

Krzysztof NADOLNY^{1*}
Krzysztof ROKOSZ¹
Wojciech KAPŁONEK¹
Marion WIENECKE²
Jan HEEG²

ANALIZA SEM-EDS STANU CZYNNEJ POWIERZCHNI ŚCIERNICY IMPREGNOWANEJ WĘGLEM AMORFICZNYM PO PROCESIE SZLIFOWANIA PROSTOLINIOWO-ZWROTNEGO WALCOWYCH POWIERZCHNI WEWNĘTRZNYCH ZE STOPU TITANIUM GRADE 2

W artykule dokonano szczegółowej analizy stanu ściernicy impregnowanej nowym typem impregnatu (węglem amorficznym) po procesie szlifowania prostoliniowo-zwrotnego walcowych powierzchni wewnętrznych wykonanych ze stopu Titanium Grade 2. W celu dokładnej identyfikacji śladów zużycia takiej ściernicy wywołanego szlifowaniem przeprowadzono analizy z użyciem elektronowej mikroskopii skaningowej (SEM – ang. *Scanning Electron Microscopy*) i spektroskopii dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego (EDS – ang. *Energy-dispersive X-ray Spectroscopy*). Podczas badań eksperymentalnych zastosowano nowoczesną aparaturę obserwacyjno-pomiarową, w której skład wchodziły dwa elektronowe mikroskopy skaningowe JSM-5500LV firmy JEOL Ltd., Japonia i stacja robocza Auriga CrossBeam firmy Carl Zeiss Microscopy GmbH, Niemcy oraz zaawansowany detektor EDS Octane plus firmy EDAX, Inc., USA. Przeprowadzone analizy SEM-EDS pozwoliły na określenie udziału procentowego oraz kształtu i rozmieszczenia zalepień będących skutkiem adhezji wiórów Ti do czynnej powierzchni ściernicy oraz określenie udziału na niej substancji impregnującej (węgla amorficznego) po procesie szlifowania.

1. WPROWADZENIE

W procesach szlifowania wyróżnić można szereg zjawisk zużycia składników czynnej powierzchni ściernicy (CPS), takich jak [12]:

- zużycie ściernic wierzchołków aktywnych ziaren ścierniczych,
- zużycie ściernic spoiwa w miejscach kontaktu z materiałem obrabianym,
- zużycie wytrzymałościowe ziaren ścierniczych pod wpływem obciążeń mechanicznych i cieplnych,
- zużycie wytrzymałościowe mostków spoiwa,

¹ Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Produkcji, Koszalin

² Institut für Oberflächen- und Dünnschichttechnik, Fachbereich Elektrotechnik und Informatik, Hochschule Wismar

* E-mail: krzysztof.nadolny@tu.koszalin.pl

- zużycie wytrzymałościowe na granicy faz pomiędzy ziarnem ściernym a mostkiem spoiwa,
- zalepianie wierzchołków ziaren i przestrzeni międzyziarnowych materiałem obrabianym.

Istnieje jednak grupa procesów obróbki ścierniej, w której dominuje zalepianie CPS. Są to w szczególności procesy szlifowania materiałów trudno skrawalnych, np. tzw. stopów lotniczych (stopów niklu, magnezu, tytanu), stopów metali lekkich (stopów aluminium) oraz stali wysokostopowych [20],[21]. Materiały te charakteryzują się długimi ciągliwymi wiórami, które przylegają do CPS i powodują jej szybkie zalepianie. W rezultacie o zużyciu ściernicy nie decyduje stępienie ziaren ściernych a wielkość i udział zalepień na jej czynnej powierzchni. Skutkuje to niewykorzystaniem potencjału skrawnego ziaren ściernych i częstymi zabiegami kondycjonowania CPS. Powoduje to znaczące wydłużenie czasu realizacji operacji szlifowania oraz zwiększenie ich kosztów związanych z narzędziem, jak również z obciążaczami.

Istnieje kilka metod ograniczenia zjawiska zalepiania CPS. Do najważniejszych z nich należy zaliczyć:

- stosowanie ściernic wielkoporowych, których powiększone przestrzenie międzyziarnowe ułatwiają transport wiórów ze strefy szlifowania oraz doprowadzenie płynu chłodząco-smarującego (PCS) do strefy styku CPS z powierzchnią szlifowaną [4],[11],
- regenerację (oczyszczanie z zalepień) CPS z użyciem wysokociśnieniowej strugi wodnej [3],[14],
- impregnację ściernic substancjami chemicznymi czynnie wpływającymi na warunki w strefie szlifowania – głównie substancjami antyadhezyjnymi i smarnymi [2].

