

# Badania porównawcze zużycia i trwałości ostrza frezów tarczowych z powłokami przeciwzużyciowymi po ostrzeniu na szlifierce CNC

MARCIN GOŁĄBCZAK<sup>1</sup>, PRZEMYSŁAW DRUŻNY<sup>2</sup>, ANNA JĘDRZEJCZAK<sup>3</sup>, TOMASZ MIRSKI<sup>4</sup>, ANDRZEJ GOŁĄBCZAK<sup>5</sup>

W artykule przedstawiono proces ostrzenia frezów tarczowych z powłokami przeciwzużyciowymi na szlifierce CNC oraz wyniki badań porównawczych po ostrzeniu, dotyczące oceny ich zużycia i okresu trwałości w warunkach przemysłowego przecinania profili stalowych ze stali konstrukcyjnej S320GD z powłoką antykorozyjną Magnelis ZM310.

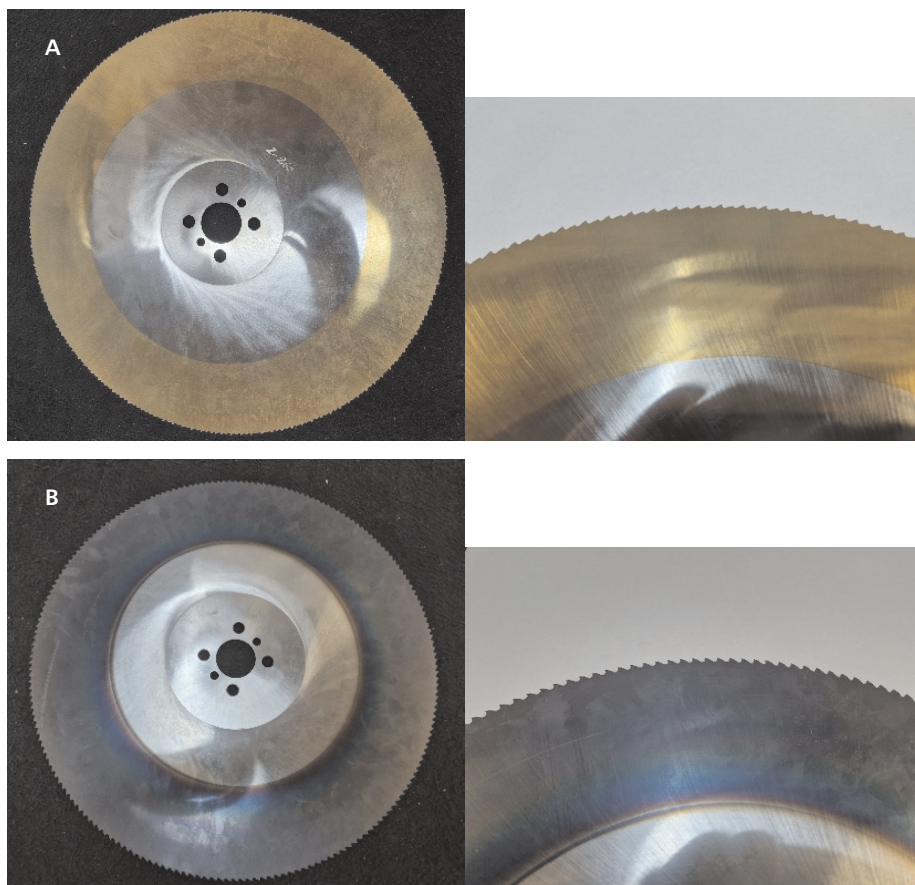
## WPROWADZENIE

Proces cięcia materiałów konstrukcyjnych realizowany jest wieloma metodami, np.: obróbką skrawaniem (piły tarczowe, piły taśmowe), obróbką ścierną (ściernice do

przecinania), obróbką plastyczną (prasy), obróbką elektroerozyjną WEDM, obróbką plazmową itd. [1, 6, 9, 11]. Wymienione techniki przecinania materiałów konstrukcyjnych charakteryzują się różnicowaną dokładnością kształtowo-wymia-

rową i stanem warstwy wierzchniej przecinanych powierzchni oraz zakresem celowego zastosowania w procesach produkcyjnych. Efektywnym i wydajnym sposobem przecinania materiałów stalowych pozostaje nadal metoda przecinania frezami tarczowymi.

W artykule skoncentrowano się na procesie przecinania frezami tarczowymi profili z blachy stalowej, wykonywanych w firmie MFO S.A. w Sochaczewie. Proces cięcia tych profili realizowano frezami tarczowymi ze stali HSS, które były pokrywane supertwardymi powłokami przeciwzużyciowymi typu TiAlN i TiN, wytwarzanymi metodą obróbki powierzchniowej PVD. Należy podkreślić, że powłoki przeciwzużyciowe tego typu znacząco zwiększają odporność na zużycie oraz okres trwałości frezów [3, 4, 5].



<sup>1</sup> Dr hab. inż. Marcin Gołąbczak, prof. PŁ, Politechnika Łódzka, Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn, Zakład Technologii Maszyn, ul. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź, e-mail: marcin.golabczak@p.lodz.pl, <sup>2</sup> inż. Przemysław Drużny, MFO S.A. Producent Profilów Stalowych, Kożuszki-Parcel 70A, 96-500 Sochaczew; Politechnika Łódzka, Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn, <sup>3</sup> dr inż. Anna Jędrzejczak, Politechnika Łódzka, Instytut Inżynierii Materiałowej, Zakład Inżynierii Nanomateriałów, <sup>4</sup> mgr inż. Tomasz Mirski, Prezes Zarządu, MFO S.A. Producent Profilów Stalowych, <sup>5</sup> prof. dr hab. inż. Andrzej Gołąbczak, Państwowa Akademia Nauk Stosowanych we Włocławku, e-mail: andrzej.golabczak@pans.wloclawek.pl.

Rys. 1. Frezy tarczowe z powłokami PVD firmy Azak Tool Technologies (Turcja) wykorzystane w badaniach: a) z powłoką TiN, b) z powłoką TiAlN

Zakres prezentowanych wyników badań obejmuje próby technologiczne przecinania frezami tarczowymi profili z blach ze stali konstrukcyjnej S320GD z powłoką antykorozyjną cynkowo-magnezową Magnelis ZM310, próby ostrzenia frezów przeprowadzone w firmie MFO S.A. Sochaczew oraz badania laboratoryjne dotyczące zużycia i morfologii powierzchni ostrzy frezów przeprowadzone w MFO S.A. Sochaczew oraz w Politechnice Łódzkiej.

