

# Wycinanie elektroerozyjne nadstopów niklu

## Wire electrical discharge machining nickel super alloy

RAFAŁ ŚWIERCZ  
DOROTA ONISZCZUK-ŚWIERCZ  
RAFAŁ NOWICKI\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.3.36>

W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych wpływu wybranych parametrów wycinania elektroerozyjnego z zastosowaniem elektrody pokrywanej cynkiem na chropowatość powierzchni i liniową prędkość cięcia. Na podstawie tych wyników wyznaczono modele matematyczne procesu, pozwalające na wybór najkorzystniejszych parametrów obróbki w zależności od pożądanych wskaźników jakościowych.

**SŁOWA KLUCZOWE:** wycinanie elektroerozyjne, chropowatość powierzchni, Inconel

*This article presents the influence of process parameters of wire electrical discharge machining using coated brass on the surface roughness and material removal rate of Inconel 718. Studies were conducted by design of the experiment. Based on the survey developed mathematical models which allow selecting the most favorable machining parameters depending on the desired process performance and quality features of the surface texture.*

**KEYWORDS:** wire electrical discharge machining, surface roughness, Inconel

Obróbka elektroerozyjna jest nowoczesną technologią, pozwalającą na kształtowanie trudnoobrabialnych materiałów. Fizyka zjawisk, które zachodzą w szczelinie międzyelektrodowej podczas wycinania elektroerozyjnego WEDM (*wire electrical discharge machining*), ma złożony charakter [1, 2]. W procesie WEDM elektroda robocza i obrabiany przedmiot są podłączone do generatora impulsów prądowych. Po przyłożeniu napięcia do elektrod w szczelinie międzyelektrodowej dochodzi do jonizacji dielektryka. Natężenie pola elektrycznego jest odwrotnie proporcjonalne do odległości między obrabianym przedmiotem a elektrodą roboczą. W miejscu, gdzie odległość między elektrodami jest najmniejsza, dochodzi do obniżenia wytrzymałości elektrycznej ośrodka, co inicjuje przebieg elektryczne powodujące topnienie i odparowanie niewielkiej ilości materiału [3, 4]. Stochastyczny przebieg inicjacji wyładowań elektrycznych determinuje sposób realizacji badań doświadczalnych. Ze względu na dużą liczbę zmiennych procesowych warunkujących proces WEDM pojawiają się trudności z jednoznaczną identyfikacją wpływu parametrów obróbki na jej skutki jakościowe [5–7]. Budowane są zatem statystyczne matematyczne modele procesu, oparte na teorii badań wykorzystujących eksperyment planowany [8].

### Cel badań

Celem badań była analiza (teoretyczna i doświadczalna) procesu wycinania elektroerozyjnego nadstopów niklu elektrodą ocynkowaną, w tym analiza jakościowych skutków obróbki, takich jak parametry chropowatości powierzchni obrobionego materiału i liniowa prędkość cięcia.

### Badania doświadczalne

Badania doświadczalne przeprowadzono na podstawie eksperymentu planowanego Hartleya – rotabilnego, pięciopoziomowego, trójparametrowego. Zastosowanie planowanego eksperymentu miało na celu zbadanie jednoczesnego wpływu kilku parametrów obróbki na wybrane parametry stanu warstwy wierzchniej (chropowatość powierzchni) i wydajność procesu.

Parametrami wejściowymi w planowanym eksperymencie były:

- czas impulsu  $t_{on} = 0,3 \div 1 \mu s$ ,
- czas przerwy między impulsami  $t_{off} = 5 \div 25 \mu s$ ,
- prędkość przewijania elektrody roboczej  $WS = 2 \div 8 m/min$ .

Zakresy użytkowe wartości parametrów w planowanym eksperymencie dobrano na podstawie analizy tablic technologicznych – dla przyjętego materiału, wysokości cięcia 10 mm i pojedynczego przejścia – oraz na podstawie badań wstępnych, które uwzględniały stabilność obróbki i brak zerwań drutu.

