

## Effect of propylene glycol feeding with MQL method during grinding of Ti-6Al-4V ELI titanium alloy on grinding force

# Wpływ podawania glikolu propylenowego z minimalnym wydatkiem metodą MQL podczas szlifowania stopu tytanu Ti-6Al-4V ELI na siłę szlifowania



DOI: 10.15199/62.2024.12.28

Propylene glycol and its aq. solns. at mass concns. of 25, 50 and 75% were used as a cooling and lubricating fluid in the process of grinding samples made of Ti alloy Ti-6Al-4V ELI, using the MQL (min. quant. lubrication) method. Two components of the grinding force were measured, the tangential and normal component. Based on these, the validity of feeding propylene glycol at different concns. into the machining zone during the grinding process was evaluated.

**Keywords:** propylene glycol, flat surface grinding, grinding fluid, grinding force

Właściwy dobór płynu chłodząco-smarującego (PCS) i metody jego podawania w strefę obróbki są ważnym elementem procesu szlifowania. Płyn taki powinien zapewniać przede wszystkim odpowiednie chłodzenie i smarowanie strefy szlifowania w celu zachowania wymaganych właściwości technologicznej warstwy wierzchniej obrabianego materiału. Ponadto niezwykle istotne jest to, aby zastosowanie wybranego PCS minimalizowało lub całkowicie eliminowało zagrożenia dla środowiska i operatorów obrabiarek oraz było uzasadnione ekonomicznie<sup>1, 2)</sup>.

Powyższe wymagania spełnia glikol propylenowy, który jest bezbarwną cieczą o silnych właściwościach

Przedstawiono badania nad zastosowaniem glikolu propylenowego jako chłodziwa podczas szlifowania płaskich powierzchni próbek wykonanych z trudnoobrabialnego stopu tytanu Ti-6Al-4V ELI. Glikol propylenowy zmieszano z wodą demineralizowaną w celu uzyskania czterech różnych stężeń w roztworze. Przedstawiono badania obejmujące: szlifowanie powierzchni próbek za pomocą chłodziwa podawanego z minimalnym wydatkiem metodą MQL oraz pomiar dwóch składowych sił szlifowania. Przedstawiono analizę uzyskanych wyników i ocenę możliwości zastosowania glikolu propylenowego w różnych stężeniach jako środka chłodząco-smarującego.

**Słowa kluczowe:** glikol propylenowy, szlifowanie powierzchni płaskich, płyn chłodząco-smarujący, siła szlifowania

higroskopijnych. Ponadto łatwo ulega biodegradacji oraz miesza się z wodą, olejami i acetonem. Dotychczas glikol propylenowy był stosowany w przemyśle kosmetycznym, spożywczym, farmaceutycznym, chemicznym oraz poligraficznym<sup>3)</sup>. Jednak wstępne prace badawcze prowadzone w Instytucie Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn Politechniki Łódzkiej wskazują, że jego zastosowanie jako PCS podawanego z minimalnym wydatkiem metodą MQL (*minimum quantity lubrication*) podczas szlifowania powierzchni płaskich może być dobrą alternatywą dla dotychczas stosowanych płynów obróbkowych<sup>4, 5)</sup>.



Dr hab. inż. Wojciech STACHURSKI (ORCID: 0000-0003-3936-6846) w roku 2001 ukończył studia na Wydziale Mechanicznym Politechniki Łódzkiej. W 2008 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych, a w 2020 r. stopień doktora habilitowanego na tym samym wydziale. Jest zatrudniony na stanowisku profesora uczelni w Instytucie Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn PŁ. Specjalność – inżynieria mechaniczna, technologia budowy maszyn, narzędzia skrawające, obróbka skrawaniem.



Dr hab. inż. Marcin GOŁĄBCZAK (ORCID: 0000-0001-6196-5728) w roku 1999 ukończył studia na Wydziale Organizacji i Zarządzania Politechniki Łódzkiej. W 2005 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych w zakresie inżynierii materiałowej, a w 2015 r. stopień doktora habilitowanego w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn. Pracuje na stanowisku profesora uczelni w Instytucie Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn PŁ. Jest kierownikiem Zakładu Technologii Maszyn, dyplomowanym rzeczoznawcą SIMP i członkiem CIRP. Specjalność – inżynieria mechaniczna.