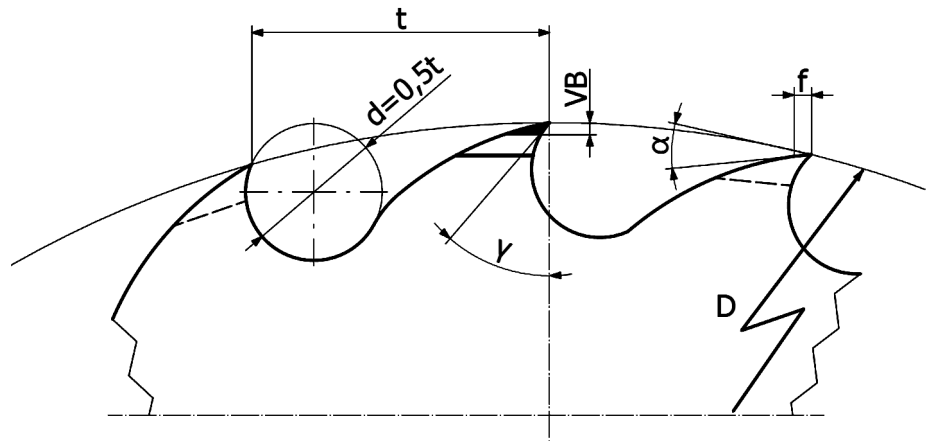
### CHARAKTERYSTYKA I GEOMETRIA OSTRZA FREZÓW TARCZOWYCH

Do badań wykorzystano dwa rodzaje frezów tarczowych o średnicy 400 mm firmy Azak Tool Technologies (Turcja), wykonanych z wysokostopowej stali szybko tnącej HSS z dodatkiem wolframu, wanadu, molibdenu i kobaltu o symbolu DMo5, z powłokami przeciwzużyciowymi TiN oraz TiAlN (rysunek 1). Powłoki zostały naniesione na frezy metodą fizycznego osadzania z fazy gazowej PVD [3, 4, 5]. Widok badanych frezów tarczowych przedstawiono na rysunku 1, natomiast geometrię ostrza frezów i wskaźnik ich zużycia na powierzchni przyłożenia VB przedstawiono na rysunku 2. W realizowanych próbach ostrzenia frezów oraz badaniach ich zużycia zastosowano zmienne kąty  $\alpha$  i  $\gamma$  ostrzy frezów, których wartości podano w opisie wyników badań.

### STANOWISKA BADAWCZE I METODYKA BADAŃ

Do ostrzenia frezów tarczowych zastosowano pięcioosiową, automatyczną szlifierkę CNC firmy LOROCH GmbH-Niemcy, model Solution K850-T, będącą na wyposażeniu wydziału produkcyjnego firmy MFO S.A. (rys. 3, 4 i 5).

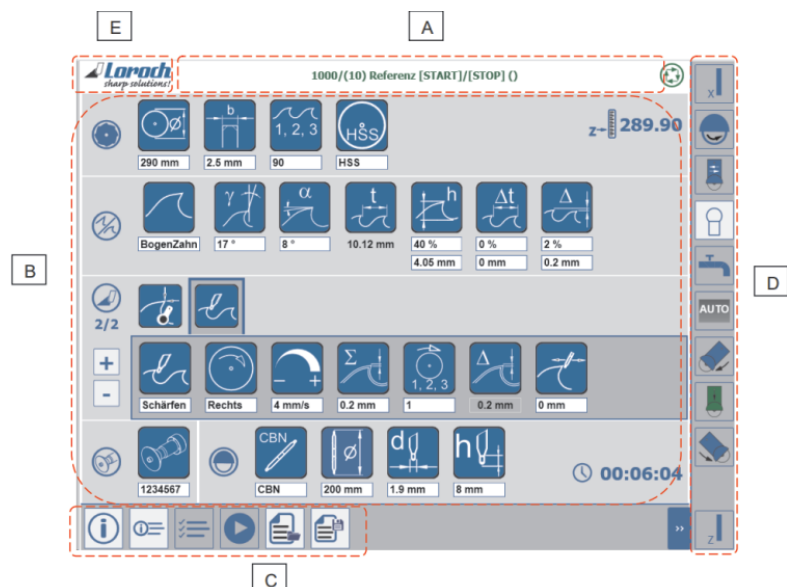
Szlifierka umożliwiała precyzyjne kształtowanie zaprogramowanej geometrii ostrza frezów (kąty  $\alpha$  i  $\gamma$  oraz naprzemiennie faz na bocznej powierzchni ostrzy frezu) według opracowanego programu sterującego. Szlifierka posiada możliwość kształtowania trzech typów uzębienia: B, BW i C. Do szlifowania zarysu powierzchni natarcia ostrza frezów zastosowano ściernicę CBN ze spoiwem metalowym PowerGrind firmy Loroch, o średnicy 200 mm i grubości 1,6 mm (rys. 6).



Rys. 2. Geometria ostrza i wskaźnik zużycia VB: D – średnica zewnętrzna,  $\alpha$  – kąt przyłożenia,  $\gamma$  – kąt natarcia, t – podziałka, f – faza na bocznej powierzchni przyłożenia, VB – wskaźnik zużycia ostrza na powierzchni przyłożenia, d – średnica profilu powierzchni natarcia po ostrzeniu



Rys. 3. Widok pięcioosiowej szlifierki CNC do ostrzenia frezów tarczowych firmy LOROCH GmbH (Mörtenbach, Niemcy) model Solution K850-T: a) widok ogólny, b) komora robocza szlifierki podczas pracy



Rys. 4. Panel sterowania szlifierki



Rys. 5. Nacinanie zębów ściernicą supertwardą z CBN

Ściernice CBN są wykonane z supertwardego sześciennego azotku boru o twardości w skali Knoppa około 45 GPa. Sześcienny azotek boru (CBN), w odróżnieniu od diamentu, nie wykazuje cech powinowactwa z żelazem, zatem jest to materiał doskonale nadający się do obróbki stali [2, 7, 8, 10, 12]. Opierając się na wcześniejszych doświadczeniach firmy MFO S.A. ustalono, że optymalnym rodzajem uzębienia był typ BW i dlatego też taki zastosowano w testach szlifowania frezów. Przy szlifowaniu powierzchni natarcia frezu stosowano prędkość szlifowania ściernicy 25 m/s i dosuw wgłębny ściernicy 1,88 mm/s. Do kon-

troli zarysu szlifowanych ostrzy frezów zastosowano mikroskop optyczny firmy Loroach TC 700, będącym na wyposażeniu firmy MFO S.A. (rys. 7). Na mikroskopie sprawdzano m.in.: kąty natarcia i przyłożenia, poprawność zarysu szlifowanych ostrzy, podziałkę ostrzy oraz wysokość ostrza frezu.

W realizowanych badaniach wykorzystywano również profilometr Sensofar Metrology (Barcelona, Hiszpania) wykorzystywany do pomiarów zużycia bocznych powierzchni ostrza frezów. Do rejestracji obrazów zużycia ostrzy skrawających frezów zastosowano również mikroskop skaningowy firmy Keyence Corporation (Osaka-Japonia).

### WYNIKI BADAŃ

Prezentowane badania doświadczalne obejmowały dwa główne etapy, z których pierwszy dotyczył szlifowania ostrzy frezów, natomiast drugi etap dotyczył oceny i identyfikacji zużycia ostrzy frezów oraz oceny ich chropowatości i morfologii powierzchni po ostrzeniu, po długotrwałych próbach ciecienia profili metalowych.

