

# Ocena struktury geometrycznej powierzchni trudno obrabialnych stopów lotniczych po szlifowaniu elektroerozyjnym (AEDG) i polerowaniu

Assessment of surface geometrical structure of hard to machine aerospace alloys after abrasive electro-discharge grinding (AEDG) and polishing

MARCIN GOŁĄBCZAK  
ANDRZEJ GOŁĄBCZAK  
PRZEMYSŁAW MAKSYM  
ROBERT ŚWIECIK  
RADOSŁAW ROSIK\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.10.146>  
English version available on: [www.mechanik.media.pl](http://www.mechanik.media.pl)

Przedstawiono wybrane wyniki badań morfologii i struktury geometrycznej powierzchni po elektroerozyjnym szlifowaniu (AEDG) i polerowaniu wykończeniowym próbek z trudno obrabialnych stopów, stosowanych w przemyśle lotniczym. Ustalono parametry procesów obróbki oraz dokonano oceny struktury geometrycznej powierzchni metodą profilografowania 3D po każdym etapie obróbki. Morfologię powierzchni oceniono na podstawie obrazów mikroskopowych.

**SŁOWA KLUCZOWE:** materiały trudno obrabialne, szlifowanie elektroerozyjne AEDG, polerowanie, struktura geometryczna powierzchni, morfologia powierzchni

*In the article selected investigation results of surface morphology and geometrical structure after abrasive electro-discharge grinding (AEDG) and final polishing of samples made of hard machinable alloys used in aerospace industry has been presented. The machining parameters of samples have been determined and their surface geometrical structures after each stage of machining using 3D profiling have been estimated. Surface texture of samples has been assessed basing on microscope images.*

**KEYWORDS:** hard machinable materials, abrasive electro-discharge grinding (AEDG), polishing, surface geometrical structure, surface texture

Szlifowanie elektroerozyjne (AEDG) jest hybrydowym procesem obróbki, w którym następuje synergia energii mechanicznej i wyładowań iskrowych. Ta metoda rozwiązuje problemy występujące w obróbce materiałów trudno obrabialnych, dotyczące zwłaszcza uzyskiwania: dużej wydajności procesu, wysokiej dokładności kształtowo-wymiarowej oraz wymaganego stanu warstwy wierzchniej [1, 2, 7]. Łatwość sterowania parametrami elektrycznymi AEDG, m.in. napięciem i natężeniem prądu oraz czasem wyładowania elektrycznego, pozwala na kontrolowanie przebiegu procesu i wyników obróbki.

Celem pracy było ustalenie wpływu warunków obróbki procesu szlifowania AEDG i polerowania na kształtowanie morfologii i struktury geometrycznej powierzchni (SGP) wybranych stopów stosowanych w przemyśle lotniczym, takich jak: Hastelloy X, Inconel 617 i Titanium 5553  $\beta$ .

Materiały te pozyskano z uczelni École Nationale Supérieure des Arts et Métiers (ENSAM) – Paris Tech de Cluny, a próbki do badań przygotowano na wycinarce drutowej typu Accutex AU-300iA w Zakładzie Aparatury Elektrycznej Ergom.

## Metodyka i warunki badań

Badania obejmowały ocenę morfologii i SGP próbek poddanych szlifowaniu elektroerozyjnemu (etap I) oraz polerowaniu wykończeniowemu (etap II). Proces szlifowania AEDG (etap I) realizowano na stanowisku badawczym wyposażonym w: szlifierkę do płaszczyzn typu ECBT8, generator impulsów wyładowań elektrycznych typu GMP75, układy kontrolno-pomiarowe parametrów szlifowania oraz komputerowy system rejestracji wyników badań [2, 3].

Proces polerowania (etap II) realizowano na 2-tarczowej szlifierko-polerce Phoenix Beta 2 firmy Wirtz Buehler, będącej na wyposażeniu laboratorium Zakładu Technologii Maszyn Politechniki Łódzkiej. Szlifierko-polerka ma półautomatyczną głowicę szlifierską Vector Power Head z regulacją siły nacisku w zakresie od 5 do 200 N oraz 6-gniazdowy uchwyt do mocowania próbek o średnicy 25 mm [4]. Proces polerowania próbek obejmował 5 zabiegów, w których zmieniano wielkość ziaren ściernych oraz środek smarujący. Do określenia analizowanych parametrów SGP obrabianych próbek wykorzystano metodę przestrzennego profilografowania 3D. Profilografowanie powierzchni próbek wykonano za pomocą profilografu PGM IOS Kraków na losowo wybranych obszarach o wymiarach 1 mm × 4,8 mm. Do oceny struktury geometrycznej powierzchni po obróbce posłużono się parametrami:  $R_t$ ,  $R_a$ ,  $R_p$ ,  $R_k$  i  $R_q$ .