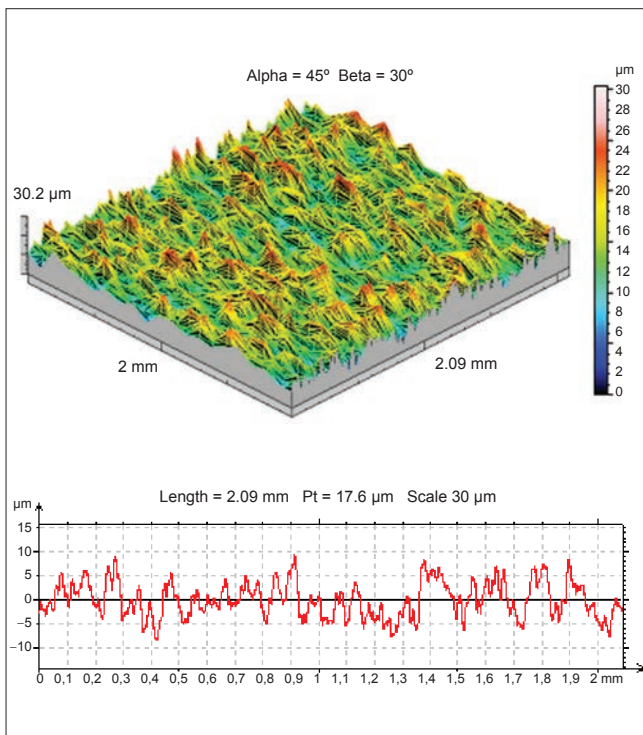
Obróbce WEDM poddano próbki nadstopów niklu – Inconelu 718. Zdecydowano się na ten materiał ze względu na jego szeroki zakres zastosowania w przemyśle lotniczym, samochodowym i energetycznym. Inconel 718 zachowuje właściwości wytrzymałościowe nawet w wysokiej temperaturze. Szacuje się, że ze stopów na osnowie niklu wykonuje się ponad połowę elementów stosowanych w branży lotniczej. Są to zwłaszcza komponenty sekcji gorących silników gazowych, np. elementy turbiny, łopatki, zespół komory spalania.

Badania wpływu parametrów obróbki na stan warstwy wierzchniej Inconelu 718 przeprowadzono na wycinarce elektroerozyjnej Robofil 440. W eksperymencie zastosowano elektrodę roboczą w formie mosiężnego, ocynkowanego drutu o średnicy  $\varnothing 0,25 mm$ . Obróbka polegająca na wycinaniu kostek z półfabrykatu – Inconelu 718 – odbywała się w jego pełnym zanurzeniu w dielektryku (w wodzie demineralizowanej, dejonizowanej).

\* Dr inż. Dorota Oniszczuk-Świercz (doo@meil.pw.edu.pl), dr inż. Rafał Świercz (rsw@meil.pw.edu.pl), inż. Rafał Nowicki (rano@meil.pw.edu.pl) – Instytut Technik Wytwarzania, Politechnika Warszawska

## Wyniki badań

Pomiar struktury geometrycznej powierzchni wyciętych próbek przeprowadzono z użyciem wysokiej (pierwszej) klasy profilometru skanującego Form Talysurf Series 2 firmy Taylor Hobson. Na podstawie pomiarów stwierdzono, że struktura geometryczna powierzchni po obróbce WEDM ma charakter losowy i charakteryzuje się dużą gęstością powierzchniową miejscowych wzniesień. Losowość struktury jest związana z fizyką zjawiska usuwania materiału w procesie erozji oraz nierównomiernością występowania wyładowań elektrycznych na długości elektrody roboczej. W miejscu wyładowania powstaje krater, część roztopionego metalu jest wyrzucana do szczeliny międzyelektrodowej i usuwana wraz z przepływającym dielektrykiem. Roztopiony metal, który nie został usunięty z powierzchni krateru, ponownie na nim zastyga, tworząc ciekłą warstwę (rzędu kilku mikrometrów) o własnościach zmienionych w stosunku do materiału rdzenia. Podczas obróbki występują setki wyładowań elektrycznych, które kształtują charakterystyczną dla procesu WEDM strukturę geometryczną powierzchni, będącą efektem nakładania się kraterów z pojedynczych wyładowań (rys. 1).