### Badania wstępne ostrzy frezów w procesie przecinania profili stalowych

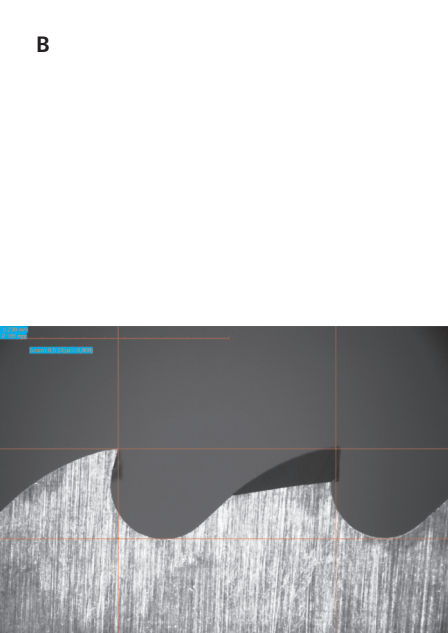
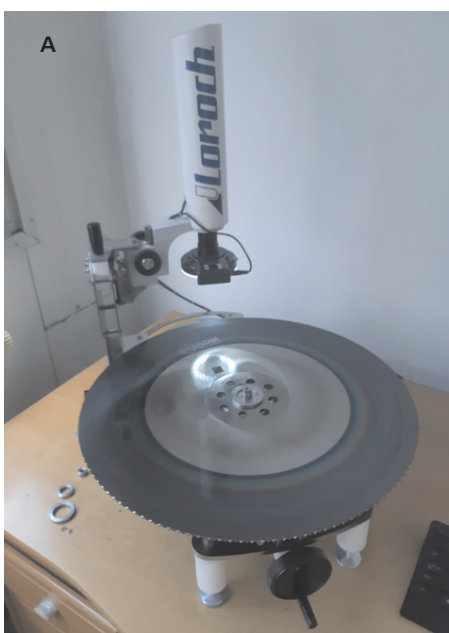
Badania wstępne polegały na porównaniu zużycia siedmiu frezów z powłoką TiAlN, o różnych kątach natarcia i przyłożenia ukształtowanych ostrzeniem na szlifierce CNC LOROCH, którymi przecinano profile stalowe. W badaniach wstępnych tymi frezami przeprowadzono po 200 prób ciecienia profili stalowych (profil kwadratowy o wymiarach 41×41 mm i grubości ścianki 2,5 mm), wykonanych ze stali konstrukcyjnej S320GD z powłoką antykorozyjną cynkowo-magnezową Magnelis ZM310 o grubości 25 μm. Przekrój poprzeczny przecinanych profili ilustruje rysunek 8, natomiast stanowisko do ciecienia profili przedstawiono na rysunku 9.

Badania realizowano w powtarzalnych warunkach obróbkowych, tj. prędkości ciecienia 250 m/min i posuwie 0,12 mm/ząb. Obróbkę prowadzono w obecności cieczy chłodząco-smarującej. Stanowisko do ciecienia profili pokazano na rysunku 9.

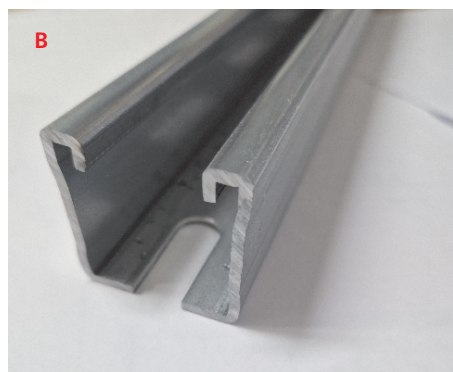
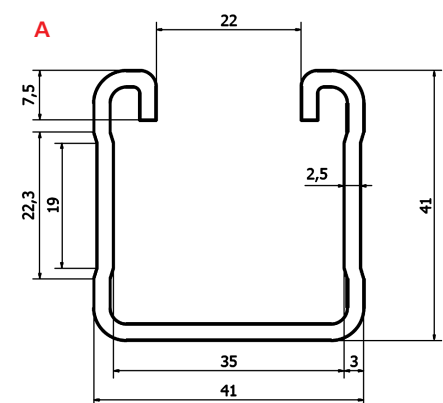
Po teście 200 cieczeń profili wszystkie frezy były badane na mikroskopie optycz-



Rys. 6. Ściernica supertwarda ze spoiwem metalowym PowerGrind CBN firmy Loroach: a) widok ogólny, b) ściernica zamocowana we wrzecionie szlifierki



Rys. 7. Mikroskop optyczny firmy Loroach TC 700: a) stanowisko pomiarowe, b) pomiar zarysu zęba



Rys. 8. Profil stalowy wykonany ze stali konstrukcyjnej S320GD z powłoką antykorozyjną Magnelis ZM310: a) przekrój poprzeczny, b) widok

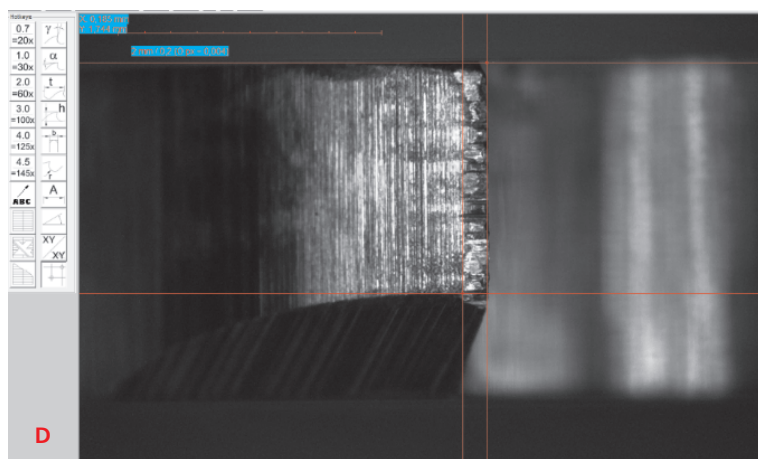
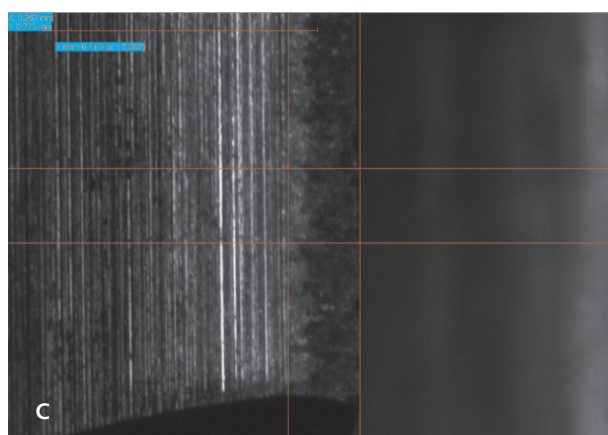
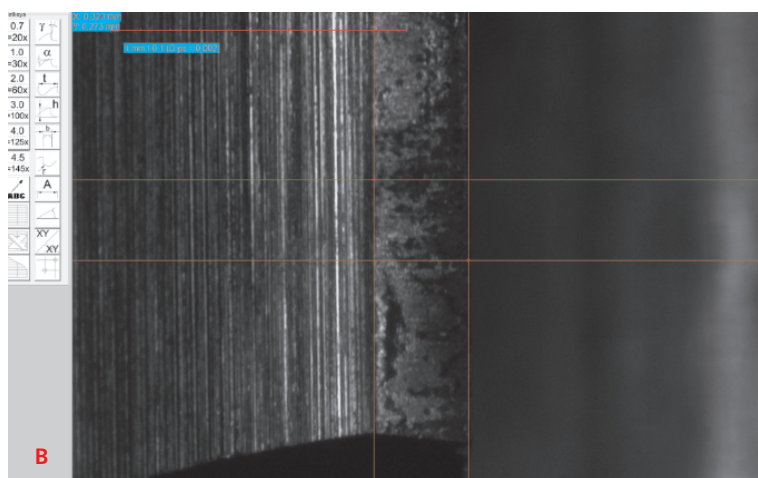
nym Loroch w celu oceny zużycia ich ostrzy skrawających. Wysokość zużycia ostrzy mierzono na powierzchni przyłożenia zarysu ostrzy frezu (rys. 10). Wyniki pomiarów zużycia os-

trzy frezów przedstawiono w Tabeli 1 oraz na rysunku 11.

