

Wpływ parametrów technologicznych na chropowatość powierzchni po toczeniu oraz predykcja chropowatości z użyciem sztucznych sieci neuronowych

The influence of technological parameters on surface roughness during turning and roughness prediction using artificial neural networks

IRENEUSZ ZAGÓRSKI
MONIKA KULISZ
TOMASZ WARDA *

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.10.157>

Analizowano wpływ zmiany parametrów technologicznych – posuwu oraz prędkości skrawania – na wybrane parametry chropowatości 2D po toczeniu. Wykorzystano stop aluminium EN-AW 7075 (AlZn5.5MgCu). Wykazano istotny wpływ posuwu oraz brak wpływu prędkości skrawania na parametry chropowatości powierzchni. W celu przedstawienia możliwości predykcji parametrów chropowatości tego procesu wykonano symulację jednego z nich (R_z) z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych.

SŁOWA KLUCZOWE: stopy aluminium, toczenie, chropowatość powierzchni 2D, symulacje, sztuczne sieci neuronowe

The purpose of this investigation was to determine whether and to what extent the technological parameters of turning (feed, cutting speed) affect selected surface roughness parameters of aluminum alloy EN-AW 7075 (AlZn5.5MgCu). The principal findings indicate a significant impact of feed and show on the surface roughness and simultaneously show that cutting speed has no effect on the value of surface roughness parameters under investigation. An artificial neural network was employed to evaluate the prediction of surface roughness parameter R_z in turning.

KEYWORDS: aluminum alloys, turning, 2D surface roughness, simulations, artificial neural networks

Stopy lekkie (aluminium oraz magnezu) są powszechnie stosowane w różnych obszarach przemysłu jako nowoczesny materiał konstrukcyjny (ze względu na korzystne właściwości wytrzymałościowe i niską gęstość). Na skrawalność stopów aluminium mogą mieć wpływ takie właściwości fizyczne, jak: duża rozszerzalność i przewodność cieplna oraz mały moduł sprężystości. Z kolei na chropowatość powierzchni mogą mieć wpływ: materiał narzędziowy, jakość wykonania oraz geometria ostrza narzędzia, właściwości materiału obrabianego (np. R_m , HB) i parametry technologiczne.

Skrawalność stopów aluminium zależy głównie od ich składu chemicznego (ok. 10% Si stanowi istotną granicę skrawalności, powyżej której może wystąpić zwiększone zużycie ostrzy narzędzi) i struktury stopu, kształtowanej podczas od obróbki cieplnej [8, 15, 16]. W pewnym uogólnieniu skrawalność stopów lekkich (np. stopów aluminium i magnezu) może być zbliżona w przypadku porównywalnych cech wytrzymałościowych oraz braku cząstek (np. Si) powodujących zwiększone zużycie ściernie.

Podczas toczenia stopu AZ31 chropowatość zmniejsza się wraz ze wzrostem prędkości skrawania (do v_c ok. 160 m/min), a zwiększa się wraz ze wzrostem głębokości oraz posuwu. Zmiana parametru R_a mieści się w zakresie ok. 1 μm ($R_a = 1,1 \div 2,2 \mu\text{m}$) [9]. Podobne zależności obserwowano przy obróbce stopu AZ61 (v_c do 200 m/min). Parametr R_a w badaniach doświadczalnych wynosił $R_a \approx 0,1 \div 2,8 \mu\text{m}$ [1].

Podczas toczenia stopów aluminium istotne jest, oprócz odpowiedniej geometrii (γ do 30° , α do 10°), kontrolowane łamanie bądź zwijanie wióra. Jak podano w [12], firma Ceratizit wprowadziła zintegrowany w narzędziu system chłodzenia sprężonym powietrzem (możliwość obróbki stopów aluminium na sucho).

Często przy toczeniu zgrubnym stopów lekkich narzędziami węglowymi (do v_c ok. 400 m/min) chropowatość powierzchni obrobionej $R_a < 10 \mu\text{m}$. Również zmiana kąta natarcia (wzrost γ) może pozytywnie wpływać na poprawę jakości powierzchni finalnej [16].