Profilogramy powierzchni próbek wykonano z następującymi parametrami metrologicznymi [5, 6]:

- krok próbkowania wzdłuż linii profilu: 0,5  $\mu\text{m}$ ,
- liczba próbek pobieranych wzdłuż linii profilu: 9608,
- całkowita długość linii profilu: 4,804 mm,
- odległość pomiędzy liniami profilów: 20  $\mu\text{m}$ ,
- liczba linii profilów w zestawie pomiarowym: 51.

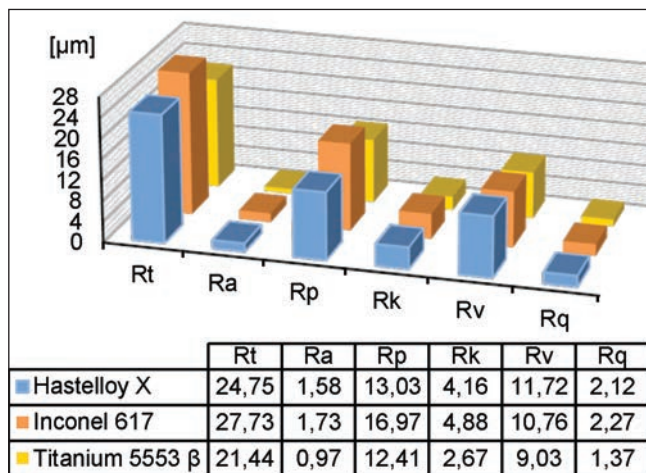
## Ocena SGP po szlifowaniu elektroerozyjnym (AEDG)

Proces szlifowania AEDG realizowano z parametrami podanymi w tabl. I. Przykładowe wyniki pomiaru parametrów SGP po szlifowaniu AEDG przedstawiono na rys. 1, a morfologię powierzchni – na rys. 2.

\* Dr hab. inż. Marcin Gołąbczak (marcin.golabczak@p.lodz.pl), mgr inż. Przemysław Maksim (przemekmaksim@gmail.com), dr inż. Robert Świecik (robert.swieczik@p.lodz.pl), dr inż. Radosław Rosik (rdoslaw.rosik@p.lodz.pl) – Politechnika Łódzka, Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn; prof. dr hab. inż. Andrzej Gołąbczak (andrzej.golabczak@pwsz.wloclawek.pl) – PWSZ Włocławek, Zakład Inżynierii Zarządzania

**TABLICA I. Parametry procesu szlifowania AEDG (ściernica CBN 125/100 M75)**

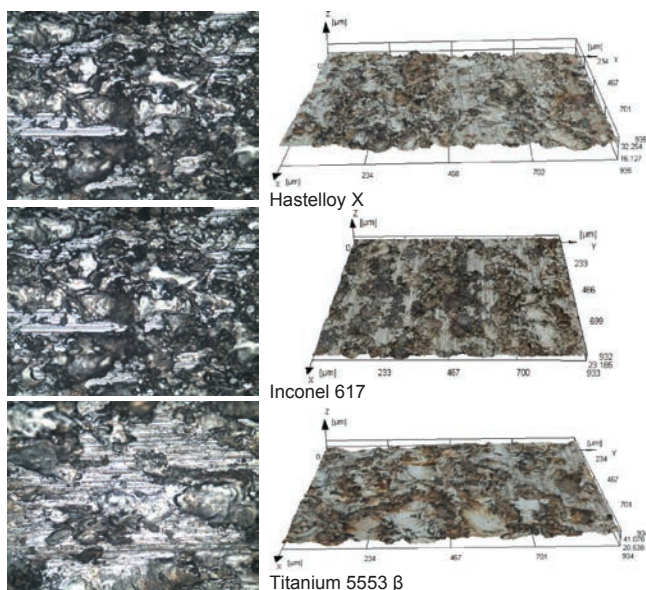
Parametry kinetyczne	
Prędkość szlifowania $v_s$ , m/s	30
Dosuw ściernicy $a$ , $\mu\text{m}$	20
Prędkość posuwu stołu $v_f$ , m/min	0,5
Parametry elektryczne	
Napięcie robocze, V	150
Prąd roboczy, A	12
Czas impulsu, $\mu\text{s}$	32
Czas przerw, $\mu\text{s}$	63



