarzalne w przypadku wszystkich analizowanych parametrów chropowatości.

Zbiór tworzyw konstrukcyjnych, a także ich stanów kwalifikacyjnych, a więc stanów w jakich występują, jest praktycznie nieograniczony, tak więc prezentowane badania szczegółowe mają aspekt poznawczy. Opracowane modele matematyczne pozwalają uzyskać informacje jakie działania w zakresie doboru parametrów przecinania należy podjąć, aby przecinana powierzchnia charakteryzowała się większą bądź mniejszą chropowatością. W prezentowanym w pracy przypadku badań dotyczą one przecinanych powierzchni stalowych.

LITERATURA

- [1] BORKOWSKI J., BORKOWSKI P., 2008, *Przecinanie zawieszinową strugą wodno-ścierną wytwarzaną metodą BORJET*, Inżynieria Maszyn, 13/1-2, 104-112.
- [2] KOSMOL J., RYBARZ M., WALA T., NIEDBAŁA M., 2002, *Selected problems and FEM modeling of composites cutting using water jet and abrasive-water jet*, Proc. of the 16th International Conference on Water Jet, Lyon, France, 246-255.
- [3] PEREC A., 2001, *Własności powierzchni materiałów konstrukcyjnych przecinanych wysokociśnieniową strugą hydrościerną*, Materiały XXIV NSzOŚ, Łopuszna, 137-144.
- [4] OCZOŚ K.E., 2000, *Istota, znaczenie i rozwój hybrydowych procesów obróbki ubytkowej*, Zeszyty Naukowe ATR Bydgoszcz nr 225, seria Mechanika, 46, 145-164.
- [5] STYP-REKOWSKI M., 2003, *Obróbki hybrydowe i nietradycyjne jako uzupełnienie zbioru technik wytwarzania skoncentrowanymi nośnikami energii*, Wybrane zagadnienia obróbek skoncentrowaną wiązką energii, red. STYP-REKOWSKI M., Bydgoskie Towarzystwo Naukowe, 213-216.

INFLUENCE OF STEEL QUALIFYING STATE ON RESULTS OF ABRASIVE-WATER JET CUTTING

In this paper results of investigations verified effects of cutting process of steel samples by means of abrasive –water jet were presented. Samples made of steel 1.2080 in three states: normalized (23HRC), quenched and tempered (43 HRC) and hardened (63HRC) were cut. As criterion of cutting process assessment machined surfaces state were assumed and its measure were some roughness parameters: R_a , R_z and R_q . Variable factors in presented investigations there were: feed rate f and water-abrasive jet pressure p . It seems that tested factors have essential but differential influence on roughness parameters.