Stop AlMg1Si jest trudno skrawalny (ciągliwy, twardy, umacniany walcowaniem kuźniczym). Zastosowanie narzędzia z ostrzem PCD, z laserowo ukształtowanym zwińcem wiórów oraz fazką z tzw. ujemnym kątem natarcia γ może podnieść efektywność procesu (łamanie wiórów w niewielkich odstępach czasu i łatwe ich odprowadzanie ze strefy skrawania) [11].

Podobna zależność może występować podczas obróbki powierzchni łożysk wykonywanych z odlewniczych eutektycznych lub zaeutektycznych stopów aluminium. W tym przypadku uzyskano optymalne wartości parametrów skrawania dla $v_c = 610 \text{ m/min}$ oraz $a_p \leq 1 \text{ mm}$ [14].

Pozytywny wpływ na wskaźniki skrawalności i właściwości skrawane narzędzi, a nawet na znaczący wzrost trwałości narzędzi, ma zaokrąglenie krawędzi skrawającej (lepsza przyczepność powłoki do podłoża i zmniejszenie skłonności do złuszczenia się na krawędziach ostrzy) [2]. Może ono znacznie poprawić właściwości eksploatacyjne narzędzi, np. w procesie obróbki ścierniej.

To korzystne zjawisko tłumaczy się m.in. uzyskaniem znacznie mniejszej chropowatości powierzchni roboczych ostrza i tym samym mniejszego tarcia na powierzchniach kontaktu narzędzia z obrabianym przedmiotem oraz ograniczeniem zużycia ściernego i adhezyjnego ostrza [2, 6]. Promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej można ponadto wykorzystać do określenia minimalnej grubości warstwy skrawanej, gdzie wartość h_{\min} jest iloczynem wartości współczynnika tarcia pomiędzy ostrzem skrawającym a obrabianym materiałem i wielkości promienia zaokrąglenia ostrza skrawającego [10]. Logiczne jest zatem stwierdzenie, że rola r_ϵ rośnie podczas dokładnej

* Dr inż. Ireneusz Zagórski (i.zagorski@pollub.pl), mgr inż. Tomasz Warda (t.warda@pollub.pl) – Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, Wydział Mechaniczny Politechniki Lubelskiej; dr inż. Monika Kulisz (m.kulisz@pollub.pl) – Katedra Organizacji Przedsiębiorstwa, Wydział Zarządzania Politechniki Lubelskiej

obróbki wykończeniowej. Dla kąta β_n ($50 \div 70^\circ$) otrzymuje się – oczekiwane dla nowej krawędzi z twardego spieku – wartości promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej $r_n \approx 6 \div 11 \mu\text{m}$. W praktyce wartości są większe – w granicach ok. $15 \mu\text{m}$. Rosną one wraz z postępującym zużyciem ostrza narzędzia [13]. Na chropowatość powierzchni po toczeniu mogą ponadto wpływać warunki odwzorowania krawędzi skrawającej na obrabianej powierzchni [3].

Jak podano w pracach [5, 12, 16] oraz w zaleceniach producentów narzędzi [17], popularne stopy aluminium można obrabiać z $v_c \geq 2500 \text{ m/min}$. Jednak ze względów związanych z konstrukcją maszyn technologicznych parametry te mogą być w pewnych warunkach ograniczane. Wydaje się więc istotne i celowe wykonywanie prób skrawalności w zakresie zwiększonych parametrów obróbkowych, by podnosić wydajność oraz efektywność obróbki stopów lekkich.

Jednak wzrost efektywności wytwarzania może się przyczynić do wzrostu wymagań stawianych narzędziom skrawającym. Jako jedno z podstawowych kryteriów oceny przydatności narzędzia do obróbki można przyjąć zapewnienie odpowiedniej jakości powierzchni [7, 15, 16]. Udowodniono również wielokrotnie, że istnieją ściśle związki między topografią powierzchni a właściwościami użytkowymi części maszyn. Są więc praktyczne możliwości poprawy jakości technologicznej i użytkowej części, m.in. w operacjach wykończeniowych [4].