Analiza wyników badań wstępnych wykazała, że najmniejsza wartość wskaź-



Rys. 9. Stanowisko do cięcia profili: a) widok ogólny pily GTF450 produkcji firmy MFO S.A., b) strefa robocza z widocznym frezem tarczowym tnącym profil stalowy



Rys. 10. Rezultaty pomiarów wysokości zużycia ostrzy frezów z powłoką TiAlN z użyciem mikroskopu optycznego firmy Loroch: a) widok zęba wraz z ostrzem, (powiększenie  $\times 60$ ) b) zarys „nowego” ostrza zęba o wysokości 0,32 mm (powiększenie  $\times 145$ ), c) zarys częściowo „stępnego” ostrza zęba o wysokości 0,26 mm (powiększenie  $\times 145$ ), d) zarys „stępnego” ostrza zęba o wysokości 0,18 mm (powiększenie  $\times 60$ )

nika zużycia ostrzy VB frezów z powłoką TiAlN po procesie cięcia 200 profili stalowych, występowała dla frezów o kącie natarcia 15° i kącie przyłożenia 8°. Ich zużycie było najmniejsze i wynosiło około 0,041 mm. W związku z tym dalsze badania zostały przeprowadzone dla frezów o takiej właśnie geometrii ostrza frezów.

**Zużycie na wysokości zębów frezów po długotrwałych próbach cięcia profili stalowych**

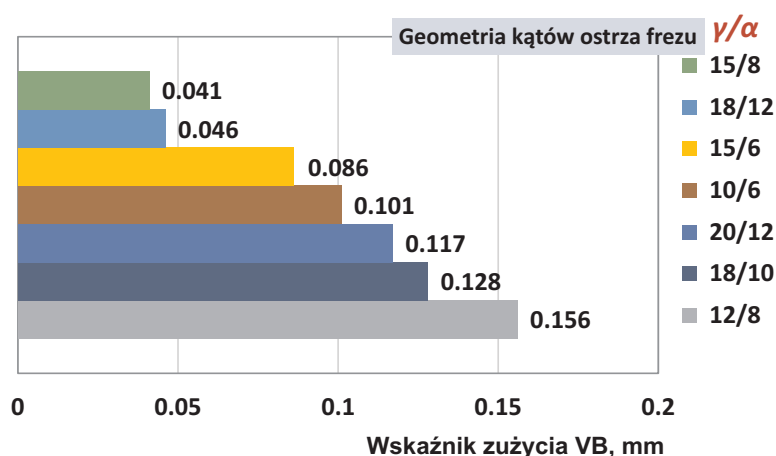
Zasadnicza część badań doświadczalnych dotyczyła długotrwałych prób cięcia profili stalowych (2500 sztuk), z zastosowaniem frezów o optymalnych kątach natarcia i przyłożenia. Do tego celu wykorzystano dwa rodzaje frezów, tj. z powłoką przeciwzużyciową TiAlN oraz powłoką TiN. Proces cięcia był prowadzony w takich samych warunkach cięcia, jakie były stosowane w badaniach wstępnych, tj.: prędkości cięcia 250 m/min i posuwie 0,12 mm/ząb.

Wyniki pomiarów wynikające z badań zasadniczych przedstawiono na rysunku 12. Kolejnym testem w tych badaniach były próby cięcia profili stalowych aż do momentu dopuszczalnego zużycia ostrzy skrawających frezów (czyli zużycia 0,3 mm). Przeprowadzono dodatkowo testy porównawcze, w których zastosowano frez bez warstwy przeciwzużyciowej PVD. Wyniki pomiarów wynikające z tych badań przedstawiono na wykresie (rys. 13). Badania wykazały, że frezy o optymalnych kątach ostrza z powłoką TiAlN są najbardziej efektywne w procesie obróbki skrawaniem, ponieważ umożliwiły przecięcie około 10120 sztuk profili. Frezy z warstwą TiN umożliwiły natomiast przecięcie około 8050 sztuk profili, a frezy bez warstwy PVD utraciły swoje właściwości skrawne po przecięciu około 5950 sztuk.

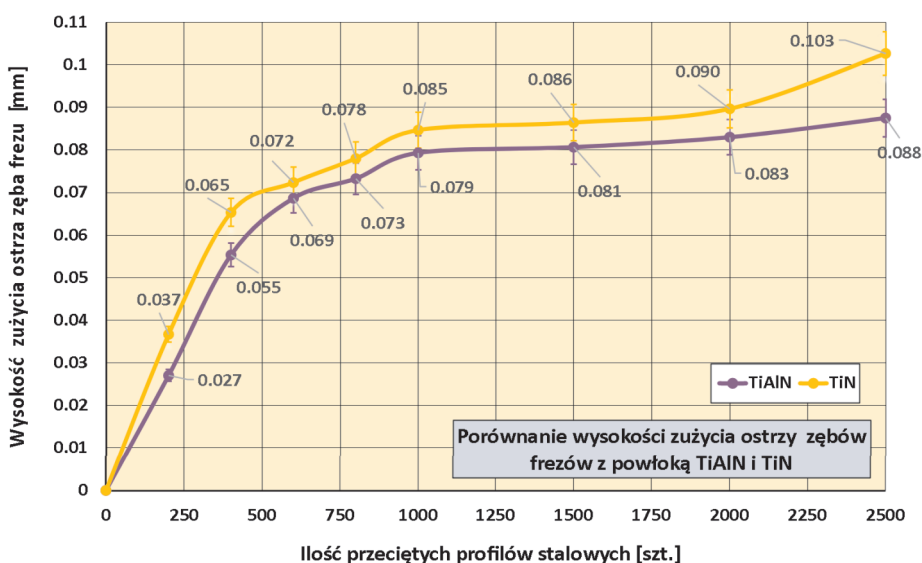
Wyniki badań pokazały, że po długotrwałych testach cięcia profili stalowych (2500 sztuk) wartości wskaźnika zużycia ostrzy VB frezów o optymalnych kątach ostrza były niewielkie i wynosiły około 0,088 mm dla frezów z powłoką TiAlN, natomiast dla frezów z powłoką TiN – około 0,103 mm. Są to wartości dużo mniejsze od dopuszczalnej wartości

