

Heat affected zone analysis of Ti6Al4V after WEDM

Wybrane aspekty termiczne obróbki WEDM stopu tytanu Ti6Al4V

DARIUSZ POROŚ
STANISŁAW ZABORSKI
PAWEŁ KAROLCZAK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.12.115>

Perspectives of applications WEDM for cutting titanium alloys are presented. There is space to explore how application of proper time parameters and the material of wire electrode for WEDM of titanium alloys affects the surface roughness, structure, the stress and the chemical composition of the formed surface layer.

KEYWORDS: WEDM, titanium alloys, heat affected zone

Przedstawiono problematykę obróbki elektroerozyjnej tytanu z uwzględnieniem doboru parametrów czasowych oraz materiału elektrody drutowej. Podjęto także temat analizy geometrii obrobionej powierzchni i strefy wpływu ciepła.

SŁOWA KLUCZOWE: wycinanie elektroerozyjne, stopy tytanu, strefa wpływu ciepła

Wprowadzenie

Obróbka stopów tytanu metodami tradycyjnymi nastęca wielu niedogodności zarówno natury technicznej, jak i ekonomicznej, głównie z powodu niskiej przewodności cieplnej oraz zdolności do utwardzania w wyniku wzrostu temperatury. Jednak ze względu na swoje właściwości wytrzymałościowe oraz odporność na działanie środowisk korozyjnych i agresywnych biologicznie tytan jest powszechnie stosowany w wielu gałęziach przemysłu.

W dążeniu do optymalizacji kosztów i wydajności obróbki z zachowaniem pożądanej dokładności wymiarowo-kształtowej elementów ze stopów tytanu, do ich kształtowania coraz częściej stosuje się obróbkę elektroerozyjną. Konieczny jest jednak dobór optymalnych parametrów WEDM, głównie parametrów czasowych, natężenia i napięcia prądu, oraz rodzaju elektrody drutowej.

Obróbka elektroerozyjna tytanu i jego stopów

Problemem w tradycyjnej obróbce tytanu i jego stopów jest wysoka temperatura podczas skrawania, przyspieszająca zużywanie się narzędzi. Poza tym występują zachowania pseudoplastyczne powodujące powstawanie wiórów o niekorzystnej postaci. Dodatkowo w wyższej temperaturze zachodzi umocnienie i wzrasta reaktywność chemiczna. Alternatywą może być WEDM, które znajduje coraz większe zastosowanie w przemyśle. Pozwala na obrabianie materiałów bardzo twardych, kruchych, kompozytowych, bez względu na ich strukturę i właściwości mechaniczne, oraz elementów cienkościennych.

W pracy [6] stwierdzono, że największy wpływ na chropowatość obrabianej powierzchni ma czas trwania impulsu. Z kolei dla uzyskania dokładności wymiarowo-kształtowej mają znaczenie wszystkie rozpatrywane parametry, a przede wszystkim: czas trwania impulsu, natężenie

prądu oraz napięcie robocze. Wydajność wycinania zależy natomiast przede wszystkim od czasów impulsu i przerwy między impulsami.

Wykazano, że w przypadku obróbki tytanu czas trwania przerwy nie wpływa znacząco na jakość powierzchni i dokładność procesu. Taka sytuacja pozwala wykorzystywać ten parametr do stabilizowania procesu (dejonizacji szczeliny międzyelektrodowej). W analogicznych testach zastosowanie dużej energii wyładowań przyspiesza cięcie, ale długi czas impulsu oraz wysoki prąd wyładowania powodują powstawanie dużych naprężeń w warstwie wierzchniej [8].

Warto wspomnieć, że na stan naprężeń w warstwie wierzchniej po WEDM mogą znacząco wpływać materiały elektrody drutowej. Zastosowanie elektrod powlekanych zmienia wielkość tych naprężeń. Autorzy [1] zastosowali trzy różne elektrody: CuZn37 oraz miedziane powlekane jedną lub dwiema warstwami cynkowymi. Przy odpowiednich wartościach prądu wyładowania i czasu impulsu udało się zredukować wielkość naprężeń w warstwie wierzchniej. Przy WEDM elektrodą z CuZn37 uzyskano na powierzchni nawet naprężenia ściskające.