Metodyka i cel badań

Główne etapy badań obejmowały obróbkę z wysokimi prędkościami skrawania (v_c do 1700 m/min), analizę parametrów 2D chropowatości powierzchni oraz predykcję wybranego parametru chropowatości powierzchni (R_z) z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych.

Obróbkę prowadzono na centrum tokarskim DMG MORI CTX450 z systemem sterowania Sinumerik 840D. Jako narzędzie wykorzystano nóż tokarski składany o symbolu oprawki SDJCL 25x25M11 CORO Turn 107. Do toczenia wytypowano płytkę węglkową DCGT 11T304-FN-ALU-H210T (Cerazit) o wartości promienia naroża $r_\epsilon = 4 \text{ mm}$ oraz promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej ok. $11 \mu\text{m}$. Przyjęto stałą głębokość skrawania $a_p = 1 \text{ mm}$ oraz zmienny zakres pozostałych parametrów technologicznych: $f = 0,05 \div 0,15 \text{ mm/obr}$, $v_c = 1000 \div 1700 \text{ m/min}$.

Wykorzystano stop EN-AW 7075 (AlZn5.5MgCu) w stanie T6 (przesycony, sztucznie starzony). Podczas skrawania zastosowano emulsję obróbkową. Długość drogi toczenia wynosiła $L = 20 \text{ mm}$. Do pomiarów chropowatości powierzchni obrabianej wykorzystano profilografometr Hommel Tester T1000. Pomiary chropowatości powtórzono pięciokrotnie na każdej powierzchni. Wartość odcinka elementarnego wynosiła $l_r = 0,8 \text{ mm}$, a odcinek pomiarowy $l_n = 4,8 \text{ mm}$.

Wyniki badań doświadczalnych (wartości średnie parametrów chropowatości) były elementem wejściowym w symulacjach parametru chropowatości R_z z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych, które przeprowadzono w oprogramowaniu Statistica. W symulacjach wykorzystano sieci MLP (*multi-layered perceptron*) z funkcjami aktywacji: liniową, wykładniczą, logistyczną, tanh i sinus. Wskaźnikami poprawnego doboru sieci były: jakość uczenia, jakość walidacji, a także błąd uczenia wyznaczony metodą najmniejszych kwadratów.

Aby budowa sieci była jak najprostsza, mają one jedną warstwę ukrytą z liczbą neuronów w zakresie $1 \div 10$ (dobraną eksperymentalnie), warstwę wejściową z dwoma neuronami (prędkość skrawania v_c , posuw f) oraz

warstwę wyjściową z jednym neuronem (parametr chropowatości R_z). Do uczenia sieci wykorzystano metodę gradientową BFGS (Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno). Statistica Automatyczne Sieci Neuronowe umożliwiła wykorzystanie dwóch szybkich algorytmów uczących: algorytmu gradientów sprzężonych i algorytmu BFGS. Lepsze wyniki w przypadku symulacji tego procesu przyniósł algorytm BFGS. Podczas uczenia sieci 75% wyników pomiarów stanowiło grupę uczącą, a 25% – walidacyjną. Ze względu na niewielką liczbę zestawów danych zrezygnowano z grupy testowej [15, 18].

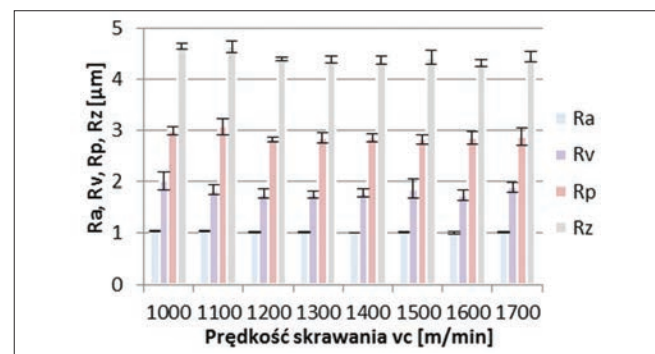
Wyniki badań i symulacji oraz ich analiza

Po uwzględnieniu promienia naroża r_ϵ oraz wartości posuwu f można obliczyć teoretyczną chropowatość powierzchni – parametr R_{zt} . Dla analizowanych zakresów parametrów R_{zt} wyniósł odpowiednio: $4,5 \mu\text{m}$ – w przypadku zmiany v_c , $0,8 \div 7,0 \mu\text{m}$ – w przypadku zmiany f .