Tabela. 1. Wyniki pomiarów wysokości zużycia ostrzy zębów frezów tarczowych (po cięciu 200 profili)

| Lp. | Powłoka | Kąt natarcia [γ°] | Kąt przyłożenia [α] | Śr. wysokość zużycia [mm] |
|-----|---------|-------------------|---------------------|---------------------------|
| 1   | TiAlN   | 15                | 8                   | 0,041                     |
| 2   | TiAlN   | 18                | 12                  | 0,046                     |
| 3   | TiAlN   | 15                | 6                   | 0,086                     |
| 4   | TiAlN   | 10                | 6                   | 0,101                     |
| 5   | TiAlN   | 20                | 12                  | 0,117                     |
| 6   | TiAlN   | 18                | 10                  | 0,128                     |
| 7   | TiAlN   | 12                | 8                   | 0,156                     |



Rys. 11. Wskaźnik zużycia VB (wysokość zużycia) dla różnych kątów natarcia i przyłożenia zębów frezu po cięciu 200 profili stalowych



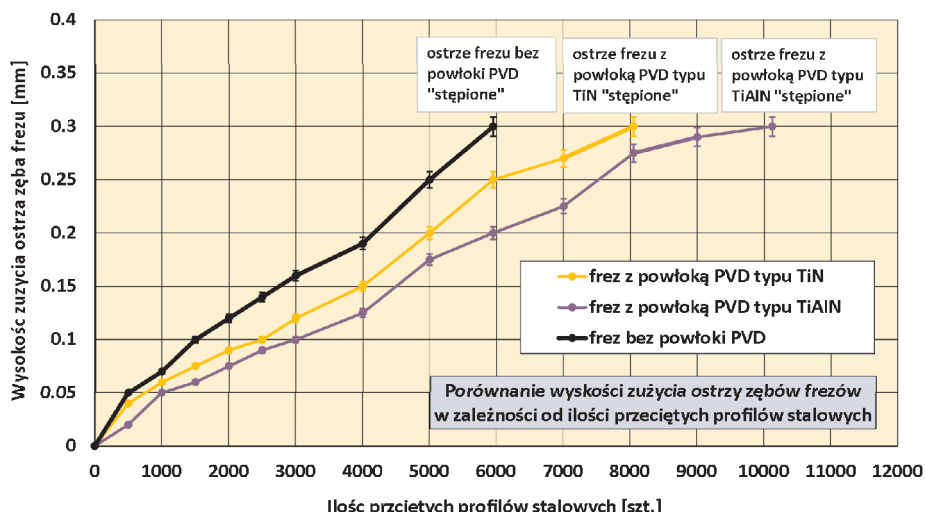
Rys. 12. Porównanie wysokości zużycia ostrzy frezów tarczowych z powłokami TiAlN i TiN po długotrwałych testach cięcia profili stalowych

zużycia dla tego typu frezów wynoszącej 0,3 mm. Mniejszą wysokość zużycia zębów zaobserwowano dla frezu z powłoką TiAlN w całym zakresie pomiarowym, a po cięciu 2500 profilów zużycie ostrza było większe o około 15% w porównaniu do zębów frezów z TiN. W związku z tym frezy z warstwami TiAlN pozwalają na przecinanie dużo większej liczby profilów do momentu ich stępienia i poddania ich ponownej regeneracji.

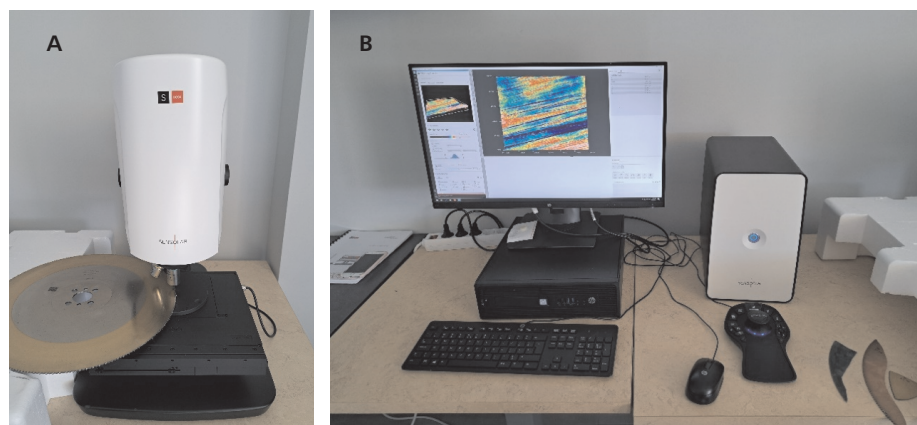
### Ocena chropowatości powierzchni ostrza frezów

Do pomiaru parametrów stereometrycznych powierzchni bocznej frezów z powłokami PVD, przed i po etapie cięcia profili stalowych, zastosowano profilometr optyczny firmy Sensofar Metrology, model S neox, z wykorzystaniem modułu konfokalnego i obiektywu o powiększeniu  $\times 20$ . Badania wykonano w Instytucie Inżynierii Materiałowej Politechniki Łódzkiej. Do akwizycji danych użyto oprogramowania komputerowego SensoView. Widok stanowiska pomiarowego przedstawiono na rysunku 14, natomiast wyniki pomiaru na rysunkach 15 ÷ 18 [12].

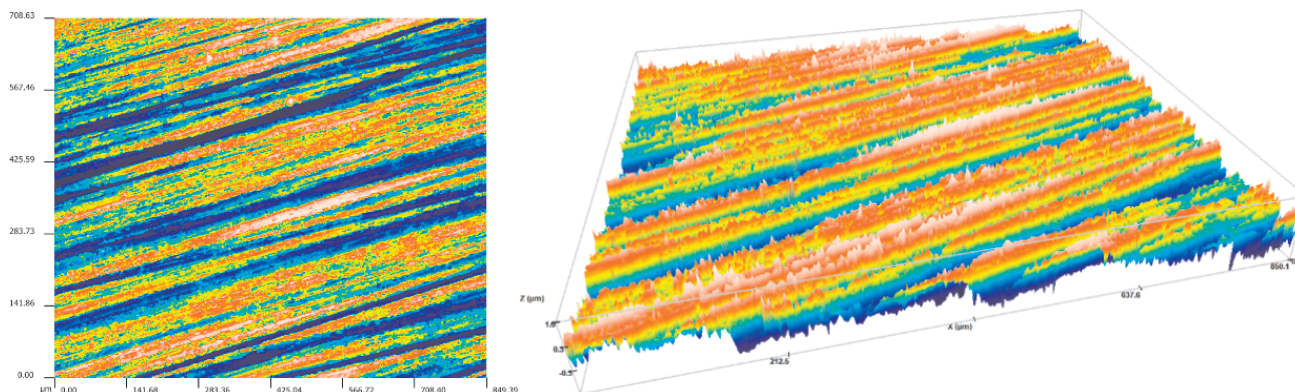
Profilogram powierzchni bocznej frezów „ostrych” (rys. 15, 17) charakteryzuje się prostoliniowym zarysem CPS na całej szerokości profilu. Profilogram frezów „stępienych” (rys. 16, 18) charakteryzuje się natomiast różnymi strefami jej zużycia w procesie długotrwałych prób ciecienia profili stalowych.