Rys. 1. Porównanie parametrów SGP próbek ze stopów lotniczych po szlifowaniu AEDG

Analiza wyników wskazuje na istotne różnice w ukształtowaniu SGP próbek z poszczególnych stopów lotniczych po szlifowaniu AEDG. Istotny jest fakt, że w tych samych warunkach szlifowania AEDG najkorzystniejsze parametry SGP uzyskano dla stopu Titanium 5553  $\beta$ .

Do oceny morfologii powierzchni próbek (2D i 3D) wykorzystano mikroskop optyczny Olympus BX51M (EN-SAM, Cluny, Francja) oraz profilometr optyczny Olympus DSX-HRSU (ECAM, Lyon, Francja). Obrazy morfologii powierzchni wszystkich szlifowanych próbek ujawniły obecność mikrkraterów i przetopień, pochodzących od wyładowań elektroerozyjnych charakterystycznych dla procesów EDM.



Rys. 2. Obrazy morfologii powierzchni próbek ze stopów lotniczych po szlifowaniu AEDG (w układzie 2D i 3D)

Należy podkreślić, że w porównaniu ze szlifowaniem konwencjonalnym obróbka hybrydowa AEDG (przy zastosowanych parametrach procesu) zwiększa wydajność usuwania nadmiaru obróbkowego oraz wydłuża trwałość ściernicy. Niekorzystnymi zjawiskami procesu AEDM są natomiast powstające mikrkratery, które zwiększają chropowatość powierzchni, oraz oddziaływanie dodatkowego strumienia ciepła od wyładowań iskrowych na stan warstwy wierzchniej [2, 3]. Sposobem na ograniczenie tych niekorzystnych zjawisk jest optymalizacja elektrycznych parametrów procesu AEDM (tj. natężenia i napięcia prądu elektrycznego oraz czasu trwania impulsów wyładowań).

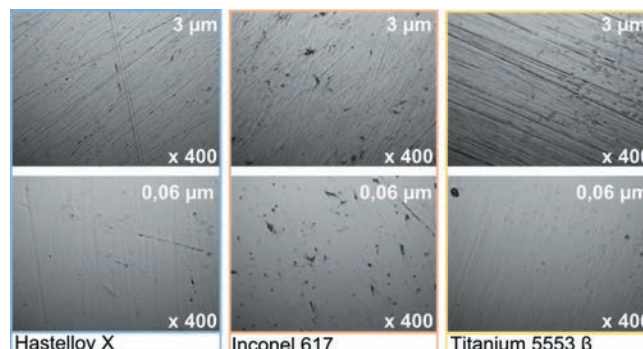
### Ocena SGP po polerowaniu

Podstawowym celem II etapu obróbki było usunięcie niewielkiej grubości warstwy wierzchniej, uszkodzonej w procesie szlifowania AEDG, oraz uzyskanie możliwie najmniejszej chropowatości powierzchni i najkorzystniejszej morfologii warstwy wierzchniej. W tym celu opracowano 5-zabiegowy proces technologiczny polerowania z zastosowaniem nowoczesnych materiałów ściernych firmy Buehler LTD, USA. Technologiczne warunki 5-zabiegowego procesu polerowania przedstawiono w tabl. II. Przykładowe wyniki oceny morfologii powierzchni i pomiaru parametrów SGP po procesie polerowania pokazano na rys. 3–6.

Pomiary stereometrii powierzchni próbek wykonano profilometrem mechanicznym PGM-1C IOS, natomiast obrazy morfologii powierzchni w układzie 2D (rys. 3) uzyskano za pomocą mikroskopu metalograficznego Delta

**TABLICA II. Warunki technologiczne polerowania**

Etap	Rodzaj materiału ściernego (Buehler)	Czas procesu, min	Siła docisku, $\text{N}/\text{cm}^2$	Prędkość obrotowa tarczy, obr/min
Etap I – polerowanie wstępne	SiC P600 (wielkość ziarna 26 $\mu\text{m}$ )	4	7	300
	SiC P1200 (wielkość ziarna 15 $\mu\text{m}$ )	2		
	SiC P2500 (wielkość ziarna 10 $\mu\text{m}$ )	1		
Etap II – polerowanie wykończeniowe	Roztwór polikrystalicznego diamentu MetaDi Supreme, 3 $\mu\text{m}$ + sukno ścierne VerduTex	3	3	150
	Zawiesina koloidalna $\text{SiO}_2$ MastreMet 2, 0,06 $\mu\text{m}$ + sukno ścierne ChemoMet	3		100