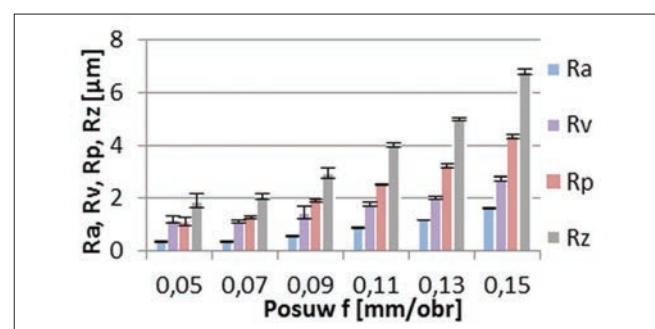
Na wykresach (rys. 1, 2) przedstawiono zmiany parametrów 2D chropowatości powierzchni (R_a , R_z , R_v , R_p) w zależności od zmiany prędkości skrawania v_c oraz posuwu f . Dodatkowo podano wartości liczbowe parametru R_{sm} .

Na rys. 1 przedstawiono parametry chropowatości R_a , R_v , R_p , R_z dla różnych prędkości skrawania v_c . Wartości parametru R_a wynoszą ok. $1,0 \mu\text{m}$. Wartości parametru R_p mieszczą się w przedziale $2,7 \div 3,1 \mu\text{m}$. Wartość parametru R_z wynosi ok. $4,5 \mu\text{m}$, natomiast R_v – ok. $2 \mu\text{m}$. Dla całego zakresu v_c wartość liczbową parametru R_{sm} wynosiła ok. $118 \mu\text{m}$.

Można więc zauważyć, że prędkość skrawania v_c nie wpływa w istotny sposób na zmianę chropowatości powierzchni. Wynika stąd ważny wniosek, że możliwa jest obróbka z wysokimi wartościami v_c bez pogorszenia jakości powierzchni obrabianej. Jest to ważne stwierdzenie w kontekście efektywności oraz wydajności procesów obróbkowych.



Rys. 1. Wpływ prędkości skrawania v_c na parametry R_a , R_v , R_p , R_z ($f = 0,12 \text{ mm/obr}$, $a_p = 1 \text{ mm}$)



Rys. 2. Wpływ posuwu f na parametry R_a , R_v , R_p , R_z ($v_c = 1400 \text{ m/min}$, $a_p = 1 \text{ mm}$)

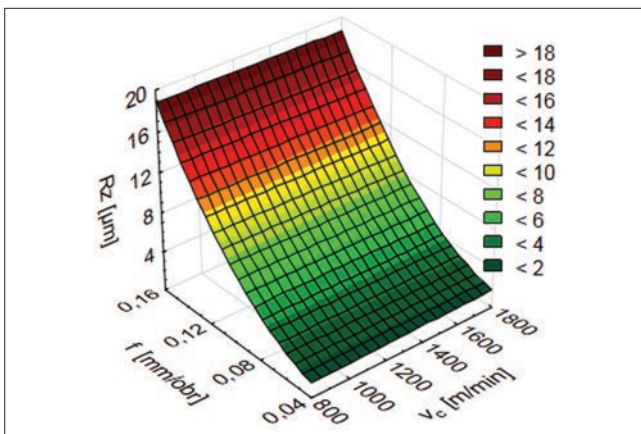
Na rys. 2 zaprezentowano parametry chropowatości R_a , R_v , R_p , R_z . Parametr R_z zawiera się w przedziale ok. $2 \div 7 \mu\text{m}$, natomiast R_v – ok. $1 \div 3 \mu\text{m}$. Wartości parametru R_a rosną wraz ze wzrostem posuwu – do ok. $2 \mu\text{m}$. Wartości parametru R_p zawierają się w zakresie ok. $1 \div 4 \mu\text{m}$. Dla całego zakresu posuwu f wartości liczbowe parametru R_{sm} mieściła się w granicach $85 \div 147 \mu\text{m}$. Można więc zauważyć, że posuw wpływa na dość istotny sposób na wartość parametrów chropowatości powierzchni.