Rys. 13. Porównanie zużycia zębów frezów tarczowych z powłokami PVD typu TiAlN, TiN i bez powłoki PVD po długotrwałych testach ciecienia profili (do osiągnięcia kryterium stępienia)

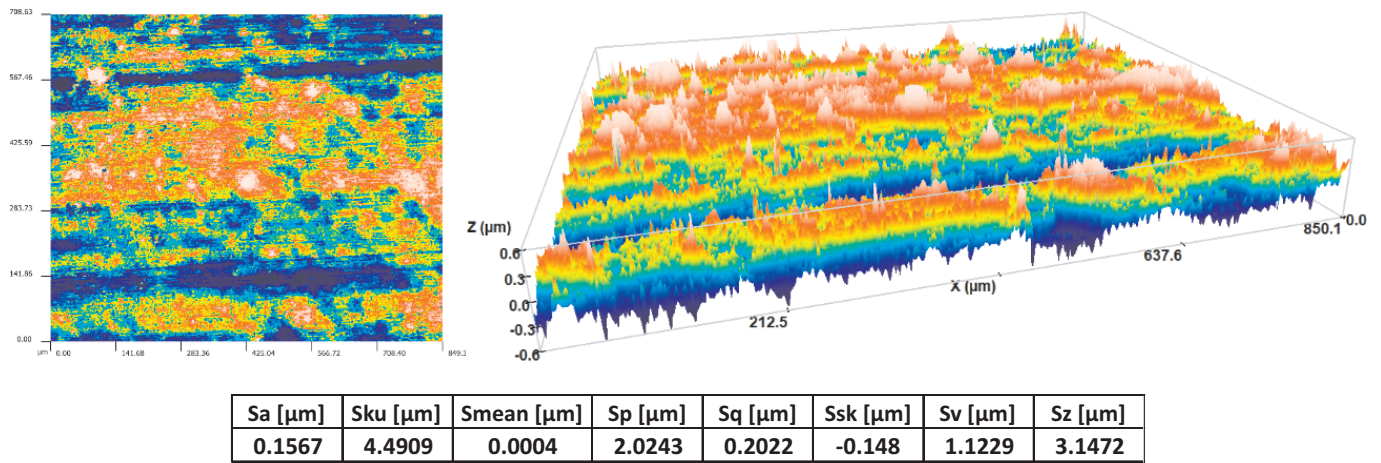


Rys. 14. Profilometr optyczny Sensofar Metrology: a) kolumna pomiarowa wraz z obiektywami, b) komputer wraz z oprogramowaniem SensoView

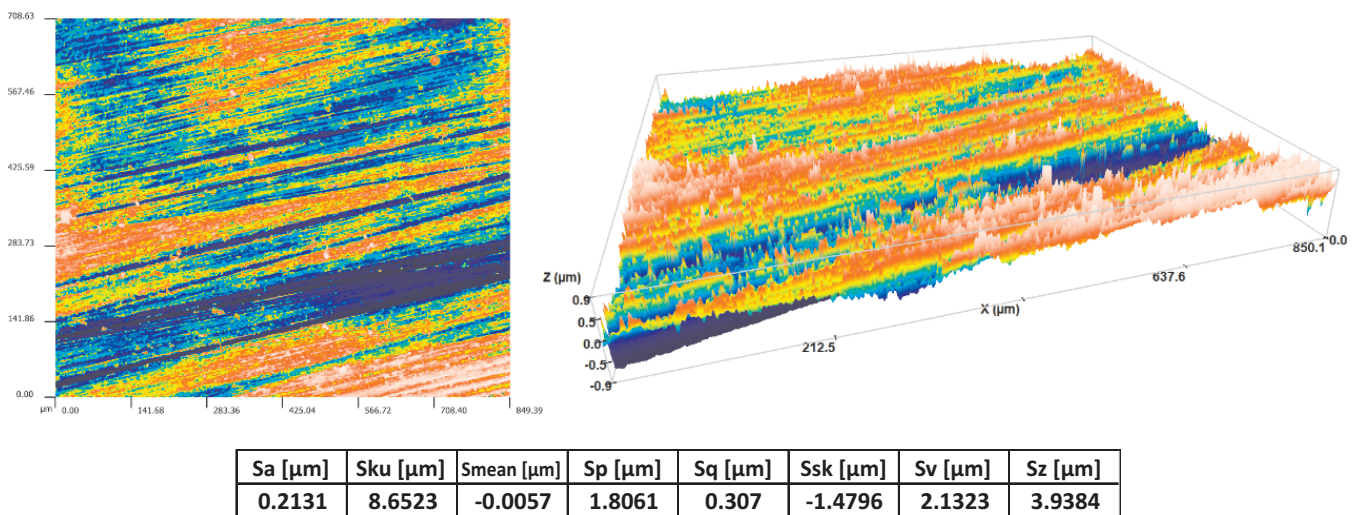


| Sa [μm] | Sku [μm] | Smean [μm] | Sp [μm] | Sq [μm] | Ssk [μm] | Sv [μm] | Sz [μm] |
|---------|----------|------------|---------|---------|----------|---------|---------|
| 0.2588  | 3.228    | -0.0001    | 1.2694  | 0.3226  | -0.6192  | 1.8388  | 3.1083  |

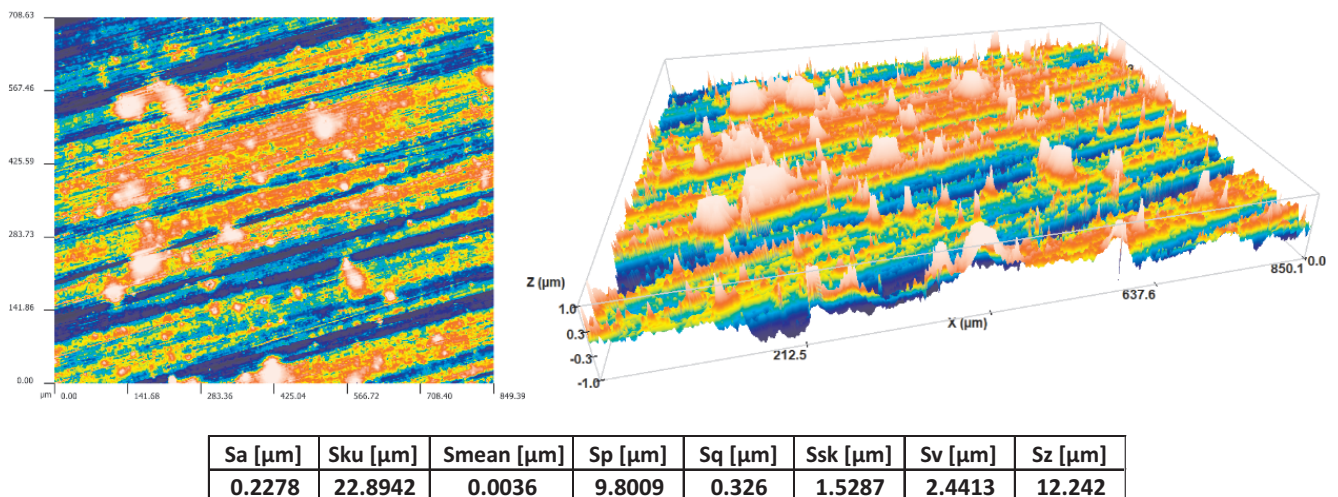
Rys. 15. Morfologia i parametry chropowatości powierzchni bocznej „nowego” frezu z powłoką TiAlN