Skutecznym sposobem redukcji negatywnego wpływu naprężeń powierzchniowych na właściwości przedmiotu obrabianego jest relaksacja naprężeń poprzez obróbkę cieplną [7]. Badania nad usunięciem warstwy wpływu ciepła w kolejnych przejściach podczas cięcia potwierdzają możliwość znacznego ograniczenia głębokości HAZ (*heat affected zone*) [2]. Typ zastosowanego dielektryka również może znacząco wpływać na stan warstwy wierzchniej [3]. Strefa wpływu ciepła po WEDM w nafcie sięga głębiej pod powierzchnię materiału niż po obróbce w wodzie destylowanej [4].

Metodyka badań i stanowisko do badań efektów obróbki WEDM stopu tytanu Ti6Al4V

Celem niniejszego opracowania jest analiza wpływu parametrów czasowych i materiału elektrody na efekty WEDM. Elektrode mosiężną powlekaną cynkiem o średnicy $\varnothing 0,25$ mm firmy BEDRA wybrano w wyniku wcześniej przeprowadzonych badań porównawczych elektrod mosiężnych, miedzianych oraz powlekanych cynkiem [5]. Badania doświadczalne obejmowały dwa etapy, będące konsekwencją sformułowanych celów:

- określenie funkcji obiektu badań w postaci funkcji regresji opisującej wpływ parametrów czasowych na wydajność powierzchniową cięcia i chropowatość powierzchni po obróbce, z wykorzystaniem programu PS/DS-P: λ ,
- graficzną prezentację uzyskanych zależności od parametrów czasowych WEDM.

* 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
Prof dr hab. inż. Stanisław Zaborski, stanislaw.zaborski@pwr.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0001-5232-8800> – Katedra Obrabiarek i Technologii Mechanicznych, Politechnika Wroclawska, Wrocław, Polska
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

Z wykorzystaniem pomiarów mikrotwardości oraz obrazów mikroskopowych badano również wpływ tych czynników na głębokość warstwy zmienionej termicznie.

Aby zredukować liczbę niezbędnych pomiarów, przyjęto, że powierzchniowa wydajność cięcia i chropowatość powierzchni zależą w istotny sposób od:

- czasu wyładowań – *ON* [μ s],
- czasu przerwy między wyładowaniami – *OFF* [μ s].

Próby wycinania realizowano na drutowej wycinarce elektroerozyjnej Sodick AQ 300L. Konstrukcję maszyny w dużej części stanowią elementy ceramiczne. Użyta ceramika charakteryzuje się co najmniej dwukrotnie mniejszym współczynnikiem rozszerzalności cieplnej niż materiały tradycyjne oraz dużą odpornością na korozję.

Ceramiczny korpus osi *Z* zapewnia wysoką stabilność termiczną w trakcie obróbki. Stabilne prowadzenie drutu pozwala na redukcję offsetu, a tym samym – uzyskanie zadanej powierzchni i geometrii przy mniejszej liczbie przejść niż w maszynach o tradycyjnym napędzie. Zastosowanie ceramiki w wielu podzespołach wydłużyło ich żywotność. Zaletą obrabiarki jest nowoczesne, 64-bitowe sterowanie, oparte na systemie operacyjnym Windows NT, z wbudowanym czteroosiowym programem CAD/CAM.

W badaniach realizowano obróbkę drutem mosiężnym CuZn37 powlekanym warstwą cynku. Należy dodać, że obecnie aparatura do szybkiego nawlekania drutu wymaga, aby drut charakteryzował się wytrzymałością $\sigma_y > 750 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ przy średnicy $\varnothing 0,25 \text{ mm}$, a warunku tego nie spełnia żaden dostępny na rynku drut miedziany. Wprowadzenie mosiądzu umożliwiło zwiększenie wydajności procesu bez uszczerbku dla dokładności, ponieważ wytrzymałość drutu mosiężnego jest około trzykrotnie wyższa niż miedzianego. Sporadycznie stosuje się na materiał elektrody molibden o wytrzymałości dwukrotnie wyższej od mosiądzu. Na korzyść tego rozwiązania przemawia także jego mniejsza rezystywność. Drut molibdenowy jest zalecany przede wszystkim do dokładnego cięcia [5].

Podczas cięcia zastosowano wycinanie w jednym przejściu. Wysokość ciętych elementów wynosiła 10 mm. Zmieniało parametry czasowe obróbki. Do graficznego przedstawienia zależności wybrano *Rz* jako reprezentatywny parametr chropowatości.