**\* Adres do korespondencji:**

Zakład Technologii Maszyn, Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn, Wydział Mechaniczny, Politechnika Łódzka, ul. Stefanowskiego 1/15, 90-537 Łódź, tel.: (42) 631-22-99, fax: (42) 631-24-18, e-mail: marcin.golabczak@p.lodz.pl

Table 1. Physical and chemical properties of propylene glycol

Tabela 1. Właściwości fizyczne i chemiczne glikolu propylenowego

Właściwość	Wartość
Gęstość (w 20°C), g/cm <sup>3</sup>	1,12
Lepkość kinematyczna (w 25°C), mm <sup>2</sup> /s	40–45
Temperatura samozapłonu, °C	> 400
Temperatura wrzenia, °C	188

Table 2. Percentage of propylene glycol in PCS

Tabela 2. Procentowa zawartość glikolu propylenowego w PCS

Oznaczenie roztworu	Udział glikolu w PCS, %	Udział wody w PCS, %
100	100	0
75/25	75	25
50/50	50	50
25/75	25	75

Zastosowanie glikolu propylenowego w metodzie MQL jest także istotne z uwagi na samą metodę, która jest stale rozwijana w różnych ośrodkach badawczych na świecie, m.in. w kontekście wykorzystywanych płynów chłodząco-smarujących<sup>6)</sup>.

Celem badań było określenie wpływu zastosowania glikolu propylenowego o różnym stężeniu jako płynu chłodząco-smarującego, podawanego z minimalnym wydatkiem metodą MQL na wartość siły szlifowania powstającej podczas szlifowania powierzchni płaskich próbek wykonanych ze stopu tytanu Ti-6Al-4V ELI.

## Część doświadczalna

### Materiały

Glikol propylenowy GP (propano-1,2-diol) to organiczny związek chemiczny należący do grupy alkoholi dwuwodorotlenowych. Jest bezbarwną, bezwoną, higroskopijną

i rozpuszczalną w wodzie cieczą o wzorze chemicznym C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O<sub>2</sub>, produkowaną na skalę przemysłową głównie poprzez hydrolizę tlenku propylenu. W tabeli 1 przedstawiono wybrane właściwości fizyczne i chemiczne glikolu propylenowego. Na potrzeby badań glikol propylenowy zmieszano z wodą demineralizowaną i uzyskano cztery roztwory o różnych udziałach procentowych składników (tabela 2). Szlifowaniu poddano próbki wykonane ze stopu tytanu Ti-6Al-4V ELI.

### Metodyka badań

Badania wpływu stężenia glikolu propylenowego w płynie chłodząco-smarującym na składowe siły szlifowania przeprowadzono na stanowisku wyposażonym w szlifierkę do powierzchni płaskich SPD-30b firmy Jotes SA (rys. 1a). PCS dostarczano do strefy szlifowania z minimalnym wydatkiem metodą MQL, wykorzystując do tego celu zewnętrzne urządzenie typu Ecolubric MQL Booster firmy Accu-Svenska (rys. 1c). Mgłą olejową kierowano w strefę obróbki poprzez pojedynczą dyszę ustawioną stycznie w stosunku do czynnej powierzchni ściernicy (rys. 1b) z wydatkiem  $Q = 100$  mL/h.

Powierzchnie próbek wykonanych ze stopu tytanu Ti-6Al-4V ELI o wymiarach 100×20×10 mm szlifowano z wykorzystaniem elektrokorundowej ściernicy ze spoiwem ceramicznym 2NQ60JVS3 typu Quantum firmy Norton.

W trakcie badań zastosowano stałą prędkość obwodową ściernicy  $v_s = 25$  m/s, a także prędkość przedmiotu obrabianego  $v_w = 0,2$  m/s, usuwając w jednym przejściu roboczym naddatek obróbkowy (styk roboczy)  $a_c = 0,02$  mm. Warunki obróbki podano w tabeli 3.

Do pomiaru składowych siły szlifowania zastosowano tor pomiarowy, w skład którego wchodziły: siłomierz Kistler typu 9321B, wzmacniacz sygnału Kistler typu 5011A, karta pomiarowa oraz komputer klasy PC z oprogramowaniem do akwizycji danych pomiarowych KEITHLEY quick DAQ. W trakcie badań rejestrowano składową normalną  $F_n$  i składową styczną  $F_t$  siły szlifowania.