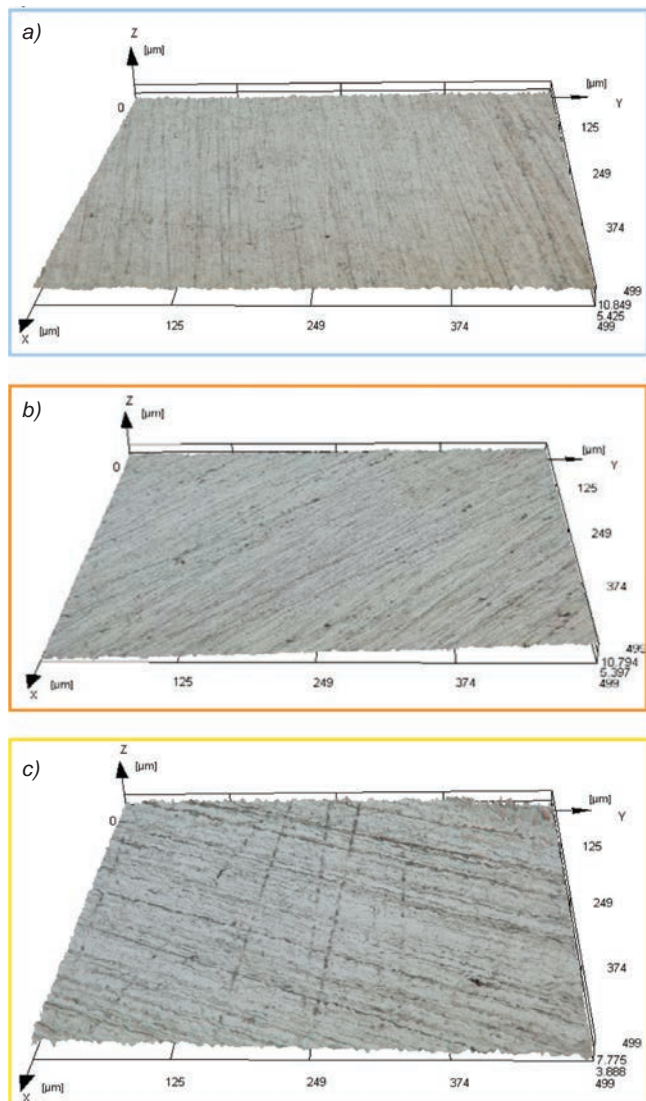


Rys. 3. Obrazy morfologii powierzchni stopów lotniczych po polerowaniu wykończeniowym (etap II) w układzie 2D

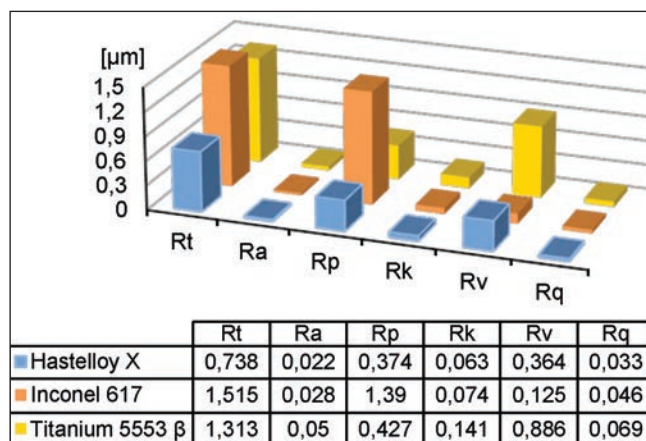


Optical IM-100, a w układzie 3D (rys. 4) – za pomocą profilometru optycznego Olympus DSX-HRSU (ECAM, Lyon, Francja).

