

Analysis of selected effects of the conventional and unconventional machining of titanium alloys

Analiza wybranych konwencjonalnych i niekonwencjonalnych metod obróbki stopów tytanu

PAWEŁ KAROLCZAK
DARIUSZ POROŚ
MACIEJ KOWALSKI*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.10.86>

In this article, the results of wire WEDM (wire electrical discharge machining) of Ti6Al4V are collated by turning with modified wiper tool geometry. The electrode is CuZn37 brass wire with a diameter of 0.25 mm. The analysis of 3D geometry of the Ti6Al4V alloy surface after wiper and WEDM cutting is presented. The possibilities and limitations of wiper and WEDM machining of titanium alloys were indicated.

KEYWORDS: WEDM, wiper tools, turning, 3D roughness, titanium alloys

W artykule zestawiono wyniki obróbki Ti6Al4V poprzez toczenie płytką o zmodyfikowanej geometrii typu wiper z wynikami obróbki WEDM (*wire electrical discharge machining*) za pomocą elektrody mosiężnej CuZn37 o średnicy 0,25 mm. Przenalizo- wano geometrię 3D powierzchni stopu Ti6Al4V po obróbce płytkami wiper oraz po obróbce elektroerozyjnej. Wskazano na możliwości i ograniczenia obróbki płytkami wiper oraz WEDM stopów tytanu.

SŁOWA KLUCZOWE: wycinanie elektroerozyjne, płytki typu wiper, toczenie, chropowatość 3D, stopy tytanu

Kształtowanie stopów tytanu metodami ubytkowymi jest trudne zarówno ze względów technicznych, jak i ekonomicznych. Problematiczne jest bowiem uzyskanie zadowalającej wydajności obróbki i niewielkiego zużycia ostrzy (i tym samym małych kosztów narzędziowych), a jednocześnie zapewnienie odpowiedniej jakości powierzchni. Prowadzi się więc próby osiągnięcia tego celu za pomocą niekonwencjonalnych metod obróbki lub przez zastosowanie specjalnych narzędzi w tradycyjnych metodach kształtowania ubytkowego.

Konwencjonalna i niekonwencjonalna obróbka tytanu

Trudnoobrabialne materiały, do jakich zalicza się stopy tytanu, można kształtować tradycyjnymi metodami ubytkowymi oraz metodami niekonwencjonalnymi. Efektywne wytwarzanie elementów ze stopów tytanu jest możliwe pod warunkiem odpowiedniego doboru warunków obróbki konwencjonalnej albo dzięki zastosowaniu obróbki erozyjnej czy technik przyrostowych.

W niniejszym artykule autorzy skoncentrowali się na możliwościach ostrzy o geometrii wygładzającej oraz wycinania elektroerozyjnego – WEDM (*wire electrical discharge machining*) – w odniesieniu do obróbki stopów tytanu.

Jak wiadomo, przez modyfikację promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej można – bez zmiany wartości posuwu – uzyskać znacząco mniejszą chropowatość albo

przy zachowaniu tej samej chropowatości istotnie zwiększyć posuw [2].

W pracy [4] analizowano wpływ warunków toczenia ostrzami typu wiper na jakość obrobionej powierzchni. Badano proces toczenia stali C45 w warunkach minimalnego smarowania (MQL) z chłodzeniem sprężonym powietrzem oraz na sucho. Potwierdzono, że zastosowanie płytek wiper pozwala na wyraźne zmniejszenie parametru chropowatości w porównaniu z obróbką zwykłymi płytkami – niezależnie od systemu chłodzenia. Również w obróbce materiałów trudnoobrabialnych, np. kompozytów, zastosowanie ostrzy wygładzających znacznie poprawia chropowatość powierzchni [3]. Płytki z geometrią dogładzającą wiper mogą się zatem przyczynić do znacznego wzrostu produktywności i obniżenia kosztów procesu dzięki możliwości zastosowania w obróbce wysokich posuwów.

Od lat prowadzone są prace nad efektami elektroerozyjnej obróbki stopów tytanu. Wyniki większości eksperymentów wskazują, że większą wydajność obróbki elektroerozyjnej można osiągnąć przez zastosowanie polaryzacji z dodatnią elektrodą roboczą – zwłaszcza gdy dielektrykiem jest nafta. Wynika to z faktu osiadania cząstek węgla na narzędziu. Warstwa węgla chroni narzędzie przed erozją elektryczną [6]. Oczywiście wydajność wycinania wzrasta wraz ze zwiększaniem mocy wyładowań. Wówczas większa gęstość prądu powoduje intensywniejsze usuwanie nadmiaru. Wydłużenie czasu przerwy prowadzi do obniżenia wydajności, jednak jego skrócenie musi uwzględniać czas niezbędny na wyplukanie ze szczeliny produktów erozji. Na wydajność WEDM wpływają także przewodność cieplna i temperatura topnienia obrabianego materiału. Materiały o wysokiej temperaturze topnienia i wyższej przewodności cieplnej charakteryzują się mniejszą obrabialnością elektroerozyjną dzięki dużej wymianie ciepła wewnątrz materiału i z otoczeniem [5].