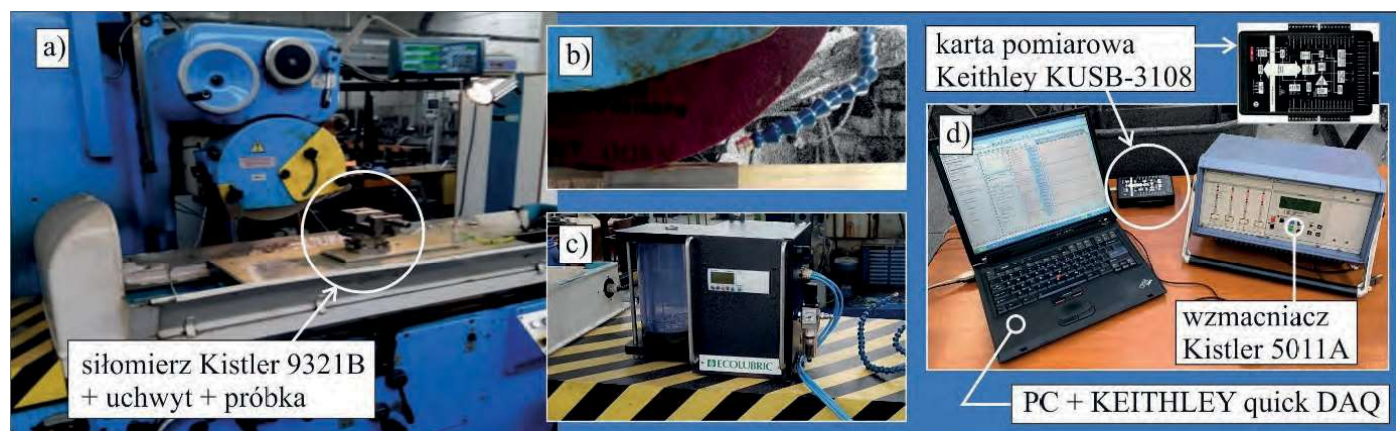


Fig. 1. Test stand equipped with grinding machine type SPD-30b: a) general view, b) coolant nozzle setup, c) Ecolubric MQL Booster device, d) grinding force measurement devices

Rys. 1. Stanowisko badawcze wyposażone w szlifierkę SPD-30b: a) widok ogólny, b) ustawienie dyszy podającej PCS, c) urządzenie Ecolubric MQL Booster, d) elementy toru pomiarowego siły szlifowania

Table 3. Grinding conditions applied during the experimental study

Tabela 3. Warunki obróbki zastosowane w trakcie badań doświadczalnych

Proces szlifowania	Jednoprzęciowe obwodowe szlifowanie powierzchni płaskich
Szlifierka	Szlifierka do powierzchni płaskich typu SPD-30b produkcji firmy Jotes SA (Polska)
Parametry szlifowania	Prędkość obwodowa ściernicy $v_s = 25$ m/s Prędkość przedmiotu obrabianego $v_w = 0,2$ m/s Naddatek obróbkowy (styk roboczy) $a_e = 0,02$ mm
Parametry obciążania ściernicy	Obciążacz: jednoziarnisty obciążacz diamentowy typu M1020 Masa obciążacza $Q_d = 2,0$ kt Czynna szerokość obciążacza $b_d = 0,2-0,8$ mm Prędkość obwodowa ściernicy przy obciążaniu $v_{sd} = 10$ m/s Naddatek obróbkowy obciążania $a_d = 0,005-0,02$ mm Prędkość posuwu osiowego stołu szlifierki przy obciążaniu $v_{fd} = 5,0$ mm/min Liczba przejść obciążających $i_d = 4$
Ściernica	38A60KV8 firmy Norton (Polska)
Warunki dostarczania PCS	Mgła olejowa podawana z minimalnym wydatkiem metodą MQL: wydatek $Q = 100$ mL/h ciśnienie sprężonego powietrza $p = 0,6$ MPa
Przedmiot obrabiany	Stop tytanu Ti-6Al-4V ELI (Grade 23, G23) Wymiary próbek: $100 \times 20 \times 10$ mm

## Wyniki badań i ich omówienie

W tabeli 4 zamieszczono wartości składowej stycznej  $F_t$  i składowej normalnej  $F_n$  siły szlifowania zmierzone podczas szlifowania próbek z czterema różnymi stężeniami glikolu propylenowego. Na rys. 2 przedstawiono interpretację graficzną uzyskanych wyników.

Na podstawie tych danych stwierdzono, że dla każdego z czterech stężeń glikolu propylenowego składowa normalna  $F_n$  siły szlifowania osiągała większą wartość niż składowa styczna  $F_t$  siły szlifowania. Najmniejsze wartości obu składowych zmierzono dla pierwszej próby szlifowania, dla której jako PCS w metodzie MQL zastosowano nierozcieńczony glikol propylenowy (100%). Zmniejszanie procentowego udziału glikolu poprzez dodawanie wody demineralizowanej powodowało, że wartości poszczególnych składowych siły szlifowania zwiększały swoją wartość.