W wyniku badań doświadczalnych możliwa była predykcja wybranego parametru chropowatości – R_z – z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych. Podczas symulacji każdego parametru wyznaczono 100 sieci, z których na bazie wymienionych wcześniej wskaźników wybrano trzy najlepsze. Ich charakterystyka została przedstawiona w tabelicy.

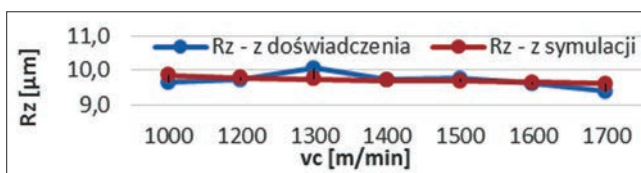
Na podstawie analizy otrzymanych sieci neuronowych można stwierdzić, że najlepsze wyniki osiągnięto dla sieci MLP 2-3-1. Wyniki symulacji dla tej sieci przedstawiono na rys. 3.

TABLICA. Parametry sieci dla symulacji parametru chropowatości R_z

Największa wysokość profilu R_z			
Nr sieci	1	2	3
Nazwa sieci	MLP 2-7-1	MLP 2-6-1	MLP 2-3-1
Jakość (uczenia), %	99,54	99,66	99,74
Jakość (walidacji), %	99,96	99,99	99,98
Błąd (uczenia/walidacji)	0,025/0,228	0,016/0,068	0,012/0,017



Rys. 3. Wyniki symulacji parametru R_z w zależności od prędkości skrawania v_c oraz posuwu f dla sieci MLP 2-3-1



Rys. 4. Porównanie wyników symulacji parametru R_z dla sieci MLP 2-3-1 z wartościami rzeczywistymi dla posuwu $f = 0,12 \text{ mm/obr}$ i zmiennego parametru v_c

Na podstawie przeprowadzonych symulacji można (wpisując w Statistica wartość parametrów v_c oraz f_z) otrzymać wartość parametru chropowatości R_z . W celu weryfikacji symulowanego modelu porównano wartości rzeczywiste z wartościami przewidywanymi (rys. 4). Błąd określenia wartości parametrów nie przekraczał 8%. Można więc uznać, że wyniki symulacji odznaczają się akceptowalnym poziomem błędów i mogą być narzędziem do określenia parametrów obróbki w celu otrzymania założonej chropowatości.

Podsumowanie i wnioski

Analiza pokazuje istotność prawidłowego doboru parametrów technologicznych skrawania. Pomiarów oraz analiza wyników pozwalają na sformułowanie ważniejszych wniosków ogólnych:

- prędkość skrawania nie wpływa w znaczny sposób na parametry chropowatości powierzchni po toczeniu (wartość R_a wyniosła ok. $1 \mu\text{m}$, R_z – ok. $4,5 \mu\text{m}$),
- istotny wpływ na chropowatość powierzchni wykazuje posuw, wpływ ten jest w przybliżeniu proporcjonalny do wartości posuwu; jest to spowodowane m.in. wzrostem przekroju warstwy skrawanej,
- możliwe jest stosowanie wysokich prędkości skrawania (do v_c 1700 m/min) bez obawy pogorszenia chropowatości obrobionej powierzchni (wzrost efektywności procesu),
- możliwe jest zamodelowanie parametrów chropowatości w zależności od prędkości skrawania i posuwu z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych (błąd pomiędzy wartościami rzeczywistymi a uzyskanymi z modelu dla parametru R_z nie przekracza 8%),
- uzyskane w wyniku symulacji modele umożliwiają wyznaczenie zestawu parametrów obróbki pozwalającego na otrzymanie założonej chropowatości powierzchni po obróbce.