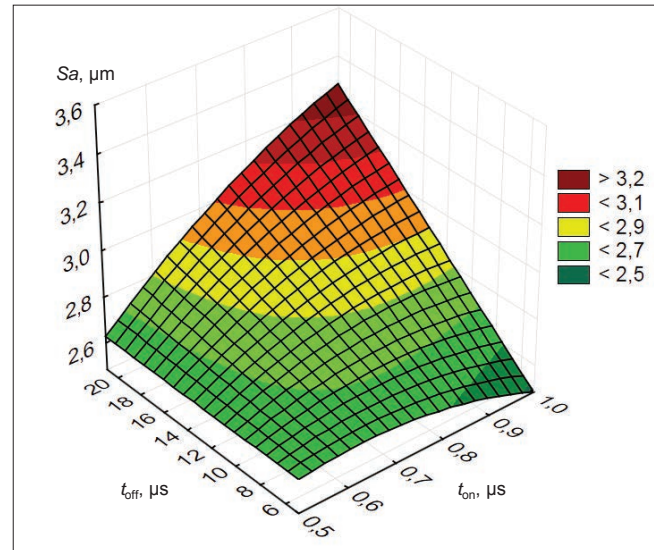


Rys. 1. Topografia powierzchni po obróbce WEDM wraz z profilogramem powierzchni

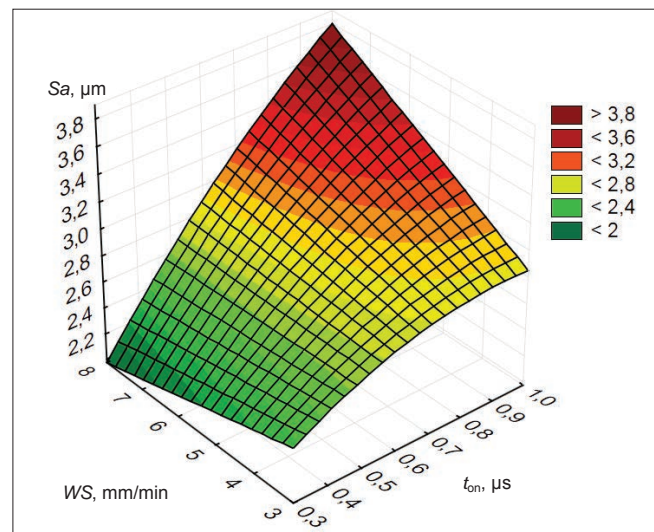
Na podstawie wyników badań utworzono statystyczne modele matematyczne, opisujące wpływ czynników wejściowych na wybrany parametr struktury geometrycznej powierzchni. Wyniki aproksymowano wielomianową funkcją regresji. Na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  uzyskano wysoką wartość współczynnika korelacji wielokrotnej  $R$ , która określa jakość dopasowania funkcji do wyników pomiarów. Istotność poszczególnych współczynników korelacji sprawdzano testem F-Snedecora (jeżeli  $F/F_{kr} \geq 1$ , współczynnik  $R$  jest istotny). Brano też pod uwagę istotność wpływu poszczególnych współczynników równania regresji, którą weryfikowano testem t-Studenta (na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ ).

TABLICA I. Równanie regresji opisujące wpływ parametrów obróbki na chropowatość powierzchni Sa

Równanie	R	$F/F_{kr}$
$Sa = 2,44 - 1,16 t_{on}^2 + 0,1 t_{on} t_{off} + 0,95 t_{on} - 0,05 t_{off}$	0,96	1,88



Rys. 2. Zależności parametrów chropowatości powierzchni Sa od czasu impulsu  $t_{on}$  i czasu przerwy  $t_{off}$



Rys. 3. Zależności parametrów chropowatości powierzchni Sa od czasu impulsu  $t_{on}$  i prędkości przewijania elektrody WS

Wybraną zależność regresyjną chropowatości powierzchni przedstawiono w tabl. I, a jej interpretację graficzną – na rys. 2 i 3.

Analiza równania regresji oraz jego graficzna interpretacja wskazują, że wartość parametru wysokościowego chropowatości Sa jest uzależniona głównie od czasu impulsu  $t_{on}$ , a więc od wartości energii wyładowania elektrycznego, ponieważ czas impulsu jest parametrem warunkującym jednocześnie natężenie prądu wyładowania. Wraz z wydłużaniem się czasu impulsu rosną natężenie prądu i ilość erodowanego materiału w pojedynczym impulsie, a to prowadzi do wzrostu chropowatości powierzchni.