Uwagę zwraca fakt, że w przypadku zastosowania stężenia 100% i stężenia oznaczonego jako 75/25 na powierzchni próbek nie zaobserwowano żadnych przypaleń (rys. 3a i 3b). Dla stężenia oznaczonego jako 50/50 na powierzchni próbki zaobserwowano przypalenia szlifierskie w postaci powierzchniowych smug (rys. 3c). Dla stężenia oznaczonego jako 25/75 na powierzchni próbki pojawiły się przypalenia o intensywnej barwie (rys. 3d), a dodatkowo próbka uległa odkształceniu w postaci ugięcia, którego strzałka wyniosła 0,08 mm. W związku z tym uznano, że stężenie 75/25 jest wartością graniczną, której nie można

Table 4. Measured values of the tangential component  $F_t$  and the normal component  $F_n$  of the grinding force

Tabela 4. Zmierzone wartości składowej stycznej  $F_t$  i normalnej  $F_n$  siły szlifowania

Składowa siły szlifowania	Oznaczenie roztworu			
	100	75/25	50/50	25/75
Składowa normalna $F_n$ , N	145	168	223	279
Składowa styczna $F_t$ , N	104	115	134	149

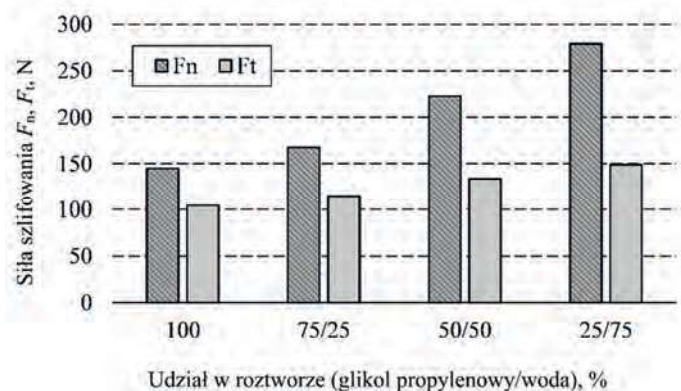


Fig. 2. Grinding force  $F_n$  and  $F_t$  components depending on propylene glycol concentration

Rys. 2. Składowe  $F_n$  i  $F_t$  siły szlifowania w zależności od stężenia glikolu propylenowego

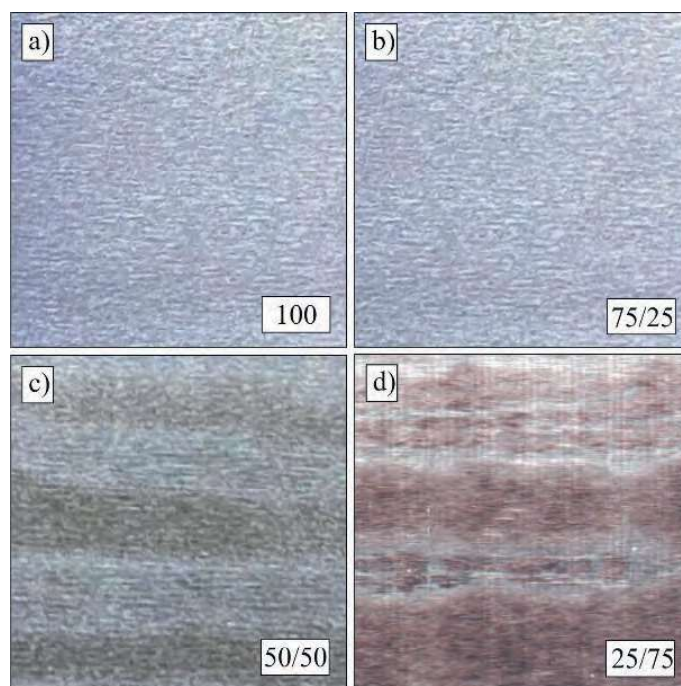


Fig. 3. Sample surface after grinding with different percentages of propylene glycol in the coolant (magnification  $\times 20$ ): a) 100, b) 75/25, c) 50/50, d) 25/75

Rys. 3. Wygląd powierzchni próbek po szlifowaniu z różnym procentowym udziałem glikolu propylenowego w PCS (powiększenie  $\times 20$ ): a) 100, b) 75/25, c) 50/50, d) 25/75

przekraczać ze względu na jakość obrobionej powierzchni stopu tytanu Ti-6Al-4V ELI w zastosowanych warunkach.