Podczas obróbki WEDM tytanu i jego stopów wzrost energii wyładowań powoduje zwiększoną chropowatość powierzchni. Niskiej chropowatości powierzchni sprzyja wydłużenie czasu przerwy między wyładowaniami. Wówczas dochodzi do dokładnego oczyszczenia szczeliny elektrodowej z produktów elektroerozji. Dodatkowo istotny jest wpływ ciśnienia dielektryka oraz naciągu elektrody drutowej na osiągnięcie założonej wartości chropowatości powierzchni. Wyższe ciśnienie przepłukiwania ułatwia to zadanie. Dobre przepłukiwanie szczeliny obniża temperaturę elektrody i umożliwia jej większy naciąg bez ryzyka zerwania. Większy naciąg elektrody eliminuje drgania drutu [7]. Badania nad usuwaniem warstwy zmienionej

* Dr inż. Paweł Karolczak, pawel.karolczak@pwr.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0002-0595-1580> – Katedra Obrabiarek i Technologii Mechanicznych, Politechnika Wroclawska, Wrocław, Polska

Dr inż. Dariusz Poroś, dariusz.poros@pwr.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0002-2336-1859> – Katedra Obrabiarek i Technologii Mechanicznych, Politechnika Wroclawska, Wrocław, Polska

Dr inż. Maciej Kowalski, maciej.kowalski@pwr.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0003-3413-8334> – Katedra Obrabiarek i Technologii Mechanicznych, Politechnika Wroclawska, Wrocław, Polska

cieplnie w kolejnych przejściach potwierdzają możliwość znacznego ograniczenia jej głębokości. Efekt jest widoczny już po trzech przejściach [1].

Wysoka temperatura i szybkie chłodzenie powierzchni powodują nierównomierny rozkład temperatury pomiędzy warstwami materiału. Po obróbce w materiale pozostają naprężenia – ściskające lub rozciągające. Zwykle są to naprężenia rozciągające – niepożądane, ponieważ pogarszają właściwości mechaniczne materiału. Do powstawania dużych naprężeń w warstwie wierzchniej przyczyniają się długi czas impulsu oraz wysoki prąd wyładowania [9]. Istotny wpływ na stan naprężeń mogą mieć wpływ różne materiały elektrody drutowej. W przypadku obróbki WEDM elektrodą mosiężną na powierzchni materiału uzyskano nawet naprężenia ściskające.

Skutecznym sposobem redukcji negatywnego wpływu naprężeń powierzchniowych na właściwości materiału jest relaksacja naprężeń poprzez celową obróbkę cieplną [8].

Metodyka badań

Celem badań była analiza wpływu zastosowania ostrzy wiper na wybrane efekty technologiczne toczenia stopu Ti-6Al-4V. Wyniki tych badań miały być także źródłem danych do oceny przydatności WEDM w obróbce stopów tytanu. Jako parametry oceny procesu skrawania wybrano postać wióra, wydajność procesu oraz chropowatość powierzchni. Przeprowadzono próby toczenia w zmiennych warunkach. W trakcie badań zebrano wióry.

Zgodnie z założonym celem do badań wykorzystano dwa rodzaje płytek skrawających: tradycyjną CCMT 09 T3 04-MF 1025 i z geometrią dogładzającą wiper CCMT 09 T3 04-WF 1025. Materiałem narzędziowym, z którego wykonano ostrza skrawające, był węgiel spiekany. Obie płytki miały warstwę powłoki z azotku tytanu, naniesioną metodą PVD. Próby przeprowadzono na tokarce CNC TUR 560 MN. Parametry skrawania dobrano zgodnie z zaleceniami producenta narzędzi:

- głębokość skrawania $a_p = 0,5$ mm;
- posuw $f = 0,08; 0,13; 0,117; 0,21; 0,24$ mm/obr;
- prędkość skrawania $v_c = 35; 70; 110$ m/min.