Wydajność WEDM stopu Ti6Al4V oraz chropowatość powierzchni po WEDM

Powierzchniową wydajność WEDM wyznaczono jako iloczyn prędkości wycinania i wysokości ciętego elementu. Wzrost czasu wyładowań i/lub skrócenie przerwy pomiędzy wyładowaniami powoduje wzrost wydajności cięcia. Obliczono współczynniki regresji zgodnie z zasadami analizy regresji w planowaniu rotatabilnym drugiego rzędu. Zależność wydajności od parametrów czasowych przedstawiono na rys. 1.

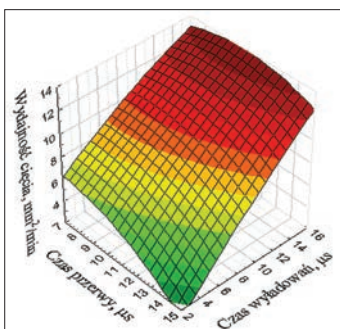


Fig. 1. Object function for cutting performance of Ti6Al4V alloy from WEDM time parameters
Rys. 1. Funkcja obiektu dla wydajności cięcia stopu Ti6Al4V od czasowych parametrów WEDM

Na profilografometrze firmy Mitutoyo SV-3200 mierzono chropowatość obrobionych elementów w 2D i 3D oraz udział materiałowy powierzchni. W pomiarach wykorzystano igłę diamentową o promieniu zaokrąglenia stożka $2 \mu\text{m}$ i kącie 60° . Skok końcówki wynosił $800 \mu\text{m}$. Profilografometr wyposażono w stół do pomiaru 3D o rozdzielczości $0,05 \mu\text{m}$. Korzystano z oprogramowania do pomiaru FORMTRACEPAK oraz analizy 3D – MCube Ultimate. Jako parametr chropowatości powierzchni wycinanych elektroerozyjnie wybrano *Rz* (rys. 2).

Stwierdzono, że wydłużenie czasu wyładowań powoduje wzrost chropowatości powierzchni po obróbce. Czas przerwy między wyładowaniami ma mniejszy wpływ na jakość powierzchni, ale jego wydłużenie pozwala uzyskać niższą chropowatość. Zgrubnie uzyskana chropowatość powierzchni jest dość wysoka. Parametr *Rz* dochodzi do kilkunastu mikrometrów. Jednak warto zwrócić uwagę na charakterystyczną dla obróbki elektroerozyjnej widoczną na obrazie 3D (rys. 3) strukturę izotropową. Jest ona korzystna i umożliwia uzyskanie jednakowego udziału nośnego powierzchni materiału niezależnie od kierunku pomiaru.

Fig. 2. Dependence of Ti6Al4V surface roughness on WEDM time parameters

Rys. 2. Zależność chropowatości powierzchni Ti6Al4V od czasowych parametrów WEDM

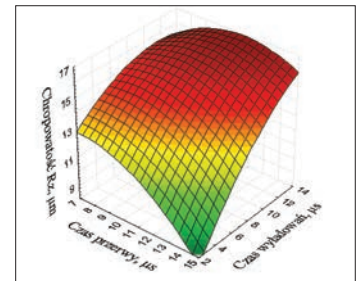
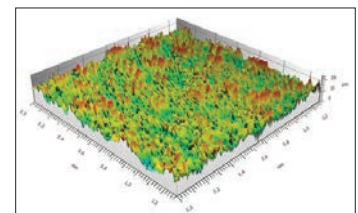


Fig. 3. Image of 3D surface roughness after WEDM
Rys. 3. Obraz chropowatości powierzchni 3D po WEDM



Strefa wpływu ciepła

Na powierzchni zgrubnie przeciętej elektroerozyjnie znajduje się wiele porów, mikropęknięć i kraterów o różnej głębokości. Takie niedoskonałości w warunkach zwiększonego obciążenia mogą się stać niepożądanymi koncentratorami naprężeń. Warunki panujące podczas wycinania elektroerozyjnego sprzyjają tworzeniu się HAZ.

Obraz warstwy wierzchniej po WEDM badanego stopu tytanu przedstawiono na rys. 4. Strefa wpływu ciepła sięgająca w głąb materiału musi być minimalizowana, bo choć w niektórych zastosowaniach nie stanowi problemu, to zwykle charakteryzuje się zmienioną strukturą i właściwościami, np. zwiększoną twardością. Jako warstwa bardziej krucha, jeśli ulegnie uszkodzeniu, może zapoczątkować pogłębienie się powstałego pęknięcia do rdzenia materiału.