Dalsza analiza parametrów chropowatości 2D i 3D, może stanowić istotną przesłankę dla inżynierów projektujących technologie obróbki toczeniem stopów aluminium.

LITERATURA

- Alharthi N.H., Bingol S., Abbas A.T., Ragab A.E., Aly M.F., Alharbi H.F. „Prediction of cutting conditions in turning AZ61 and parameters optimization using regression analysis and artificial neural network”. *Advances in Materials Science and Engineering*. ID 1825291 (2018): s. 1–10.
- Cichosz P., Kuzinovski M., Tomov M., Urych A. „Zaokrąglenie krawędzi skrawających ostrzy z węglików spiekanych”. *Mechanik*. 7 (2018): s. 458–462.
- Chwalczuk T., Rybicki M., Korzeniewski D., Przystacki D. „Chropowatość po toczeniu materiałów stosowanych w konstrukcjach lotniczych”. *Mechanik*. 10 (2016): s. 1312–1313.
- Grzesik W. „Wpływ topografii powierzchni na właściwości eksploatacyjne części maszyn”. *Mechanik*. 8–9 (2015): s. 587–593.
- Horvath R., Palasti-Kovacs B., Sipos S. „Optimal tool selection for environmental-friendly turning operation of Al”. *Hungarian Journal of Industrial Chemistry Veszperem*. 39, 2 (2011): s. 257–263.
- Kalisz J. „Właściwości tribologiczne warstwy wierzchniej po obróbkach wykończeniowych stopu aluminium”. *Mechanik*. 7 (2018): s. 492–495.
- Kamieńska-Krzowska B., Kłonica M. „Rola strategii pomiarów topografii powierzchni w ocenie wybranych parametrów chropowatości”. *Mechanik*. 8–9 (2014): s. 138–145.
- Kuczmaszewski J., Pieško P. „Wear of milling cutters resulting from high silicon aluminium alloy cast AlSi21CuNi machining”. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*. 16, 1 (2014): s. 37–41.
- Lu L., Hu S., Liu L., Yin Z. „High speed cutting of AZ31 magnesium alloy”. *Journal of Magnesium and Alloys*. 4, 2 (2016): s. 128–134.
- Nowakowski Ł., Skrzyniarz M., Miko E. „Porównanie sposobu wyznaczania wartości minimalnej grubości warstwy skrawanej dla toczenia i frezowania”. *Mechanik*. 8–9 (2015): s. 733–741.
- Ocoś K.E. „Doskonalenie procesów kształtowania ubytkowego stopów aluminium”. *Mechanik*. 3–4 (2009): s. 153–163, 249–256.
- Ocoś K.E., Kawalec A. „Kształtowanie metali lekkich”. Warszawa: Wyd. Naukowe PWN, 2012.
- Storch B. „Podstawy obróbki skrawaniem”. Koszalin: Wyd. Politechniki Koszalińskiej, 2001.
- Wojciechowski S., Lisiak P., Twardowski P. „Optimization of cutting parameters for the longitudinal turning of combustion engines' pistons”. *Mechanik*. 8–9 (2016): s. 1022–1023.
- Zagórski I., Kulisz M., Semeniuk A., Malec A. „Artificial neural network modelling of vibration in the milling of AZ91D alloy”. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 3 (2017): s. 261–269.
- Zagórski I., Warda T., Włodarczyk M. „Wpływ parametrów technologicznych obróbki toczeniem na wybrane parametry chropowatości powierzchni stopu aluminium 7075”. *Mechanik*. 8–9 (2016): s. 1060–1061.
- <http://www.sandvik.coromant.com/pl> (dostęp: 7.05.2018 r.).
- <http://www.statsoft.pl/Portals/0/Downloads/Sieci%20neuronowe.pdf> (dostęp: 11.07.2018 r.).