Obróbka WEDM, realizowana w kilku przejściach z odpowiednio dobranymi parametrami energetycznymi, pozwala zredukować HAZ przy osiągnięciu założonej chropowatości powierzchni i w zaplanowanej liczbie powtórzeń. Parametry procesu przedstawiono w tabelicy. Cięcie przebiegało w natrysku wody destylowanej. Zastosowana w badaniach średnica elektrody drutowej (0,25 mm) spełnia wymagania dotyczące cięcia materiału o wysokości 10 mm.

Dzięki wielosiowemu sterowaniu nowoczesne obrabiarki elektroerozyjne pozwalają na wycinanie złożonych kształtów, w tym stożków. Konstrukcja wycinarki elektroerozyjnej Agiecut Sprint, na której realizowano obróbkę w niniejszych badaniach, umożliwiła wycinanie w pięciu

TABLE. The most important WEDM parameters at the next stages of cutting

TABLICA. Najważniejsze parametry WEDM na kolejnych etapach wycinania

| U [V] | I [A] | ON [μ s] | OFF [μ s] | S [m/min] |
|---------|---------|-----------------|------------------|-------------|
| 80 | 4 | 2 | 10 | 10 |
| 120 | 8 | 0,5 | 4 | 8 |
| 80 | 8 | 0,2 | 2,5 | 8 |

Oznaczenia: U – napięcie, I – prąd, ON – czas wyładowania, OFF – czas przerwy między wyładowaniami, S – prędkość przewijania drutu

osiach sterowanych. Cięcie realizowano w natrysku bez zalewania wanny. Cięcie w natrysku cechuje większe nagrzewanie się obrabianego materiału.

Badania chropowatości (2D i 3D) powierzchni elementów wykonano za pomocą profilografometru firmy Mitutoyo SV-3200. W pomiarach wykorzystano igłę diamentową o promieniu zaokrąglenia stożka 2 μ m i kącie 60°. Skok końcówki wynosił 800 μ m. Profilografometr wyposażono w stół do pomiaru 3D o rozdzielczości 0,05 μ m. Korzystano z oprogramowania do pomiaru FORMTRACEPACK oraz analizy 3D McCube Ultimate.

Wyniki badań

Na rys. 1 i 2 przedstawiono wyniki pomiarów chropowatości R_a po toczeniu stopu tytanu Ti6Al4V z prędkością skrawania 35 i 110 m/min. Można stwierdzić, że bez względu na prędkość skrawania zastosowanie ostrzy wygładzających umożliwia znaczną poprawę jakości obrabianej powierzchni lub zwiększenie wydajności procesu toczenia. Jak wskazano w powołanej literaturze, wraz ze wzrostem posuwu zwiększa się wygładzający efekt ostrzy typu wiper. Dodatkowo zanikają okresowe i kierunkowe ślady obróbkowe, co jest efektem usuwania wierzchołków chropowatości przez ostrze wiper (rys. 3). Można więc przypuszczać, że pomimo ciągłej anizotropowości struktury jej trwałość będzie większa, a właściwości eksploatacyjne – lepsze.

Fig. 1. Surface roughness R_a depending on the feed (turning titanium alloy with cutting speed 35 m/min)

Rys. 1. Chropowatość powierzchni R_a w zależności od posuwu (toczenie stopu tytanu z prędkością skrawania 35 m/min)

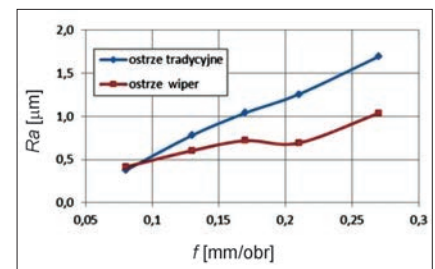


Fig. 2. Surface roughness R_a depending on the feed (turning of titanium alloy with cutting speed 110 m/min)

Rys. 2. Chropowatość powierzchni R_a w zależności od posuwu (toczenie stopu tytanu z prędkością skrawania 110 m/min)

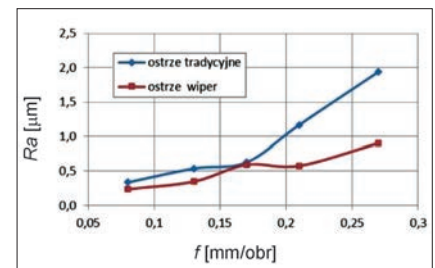
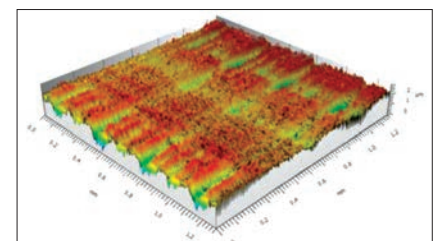