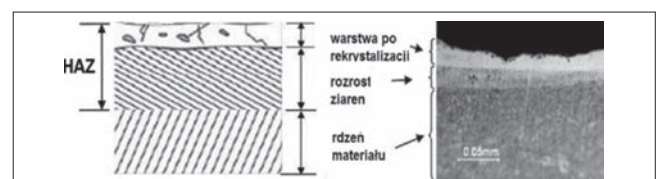


Fig. 4. Ti6Al4V surface layer after electro-erosion treatment. Numerous micro craters visible as a result of electric discharges during WEDM
Rys. 4. Warstwa wierzchnia Ti6Al4V po obróbce elektroerozyjnej. Widoczne liczne mikrokratery będące efektem wyładowań elektrycznych podczas WEDM

Wysoka temperatura i szybkie chłodzenie powierzchni powodują nierównomierny rozkład temperatury pomiędzy warstwami materiału. Po obróbce w materiale pozostają naprężenia, które mogą być ścisające lub rozciągające. Zwykle są to naprężenia rozciągające, niepożądane ze względu na obniżenie właściwości mechanicznych materiału.

W wyniku analizy głębokości warstwy zmienionej termicznie udało się wykazać skuteczność zastosowania elektrody powlekanej. Średnia głębokość HAZ po cięciu elektrodą mosiężną wynosi odpowiednio $80 \pm 25 \mu\text{m}$ po cięciu zgrubnym. Zastosowanie elektrody powlekanej cynkiem pozwoliło ograniczyć głębokość HAZ do zakresu $50 \pm 15 \mu\text{m}$ po cięciu zgrubnym. Głębokość strefy zmienionej termicznie potwierdzono pomiarami mikrotwardości (rys. 5). Mosiężne elektrody powlekane cynkiem to zestawienie cynku o niskiej temperaturze topnienia (420°C) i wysokim ciśnieniu sublimacji z miedzią (1080°C) w stopie CuZn37. Autorzy przypisują ten efekt działaniu par cynku na ograniczenie przepływu ciepła. Podczas WEDM elektrodą powlekaną (rys. 6) cynk z powierzchni zewnętrznej ulega sublimacji, co pozwala ograniczyć ilość cząstek wydzielanych do szczeliny.

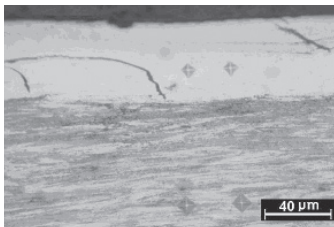


Fig. 5. Cross section after hardness measurement to identify the depth of HAZ
Rys. 5. Przekrój poprzeczny po pomiarze twardości z celu identyfikacji głębokości strefy wpływu ciepła

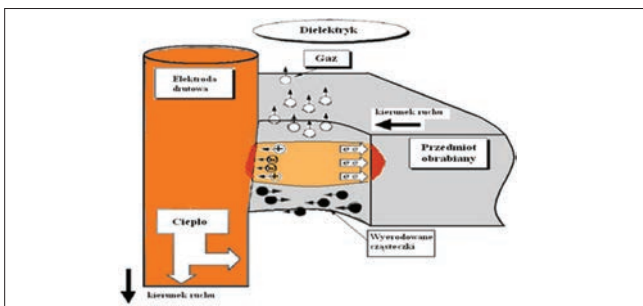


Fig. 6. Picture of the inter-electrode gap taking into account the evaporation of zinc from the surface of the wire electrode
Rys. 6. Obraz szczeliny międzyelektrodowej uwzględniającej parowanie cynku z powierzchni elektrody drutowej

Zamiast stopionych cząstek metali i parującego dielektryka szczelina wypełnia się w znacznej części parą cynku. Ten gaz ma niższą przewodność cieplną niż np. stopiona miedź. To pozwala ograniczyć wnikanie ciepła w głąb materiału obrabianego. Grubość warstwy zmienionej termicznie zmienia się w zależności od energii, jaka jest dostarczana do szczeliny międzyelektrodowej podczas wycinania. Największą wartość uzyskuje się po cięciu zgrubnym. W kolejnych przejściach ścinane są wierz-

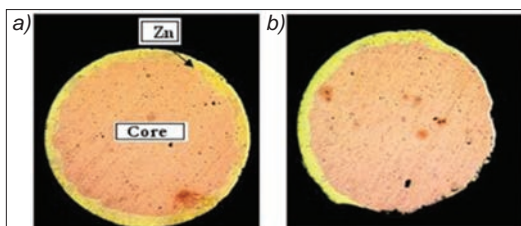


Fig. 7. Cross section of BEDRA zinc plated brass wire electrode: a) new, b) after WEDM
Rys. 7. Przekrój poprzeczny powlekanej cynkiem mosiężnej elektrody drutowej firmy BEDRA: a) nowej, b) po WEDM

chołki chropowatości powierzchni, a do szczeliny dociera znacznie mniej energii.