Niniejszy artykuł dotyczy ostatniego z wymienionych kierunków rozwoju procesów szlifowania materiałów trudno skrawalnych. Ściernice impregnowane siarką stosowane były już w latach 20. XX wieku, przy czym głównym celem wprowadzania do objętości ściernicy substancji impregnujących było przede wszystkim wzmocnienie struktury ściernicy i ograniczenie zjawiska zużycia kształtowego [5],[6],[9]. Aspekt ten jest do dzisiaj bardzo ważny głównie w procesach szlifowania kształtowego ściernicami, których zarys profilu CPS odwzorowywany jest na powierzchni przedmiotu obrabianego. Znane są również przykłady wprowadzania impregnatu w postaci grafitu, jako substancji smarnej w stanie stałym, która ma wpływać na warunki tribologiczne w strefie kontaktu aktywnych wierzchołków ziaren ściernych z powierzchnią obrabianą [10]. Mimo, że idea impregnowania ściernic nie jest nowa, to nadal wykazuje duży potencjał aplikacyjny, szczególnie dzięki rozwojowi w dziedzinie chemii stosowanej. W ostatnich latach coraz częściej stosowane są takie substancje smarne i antyadhezyjne jak: grafit, teflon, dwusiarczek molibdenu (MoS_2), heksagonalny azotek boru (hBN), wosk, parafina, jak również silikon, wprowadzane do objętości ściernicy metodami grawitacyjnymi lub ciśnieniowymi [5],[6],[9],[10],[13].

Na Wydziale Mechanicznym Politechniki Koszalińskiej są prowadzone badania zmierzające do określenia możliwości stosowania wymienionych substancji jako impregnatów w procesach szlifowania materiałów trudno skrawalnych, jak również badania dotyczące opracowania nowych metod ich wprowadzania do objętości ściernicy [13],[15].

W niniejszym artykule dokonano szczegółowej analizy stanu ściernicy impregnowanej nowym typem impregnatu (węglem amorficznym) po procesie szlifowania stopu Titanium Grade 2. Inna forma węgla (grafit) jest często stosowana jako smar stały w procesach szlifowania [1],[17],[18] ze względu na swoje właściwości [16]. Węgiel amorficzny, podobnie jak grafit, charakteryzuje się niską reaktywnością i może posłużyć jako substancja wpływająca aktywnie na warunki w strefie szlifowania. Przeprowadzone badania doświadczalne procesu szlifowania z użyciem ściernic impregnowanych węglem amorficznym, których wyniki opublikowano w pracy [15], wykazały korzystny wpływ na ograniczenie liczby i udziału powierzchniowego zalepień na CPS po procesie szlifowania prostoliniowo-zwrotnego walcowych powierzchni wewnętrznych ze stopu Titanium Grade 2. W celu dokładnej identyfikacji symptomów zużycia takich ściernic, wywołanego szlifowaniem, przeprowadzono analizy z użyciem elektronowej mikroskopii skaningowej (SEM – ang. *Scanning Electron Microscopy*) i spektroskopii dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego (EDS – ang. *Energy-dispersive X-ray Spectroscopy*).

2. METODYKA BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Celem przeprowadzonych badań była precyzyjna identyfikacja pierwiastków chemicznych oraz ich udziału i rozmieszczenia na czynnej powierzchni ściernicy impregnowanej węglem amorficznym po procesie szlifowania prostoliniowo-zwrotnego walcowych powierzchni wewnętrznych wykonanych ze stopu Titanium Grade 2. Analizy takie pozwalają na identyfikację śladów zużycia obserwowanych na CPS np. z użyciem technik mikroskopii optycznej lub elektronowej. W rezultacie możliwa jest jednoznaczna analiza wpływu zjawisk elementarnych zużycia na stan składników ściernicy (ziaren ściernych, spoiwa oraz wolnych przestrzeni międzyziarnowych).