Table 5. The calculated values of the W-index

Tabela 5. Obliczone wartości wskaźnika W

Oznaczenie roztworu	Wskaźnik W
100	1,39
75/20	1,46
50/50	1,66
25/75	1,87

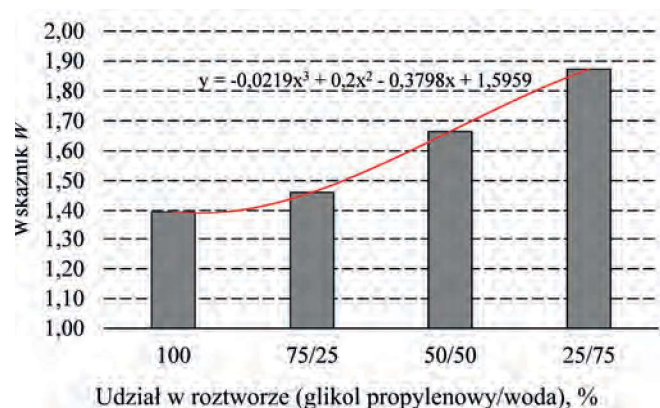


Fig. 4. W-index depending on propylene glycol concentration

Rys. 4. Wskaźnik W w zależności od stężenia glikolu propylenowego

W tabeli 5 zamieszczono wartości wskaźnika  $W$  obliczanego jako iloraz składowej normalnej siły szlifowania i składowej stycznej siły szlifowania,  $F_n/F_t$ . Na rys. 4 przedstawiono interpretację graficzną uzyskanych wyników.

Analogicznie jak w przypadku omawianych wcześniej wyników składowych siły szlifowania, również wartość wskaźnika  $W$  niekorzystnie zwiększała się wraz ze zmniejszaniem procentowego udziału glikolu propylenowego w PCS. Wskazuje to na pogorszenie właściwości smarnych PCS wraz ze zmniejszeniem udziału glikolu propylenowego w roztworze, co najprawdopodobniej wynika z niewłaściwego zwilżania czynnej powierzchni ściernicy oraz materiału obrabianego przy jednoczesnym nieefektywnym czyszczeniu czynnej powierzchni ściernicy. Jest to szcze-

gólnie widoczne, począwszy od wyników uzyskanych dla stężenia 50/50.

## Podsumowanie

Badania wykazały, że zmniejszanie stężenia glikolu propylenowego w PCS na skutek mieszania z wodą demineralizowaną powoduje niekorzystne zwiększenie wartości składowej stycznej  $F_t$  i składowej normalnej  $F_n$  siły szlifowania w zakresie przyjętych warunków obróbki. Wynika to z pogorszenia warunków smarowania w strefie kontaktu aktywnych ziaren ściernych z materiałem obrabianym, co przyczynia się do znacznego wzrostu tarcia i wydzielania większej ilości ciepła. Dodatkowo zwiększona ilość ciepła wnikając do materiału próbek o małej grubości, może wywołać ich deformacje, np. w postaci ugięć.

Podczas podawania roztworu zawierającego 25% glikolu propylenowego i 75% wody demineralizowanej wartości składowych siły szlifowania były największe. Zaobserwowano także przypalenia na powierzchni próbki, prowadzące do powstawania mikropęknięć w technologicznej warstwie wierzchniej materiału. Jest to bardzo niepożądane zjawisko powodujące osłabienie powierzchni próbki, co w konsekwencji może się przełożyć na bardzo szybkie zużycie powierzchniowe współpracujących ze sobą elementów, powodujące przyspieszone zużycie eksploatacyjne.

Otrzymano: 14-10-2024

Zrecenzowano: 25-11-2024

Zaakceptowano: 28-11-2024

Opublikowano: 20-12-2024

## LITERATURA

- [1] W. Stachurski, R. Dębowski, R. Rosik, R. Świącik, W. Pawłowski, *Adv. Sci. Technol. Res. J.* 2023, **17**, nr 3, 1.
- [2] W. Stachurski, J. Sawicki, B. Januszewicz, R. Rosik, *Materials* 2022, **15**, 1336.
- [3] W. Wesołowski, M. Kucharska, *Podst. Metody Oceny Środ. Pracy* 2017, nr 2(92), 173.
- [4] *Pat. pol.* 212206 (2012).
- [5] R. Rosik, *Mechanik* 2013, nr 8–9, 341.
- [6] H. Adibi, *Adv. Mater. Process. Technol.* 2024, **10(3)**, 1666.