Grubość HAZ mierzona po kolejnych przejściach maleje. Efekt redukcji HAZ poprzez wykorzystanie efektu parowania i sublimacji cynku potwierdzają zdjęcia przekroju drutu po WEDM (rys. 7). Warstwa cynku naniesiona na elektrodę drutową w procesie produkcji wyparowała z powierzchni mosiężnego rdzenia. Efekt ten jest widoczny jedynie na powierzchni skierowanej zgodnie z kierunkiem cięcia.

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzona seria badań pozwala sformułować następujące wnioski:

- Ze wzrostem czasu wyładowań elektrycznych zwiększa się wydajność procesu. To z kolei wpływa na zwiększenie chropowatości R_z obrabianej powierzchni.
- Wydłużenie przerwy między wyładowaniami przy zastosowaniu obu elektrod jest skutecznym sposobem zwiększenia stabilności procesu wycinania bez większego uszczerbku dla wydajności procesu.
- Problemy, takie jak gruba warstwa HAZ, naprężenia rozciągające i mikropęknięcia powierzchni, można redukować, a nawet eliminować poprzez odpowiedni dobór parametrów obróbki, liczby etapów wycinania (liczby przejść) oraz skuteczną obróbkę wykończeniową (np. dogniatanie).
- Grubość warstwy zmienionej termicznie po WEDM zależy m.in. od czasu trwania wyładowania ON i napięcia oraz natężenia roboczego. Grubość warstwy HAZ wzrasta wraz z wydłużeniem czasu wyładowania.
- Widoczna na powierzchni warstwa zmieniona termicznie charakteryzuje się odmienną strukturą i większą twardością.
- HAZ składa się z dwóch obszarów. Zewnętrzny to przetopiony materiał obrabiany zanieczyszczony materiałem drutu. Drugi, głębiej położony, to struktura zmieniona głównie poprzez rozrost ziaren.
- Ulegająca sublimacji cynkowa warstwa zewnętrzna drutu ogranicza głębokość HAZ.
- Warstwy zewnętrzne wyciętego elektroerozyjnie stopu tytanu charakteryzują się podwyższoną twardością. Zmienna twardość w obrębie warstwy zewnętrznej może mieć istotny wpływ na pogorszenie wytrzymałości zmęczeniowej wycinanych elektroerozyjnie elementów z Ti6Al4V.

LITERATURA

- [1] Antar M.T., Soo S.L., Aspinwall D.K., Jones D., Perez R. "Productivity and Workpiece Surface Integrity When WEDM Aerospace Alloys Using Coated Wires". *Procedia Engineering*. 19 (2011): 3–8, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.071>.
- [2] 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, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.054>.
- [3] Chen S.L., Yan B.H., Huang F.Y. "Influence of kerosene and distilled water as dielectrics on the electric discharge machining characteristics of Ti-6Al-4V". *Journal of Materials Processing Technology*. 87 (1999): 107, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00340-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00340-9).
- [4] Kibria G., Sarkar B.R., Pradhan B.B. "Comparative study of different dielectrics for micro-EDM performance during microhole machining of Ti-6Al-4V alloy". *Int J Adv Manuf Technol*. 48 (2010): 557, <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2298-y>.
- [5] Poroš D., Zaborski S. "Semi-empirical model of efficiency of wire electric discharge machining of hard-to-machine materials". *J. Mat. Proc. Technol.* 209, 3 (2009): 1247–1253, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.03.046>.
- [6] Sarkar S., Miitra S., Bhattacharyya B. "Parametric analysis and optimization of wire electrical discharge machining of gamma-titanium aluminide alloy". *Journal of Materials Processing Technology*. 159 (2005): 286–294, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.10.009>.
- [7] Strasky P., Janecek 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, <https://doi.org/10.1016/j.jmbmm.2011.06.012>.
- [8] Yadav V., Jain V.K., Dixit P.M. "Thermal stresses due to electrical discharge machining". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 42 (2002): 877, [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00029-9](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00029-9). ■