Fig. 3. Geometric structure of the 3D surface after turning with wiper blades

Rys. 3. Struktura geometryczna powierzchni 3D po toczeniu ostrzami wiper



Przeanalizowano także postać wiórów powstających podczas toczenia. Przykładowe zdjęcia wiórów (powstałych w trakcie obróbki z parametrami, przy których za pomocą ostrzy wygładzających udaje się uzyskać zdecydowanie mniejszą chropowatość powierzchni) przedstawiono na rys. 4. Widać, że zastosowanie ostrzy wiper nie wpływa znacząco na postać wiórów. Mają one kształt i długość porównywalne z wiórami typowymi dla toczenia ostrzami o tradycyjnej geometrii. Można jednak

zauważyć, że zwiększanie prędkości skrawania sprawia, że wióry stają się bardziej wstęgowe i dłuższe, co może skutecznie ograniczyć możliwość zastosowania toczenia z taką prędkością. Dodatkowo prędkość skrawania na poziomie 110 m/min powoduje, że ostrza – zarówno konwencjonalne, jak i wygładzające – intensywniej się zużywają.

Wyniki badań stopu Ti6Al4V po obróbce WEDM potwierdzają związek pomiędzy wysoką temperaturą podczas procesu a zmianami właściwościami na powierzchni wycinanych materiałów. Zaplanowano analizę po pierwszym, zgrubnym cięciu oraz po cięciu trzecim – wykańczającym. Na powierzchni zgrubnie przeciętej metodą elektroerozyjną znajduje się wiele nierówności, nieciągłości i kraterów o różnej głębokości (rys. 5). Te niedoskonałości powierzchni mogą się stać koncentratorami naprężeń w warunkach zwiększonego obciążenia.

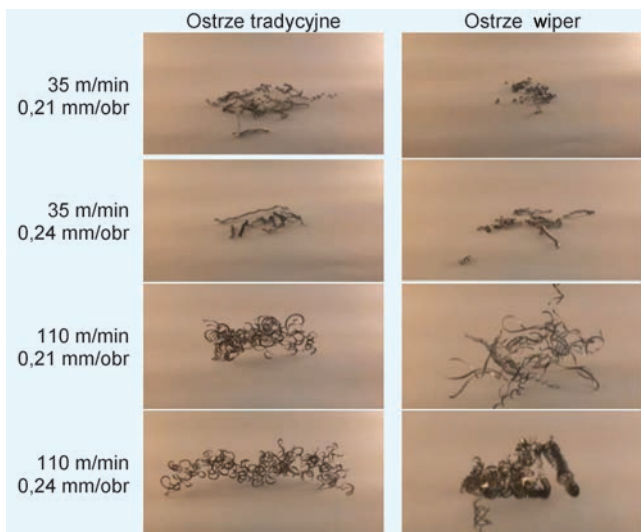


Fig. 4. Chips formed during turning of the Ti6Al4V alloy with traditional and smoothing blades

Rys. 4. Wióry powstające podczas toczenia stopu Ti6Al4V ostrzami tradycyjnymi i wygładzającymi

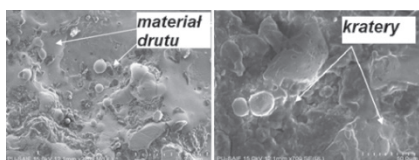


Fig. 5. Microscopic photo of the Ti6Al4V surface after coarse WEDM

Rys. 5. Zdjęcie mikroskopowe powierzchni Ti6Al4V po zgrubnej obróbce WEDM

Chropowatość powierzchni po cięciu zgrubnym była niezadowalająca i wynosiła $R_a = 4 \mu\text{m}$. Również głębokość strefy wpływu ciepła okazała się zbyt duża – ok. $50 \mu\text{m}$. Jednakże dwa cięcia wykańczające pozwoliły uzyskać chropowatość R_a poniżej $1 \mu\text{m}$ i zmniejszyć strefę wpływu ciepła do $10 \mu\text{m}$ (rys. 6).

Niewątpliwą zaletą obróbki elektroerozyjnej jest izotropowość struktury geometrycznej powierzchni (rys. 7), zwłaszcza w przypadkach, gdy nie są wymagane specjalne ślady obróbkowe.