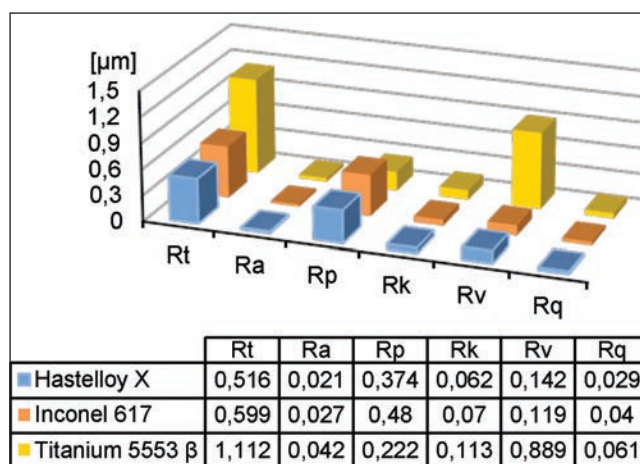
Analiza wyników potwierdziła istotną poprawę parametrów SGP próbek ze stopów lotniczych po kolejnych zabiegach polerowania. Uzyskano również wyraźną poprawę



Rys. 4. Obrazy morfologii powierzchni (w układzie 3D) stopów lotniczych po polerowaniu wykończeniowym (etap II) z zastosowaniem roztworu  $\text{SiO}_2 - 0,06 \mu\text{m}$ : a) Hastelloy X, b) Inconel 617, c) Titanium 5553  $\beta$



Rys. 5. Porównywanie parametrów SGP badanych stopów po polerowaniu wykończeniowym (etap II), roztwór z ziarnami diamentu  $3 \mu\text{m}$



Rys. 6. Porównywanie parametrów SGP badanych stopów po polerowaniu wykończeniowym (etap II); roztwór z ziarnami  $\text{SiO}_2 - 0,06 \mu\text{m}$

morfologii powierzchni obrabianych stopów po końcowym zabiegu polerowania wykończeniowego (rys. 5–6).

Na obrazach tych powierzchni widać stopniowe zmniejszanie się głębokości śladów obróbkowych (mikrokraterów i rys szlifierskich) po procesie szlifowania AEDG oraz pojawianie się krzyżujących, płtych śladów obróbkowych po polerowania. Spośród 3 badanych stopów lotniczych najtrudniejszym w obróbce okazał się stop tytanu, natomiast obróbka stopów Hastelloy X i Inconel 617 przebiegała podobnie, o czym świadczą zbliżone wartości parametrów SGP oraz obrazy morfologii powierzchni.

## Podsumowanie

Przeprowadzone badania potwierdziły przydatność technologii szlifowania AEDG i polerowania wykończeniowego do wysokojakościowego kształtowania powierzchni trudno obrabialnych stopów lotniczych. Powstające w procesie szlifowania AEDG głębokie ślady obróbkowe, mikrokratery i nadtopienia warstwy wierzchniej są usuwane w 5-zabiegowym procesie polerowania.

Aby poznać pełną charakterystykę tribologicznych właściwości warstwy wierzchniej, celowe jest kontynuowanie prac ukierunkowanych m.in. na badania rozkładu temperatury w warstwie wierzchniej, zwłaszcza w procesie szlifowania AEDG.

## LITERATURA

- Ekmeçci B., Ekmeçci N., Yaşar H. "Surfaces in electrical discharge machining" *Electrical Discharge Machining (EDM)*. New York: Nova Science Publishers, 2015.
- Gołąbczak A., Świątek R., Gołąbczak M., Stańczyk B. „Badania porównawcze temperatury warstwy wierzchniej w procesie elektroerozyjnego szlifowania (AEDG) materiałów trudno obrabialnych”. *Mechanik*. 87, 8–9 (2014): s. 255–258.
- Gołąbczak A., Świątek R. „Assessment of energy consumption and internal stresses in surface layer in the abrasive electrodischarge grinding (AEDG) process”. *DDF*. 334–335 (2013): s. 89–96.
- Gołąbczak M., Pawlak W., Szymański W., Jacquet P., Fliti R. “Properties of PVD coatings manufactured on X38CrMoV5-1 steel for plastic moulding applications”. *Journal of Machine Engineering*. 12 (2012): s. 37–45.
- Gołąbczak A., Konstantynowicz A., Gołąbczak M. „Modelowanie mikrogeometrii powierzchni polerowanej stopu magnezu”. *Mechanik*. 87, 8–9 (2014): s. 79–90.
- Oczko K.E., Kawalec A. „Kształtowanie metali lekkich”. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2012.
- Modi M., Agrawal G. “Design, development and experimental investigation of electro-discharge diamond surface grinding of Ti6Al4V”. *Advanced Material Research*. 418–420 (2012): s. 1478–1481.