Wpływ czasu przerwy między impulsami jest nieznaczny w przypadku małej wartości czasu impulsu. Wraz z wydłużaniem się czasu impulsu oraz czasu przerwy między impulsami rośnie parametr Sa. Jest to związane z fizyką zjawisk zachodzących w szczelinie międzyelektrodowej.

Czas przerwy między impulsami odpowiada za dejonizację kanału międzyelektrodowego oraz za usuwanie produktów erozji ze szczeliny roboczej. Po wyładowaniu elektrycznym roztopiony materiał odparowuje, tworząc krater na obrabianej powierzchni. Przy krótkim czasie przerwy kanał wyładowania nie ulegnie pełnej dejonizacji, a roztopiony materiał nie zdąży odparować. Może to doprowadzić do sytuacji, że nastąpi ponowna inicjacja wyładowania elektrycznego w tym samym miejscu i zostanie powielona na powierzchni roztopionego materiału, który nie został usunięty w trakcie przerwy między impulsami. Wydłużanie czasu przerwy przy krótkim czasie impulsów powoduje niewielki wzrost parametru  $S_a$ . Może to być związane z ilością energii cieplnej wytworzonej i dostarczonej do obrabianego przedmiotu w trakcie wyładowania elektrycznego, która odpowiada za topnienie i odparowanie materiału. Ilość tej energii zależy od czasu impulsu i tym samym od natężenia prądu. Wydłużanie czasu przerwy przy dużych wartościach  $t_{on}$  zwiększa chropowatość powierzchni (parametr  $S_a$ ), ponieważ wtedy w szczelinie zachodzi pełna dejonizacja i następuje lepsze oczyszczenie z produktów obróbki. Wzrost natężenia prądu powoduje zwiększenie średnicy i mocy kanału plazmowego podczas ponownego wyładowania elektrycznego, co prowadzi do powstawania kraterów o coraz większych rozmiarach i głębokościach i w konsekwencji – do wzrostu parametru chropowatości  $S_a$ .

Zgodnie z równaniem regresji prędkość przewijania drutu  $WS$  nie wpływa istotnie na wartość parametru  $S_a$ . Zauważa się niewielki spadek chropowatości przy krótkim czasie impulsu i dużej prędkości przewijania drutu, co może być efektem zmniejszania się liczby wyładowań na jednostkę długości drutu. Wydłużanie czasu impulsu i wzrost prędkości przewijania drutu prowadzą do wzrostu parametru  $S_a$ , ponieważ większa jest energia wyładowania, która generuje większą chropowatość powierzchni. Wynika to z lepszego oczyszczania szczeliny międzyelektrodowej z produktów erozji.

Wykorzystana elektroda robocza była pokryta cynkiem, który odparowywał podczas obróbki i przez to intensyfikował oczyszczanie szczeliny roboczej.

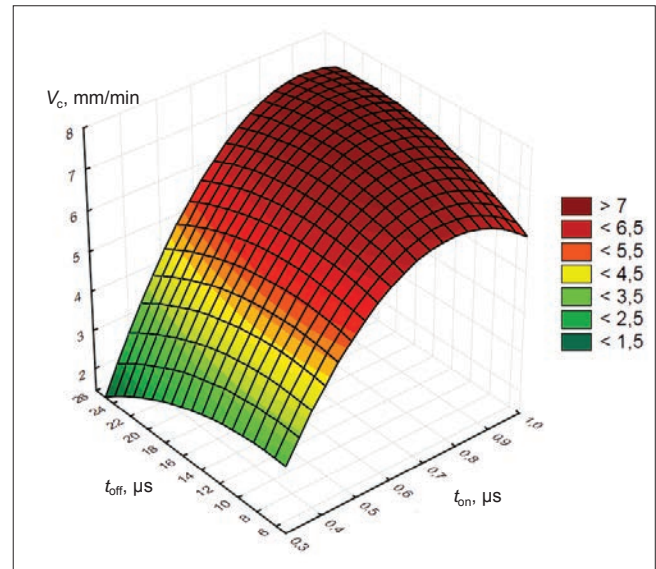
Dłuższa przerwa między impulsami zapewnia większą stabilizację i lepszą dejonizację kanału międzyelektrodowego, co zmniejsza prawdopodobieństwo wystąpienia niejednorodnych wyładowań elektrycznych na powierzchni elektrody drutowej, generujących większą chropowatość powierzchni.