Rys. 16. Morfologia i parametry chropowatości powierzchni bocznej „stępionego” frezu z powłoką TiAlN (po cięciu 2500 sztuk profilów)



Rys. 17. Morfologia i parametry chropowatości powierzchni bocznej „nowego” frezu z powłoką TiN

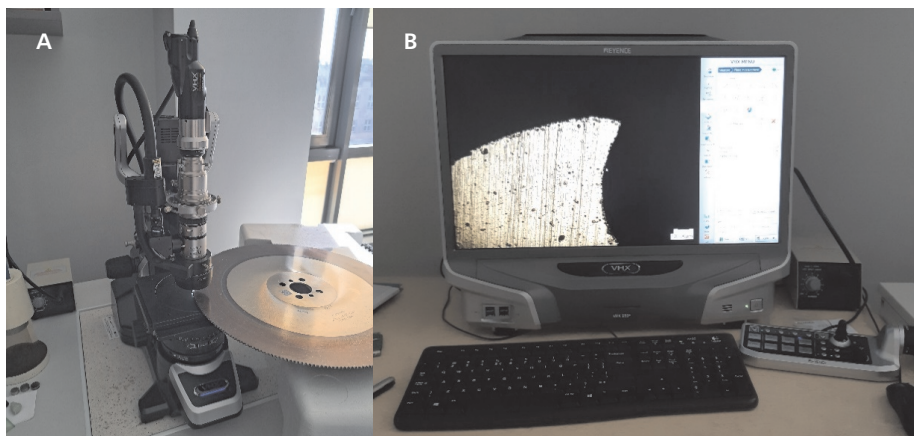


Rys. 18. Morfologia i parametry chropowatości powierzchni bocznej „stępionego” frezu z powłoką TiN (po cięciu 2500 sztuk profilów)

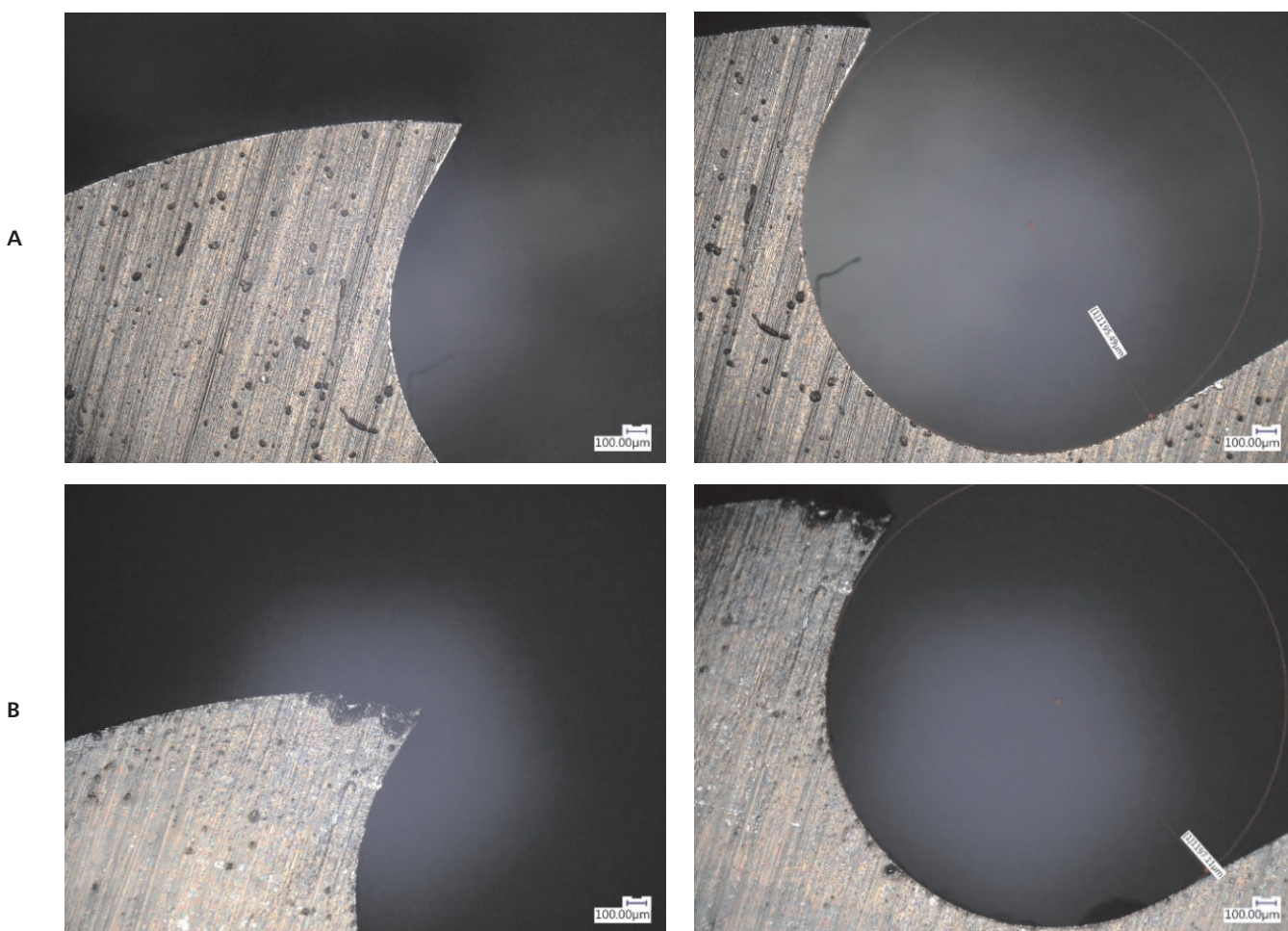
## Ocena morfologii powierzchni i zużycia ostrzy frezów

Do badań morfologii powierzchni i pomiaru stopnia zużycia ostrzy frezów zastosowano mikroskop cyfrowy firmy Keyence, model VHX-950F. Obserwacji dokonano przy powiększeniu  $\times 100$ . Badania wykonano w Instytucie Inżynierii Materiałowej Politechniki Łódzkiej. Widok stanowiska pomiarowego przedstawiono na rysunku 19, natomiast wyniki pomiaru na rysunkach 20÷21.