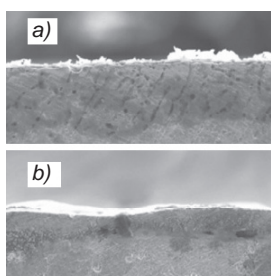
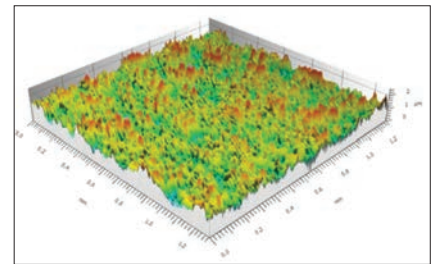


Fig. 6. Image of the HAZ layer depending on the number of passes: a) after roughing, b) after threefold finishing

Rys. 6. Obraz warstwy HAZ w zależności od liczby przejść: a) po przejściu zgrubnym, b) po przejściu trzykrotnym

Fig. 7. Isotropic geometric structure of 3D surface after WEDM

Rys. 7. Izotropowa struktura geometryczna powierzchni 3D po WEDM



Podsumowanie

Zaprezentowane wyniki badań potwierdzają, że można efektywnie kształtować elementy ze stopu Ti6Al4V zarówno obróbką skrawaniem, jak i elektroerozyjną. Najważniejsze wnioski płynące z badań:

- Płytki typu wiper pozwalają na poprawę jakości powierzchni. Aby uzyskać taką samą chropowatość jak w przypadku obróbki płytkami tradycyjnymi, można zwiększyć posuw, co spowoduje wzrost produktywności.
- Efekt wygładzający zwiększa się wraz ze wzrostem posuwu i prędkości skrawania. Niestety, wraz ze wzrostem prędkości skrawania wióry stają się dłuższe i bardziej wstęgowe, a zużycie ostrza jest intensywniejsze.
- W metodzie WEDM największe znaczenie z punktu widzenia możliwości uzyskania niskiej chropowatości powierzchni ma dobór parametrów prądowo-czasowych.
- Ograniczenie chropowatości powierzchni R_a do poziomu poniżej $1 \mu\text{m}$ nie wymaga więcej niż trzech przejść podczas WEDM.
- Odpowiednia liczba przejść podczas WEDM decyduje o głębokości strefy wpływu ciepła. Dwa cięcia wygładzające pozwoliły zredukować głębokość strefy wpływu ciepła z $50 \mu\text{m}$ do poziomu poniżej $10 \mu\text{m}$.
- Zarówno zastosowanie ostrzy wiper, jak i obróbki elektroerozyjnej poprawia strukturę geometryczną powierzchni – zmniejsza lub eliminuje jej anizotropowość.

Reasumując: obie metody obróbki wybranego stopu tytanu pozwalają na uzyskanie – w efektywny sposób – powierzchni o wymaganej jakości. Wybór metody powinien wynikać ze specjalnych zaleceń dotyczących właściwości powierzchni wytwarzanego elementu, ze szczegółowej analizy kosztów oraz z dostępnych w konkretnym przedsiębiorstwie środków produkcji.

LITERATURA

- [1] Aspinwall D.K., Soo S.L., Berrisford A.E., Walder G. "Workpiece surface roughness and integrity after WEDM of Ti-6Al-4V and Inconel 718 using minimum damage generator technology". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 57 (2008): 187.
- [2] Cichosz P. „Ekonomiczne aspekty doboru narzędzi skrawających do zadania produkcyjnego”. *Mechanik*. 10 (2004).
- [3] Karolczak P., Kowalski M. „Analiza wpływu zastosowania ostrzy o geometrii wygładzającej w obróbce kompozytów aluminiowych”. *Mechanik*. 86, 8–9 (2013): 295–303.
- [4] Kruszyński B., Stachurski W., Zgórnjak P. „Wpływ warunków obróbki podczas toczenia ostrzami typu wiper na jakość powierzchni obrobionej i siły skrawania”. *Inżynieria Maszyn*. 15, 4 (2010).
- [5] Lin H.C., Lin K.M., Cheng I.S. "The electro discharge machining characteristics of TiNi shape memory alloys". *Journal of Material Science*. 36 (2001): 399.
- [6] Natsu W., Kunieda M., Nishiwaki N. "Study on influence of inter-electrode atmosphere on carbon adhesion and removal amount". *International Journal of Electrical Machining*. 9 (2004): 43–50.
- [7] Pasam V.K. Swapna M. "Optimizing surface finish in WEDM using the Taguchi Parameter Design Method". *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. XXXII (2010): 107.
- [8] Stasky P., Janeczek J., Harcuba M., Bukovina M., Wagner L. "The effect of microstructure on fatigue performance of Ti-6Al-4V alloy after EDM surface treatment for application in orthopaedics". *Journal of the Mathematical Behaviour of Biomedical Materials*. 4 (2011): 1955.
- [9] Yadav V., Jain V.K., Dixit P.M. "Thermal stresses due to electrical discharge machining". *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*. 42 (2002): 877.