Jednym z czynników decydujących o ekonomice zastosowania wycinania elektroerozyjnego jest prędkość linowa cięcia. Wyznaczoną zależność regresyjną prędkości linowej cięcia przedstawiono w tabl. II, a jej graficzną interpretację – na rys. 4.

**TABLICA II. Równanie regresji opisujące wpływ parametrów obróbki na prędkość liniową cięcia  $V_c$  (w mm/min)**

Równanie	R	F/F <sub>kr</sub>
$V_c = -2,85 + 24,05 t_{on} - 16,3 t_{on}^2 - 0,005 t_{off}^2 + 0,22 t_{on} t_{off}$	0,97	1,87

Głównym czynnikiem wpływającym na wydajność cięcia jest czas impulsu  $t_{on}$ . W tym przypadku wpływ czasu przerwy między impulsami  $t_{off}$  jest niewielki, a prędkości przewijania elektrody roboczej  $WS$  – zerowy. Wydłużanie czasu impulsu sprzyja wzrostowi energii wyładowań, które prowadzą do erodowania większej objętości materiału w pojedynczym impulsie. Objawia się to wzrostem prędkości wycinania i chropowatości powierzchni.



Rys. 4. Zależność prędkości cięcia  $V_c$  od czasu impulsu  $t_{on}$  i czasu przerwy  $t_{off}$

## Podsumowanie

Przeprowadzone badania doświadczalne wskazują, że w przypadku elektroerozyjnego wycinania Inconelu 718 ocynkowanym drutem mosiężnym największy wpływ na wydajność procesu oraz parametry struktury geometrycznej powierzchni miały czas impulsu i (w mniejszym stopniu) czas przerwy między impulsami. Prędkość przewijania drutu tylko nieznacznie wpływa na generowanie chropowatości powierzchni, a na prędkość cięcia nie wpływa w ogóle.

Opracowane wyniki mogą stanowić podstawę do tworzenia technologii obróbki nadstopów niklu na przemysłowych wycinarkach elektroerozyjnych. Z kolei matematyczne modele procesu WEDM umożliwiają dobranie takich parametrów procesu, które zapewnią uzyskanie założonych efektów obróbki (tj. określonej wydajności procesu oraz cech stereometrii powierzchni). Jednocześnie na bazie tych modeli można budować inteligentne strategie obróbkowe.

## LITERATURA

- Spadło S., Dudek D. „Badania wpływu przepłukiwania szczeliny roboczej na efekty obróbki elektroerozyjnej (EDM)”. *Mechanik*. 1 (2017): s. 77–79.
- Świercz R., Oniszczyk-Świercz D. „Wpływ parametrów obróbki elektroerozyjnej na właściwości użytkowe stali o wysokiej przewodności cieplnej”. *Mechanik*. 1 (2015): s. 29–34.
- Burek J., Babiarz R., Buk J., Płodzień M., Sułkiewicz P. „Dokładność obróbki w procesie wycinania elektroerozyjnego elektrodami o różnych średnicach”. *Mechanik*. 11 (2017): s. 1000–1002.
- Burek J., Buk J., Płodzień M., Sałata M. „Programowanie automatyczne wycinarki elektroerozyjnej z wykorzystaniem modułu WEDM”. *Mechanik*. 3 (2016): s. 216–217.
- Zyra A., Skoczypiec S. „Wpływ dielektryka na cechy strukturalne i morfologiczne stali austenitycznej po obróbce elektroerozyjnej”. *Mechanik*. 1 (2016): s. 26–28.
- Spadło S., Młynarczyk P., Łakomiec K. „Influence of the of electrical discharge alloying methods on the surface quality of carbon steel”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 89 (2017): s. 1529–1534.
- Skoczypiec, S., Ruszaj A. “A sequential electrochemical-electrodischarge process for micropart manufacturing”. *Precision Engineering*. 38, 3 (2014): s. 680–690.
- Świercz R., Oniszczyk-Świercz D. “Experimental investigation of surface layer properties of high thermal conductivity tool steel after electrical discharge machining”. *Metals*. 12 (2017): s. 1–16. ■