Analiza obrazów mikroskopowych zarysu ostrzy frezów „stępijonych” po długo-



Rys. 19. Mikroskop cyfrowy firmy Keyence: a) kolumna pomiarowa wraz z obiektywami, b) komputer



Rys. 20. Zdjęcia mikroskopowe zębów frezu z warstwą TiAlN (powiększenie  $\times 100$ ): a) frez „nowy”, b) frez „stępijony”

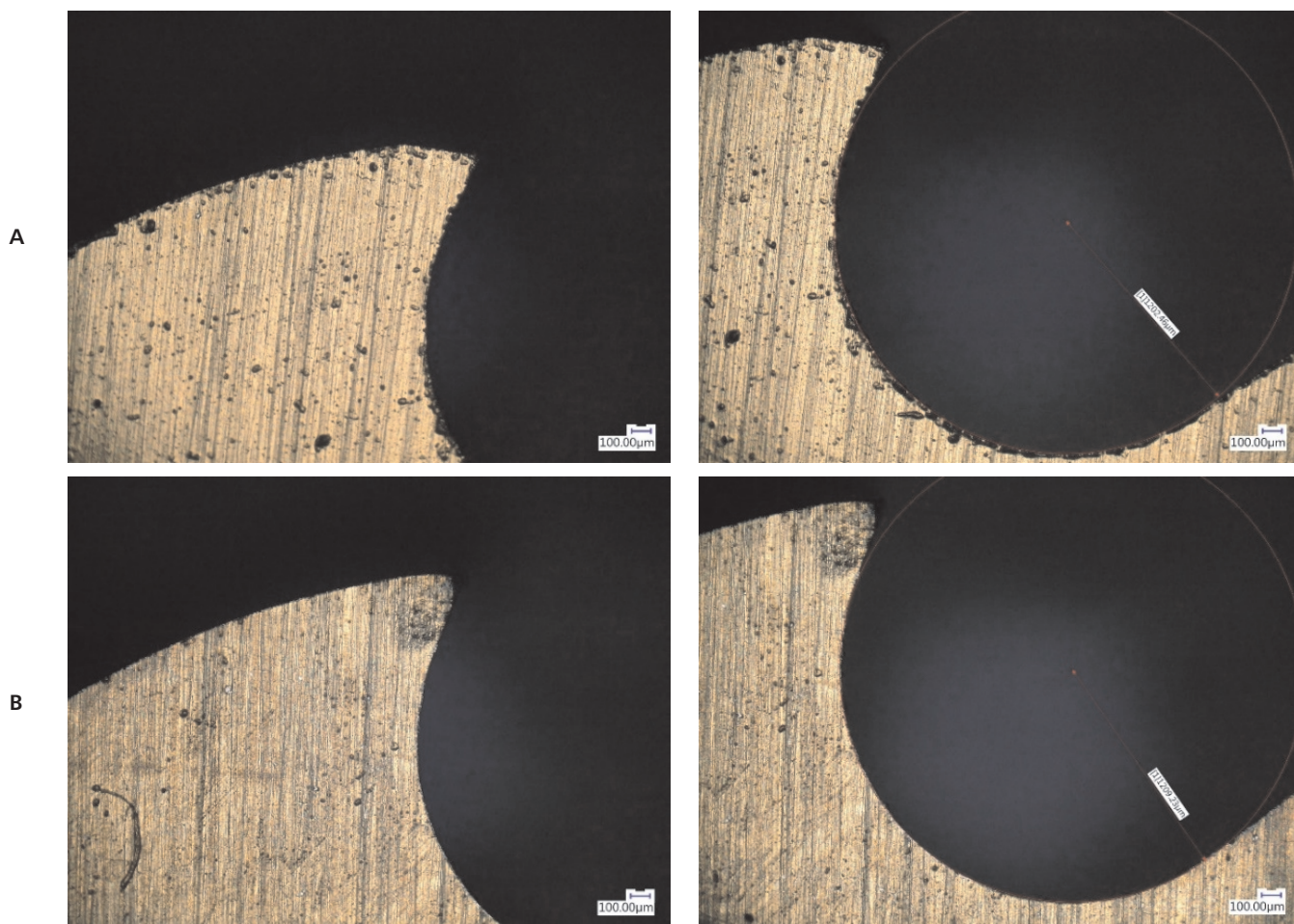
trwałych próbach cięcia profili stalowych (rys. 20b, 21b), ujawniła wyraźne ślady ich zużycia na wierzchołku ostrza w formie mikrowykruszeń, szczególnie na powierzchni przyłożenia ostrza w po-

równaniu do ostrzy frezów „nowych” (rys. 20a, 21a).

Te różnice potwierdzają postępujące zużycie frezów oraz wykruszenie i tępie-

nie krawędzi ostrzy zębów wskutek długotrwałego procesu cięcia stali. Obrazy mikroskopowe potwierdziły także brak występowania zjawiska zalepiania zębów frezów produktami cięcia.





Rys. 21. Porównanie obrazów zużycia wierzchołka i bocznej powierzchni przyłożenia ostrza frezu z powłoką TiN: a) frez „nowy”, b) frez „stępiony” (zdjęcia mikroskopowe, powiększenie x100)

## PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania potwierdziły skuteczność regeneracji właściwości skrawnych ostrzy skrawających frezów z supertwrdymi warstwami PVD w procesie ich szlifowania z zastosowaniem supertwardej ściernicy CBN.

Obiektywną ocenę kształtowania właściwości skrawnych ostrzy skrawających frezów tarczowych, zapewnia dwuetapowa metoda ich tępienia, którą określono optymalne kąty przyłożenia i natarcia zębów frezów.

Wyniki badań pokazały, że po długotrwałych testach cięcia profiliów stałowych wydajność cięcia frezów z powłokami TiAlN była o około 70% większa, a z powłokami TiN o około 35% większa od wydajności cięcia frezami bez powłok PVD.

Uzyskane wyniki badań pozwoliły na aplikację opracowanej technologii ostrzenia frezów tarczowych do warunków przemysłowych w firmie MFO S.A. w Sochaczewie.

## LITERATURA

- Cichosz P.: Narzędzia skrawające. WNT, Warszawa 2013.
- Gołąbczak A., Konstantynowicz A., Gołąbczak M.: Comparative Analysis of the Surface Roughness Parameters Due to the Machining Uniformity. Defect And Diffusion Forum, Vol. 367, 2016, pp. 25-33.
- Gołąbczak M., Jacquet P., Nouveau C., Fliti R.: Low Friction MoS<sub>2</sub>TiW Coatings Manufactured on X38CrMoV5-1 Steel Using PVD Method. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, Vol. 44, No. 5/2013, pp. 395-402.
- Gołąbczak M., Jacquet P., Nouveau C., Fliti R.: Tribological Investigations of TiC+a-C:H Coatings Manufactured on X38CrMoV5-1 Steel Using PVD Technology. Defect and Diffusion Forum, Vol. 334-335, 2013, pp. 97-104.
- Gołąbczak M., Niedzielski P.: Zastosowanie metody RF PCVD do zwiększenia trwałości frezów piłkowych. Mechanik, nr 7/1996, s. 332-333.
- Grzesik W.: Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych. WNT, Warszawa 2010.
- Guo Shuiliang, Gu Lizhi, Han Jiaxing, Zhong Chen: Parameter Comparison and Performance Analysis of New Cold Saw Blade Milling Cutter and Traditional Saw Blade Milling Cutter. Tool Technology, Vol. 52, 2018, pp. 71-76.
- Guo Shuiliang, Gu Lizhi, Song Jinling: Experimental Research on Milling Temperature of New Cold Saw Blade Milling Cutter. Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1605, 2020.
- Jemielniak K.: Obróbka skrawaniem. Oficyna Wydawnicza PWN, Warszawa 2018.
- Król R.: Optymalizacja kształtu zębów pił taśmowych. Mechanik, nr 3/2015, str. 7-15.
- Zaleski K., Matuszak J.: Podstawy obróbki ubytkowej. Wydawnictwo PL, Lublin 2016.
- Zawada-Tomkiewicz A., Zieliński K., Żurawski Ł.: Analiza mechanizmów zużycia ostrzy piły tarczowej. Mechanik, nr 10/2018, s. 892-894.