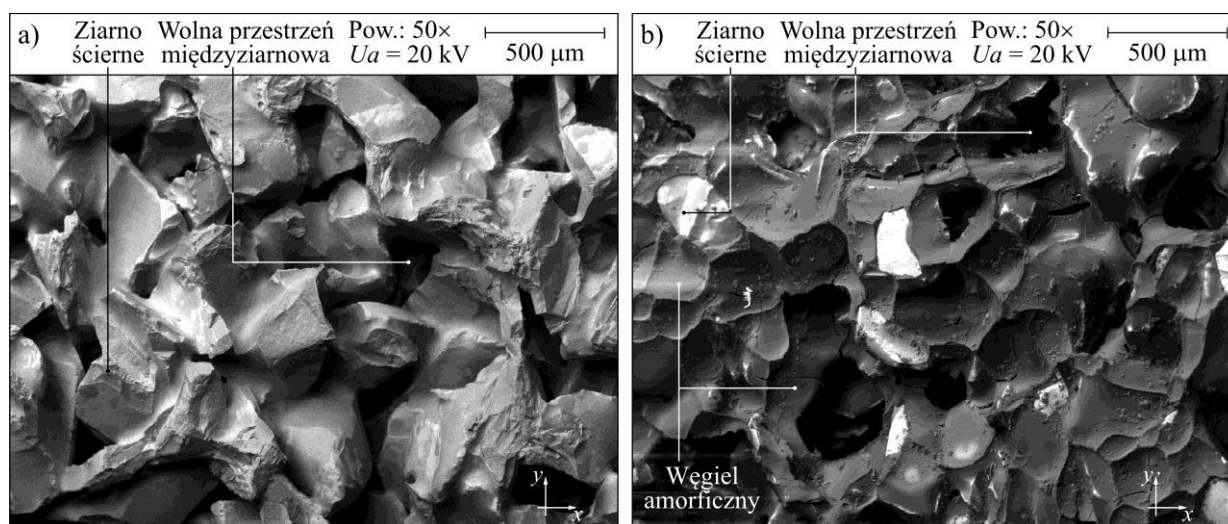
2.1. ŚCIERNICE IMPREGNOWANE

W badaniach zastosowano ściernice typu 1 zbudowane z ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekane o numerze 46 i spoiwa szklanokrystalicznego [7],[8]. W tabeli 1 przedstawiono szczegółową charakterystykę techniczną użytych ściernic.

Tabela 1. Charakterystyka techniczna ściernic zastosowanych w badaniach
Table 1. Description of grinding wheel used in experiments

Oznaczenie techniczne	1-35×10×10-SG/F46G10VTO		
Typ ściernicy	1 – ściernica płaska		
Wymiary	Średnica zewnętrzna: $d_s = 35$ mm, szerokość: $b_s = 10$ mm, średnica wewnętrzna (otworu): $h_s = 10$ mm		
Gatunek ziaren ściernych	Mikrokrystaliczny korund spiekany typu SG TM produkcji firmy Norton (USA)		
Spoiwo	Ceramiczne (szklanokrystaliczne)		
Numer ziarna ściernego	46	Objętość ziaren ściernych (V_g)	42,0%
Klasa twardości	G	Objętość spoiwa (V_b)	11,5%
Nr struktury	10	Objętość porów (V_p)	46,5%

Ściernice zostały poddane procesowi impregnacji z użyciem węgla amorficznego. Węgiel został wprowadzony do objętości ściernic poprzez termiczny rozkład związków organicznych (w tym przypadku węglowodanów), zgodnie z autorską metodą opisaną w zgłoszeniu patentowym do Urzędu Patentowego RP nr P. 395441 [19]. Na rysunku 1 przedstawiono obrazy mikroskopowe SEM czynnej powierzchni użytych ściernic przed (rys. 1a) i po procesie impregnacji węglem amorficznym (rys. 1b).



Rys. 1. Obrazy SEM czynnej powierzchni ściernicy przed (a) i po impregnacji węglem amorficznym (b)
Fig. 1. SEM-micrographs of the grinding wheel active surface before (a) and after the impregnation by amorphous carbon (b)

2.2. PRZEDMIOT OBRABIANY

Proces szlifowania poprzedzający ocenę stanu CPS przeprowadzono z użyciem stopu Titanium Grade 2 jako materiału obrabianego. Stop ten należy do grupy tzw. materiałów trudno skrawalnych i jest najbardziej rozpowszechnionym gatunkiem tytanu. Jest wysoce odporny na korozję, doskonale spawalny, nie traci swojej struktury α po obróbce cieplnej. Znajduje zastosowanie w konstrukcjach platform wiertniczych, urządzeniach przemysłu chemicznego oraz w produkcji różnego rodzaju aparatury. W tabeli 2 przedstawiono skład chemiczny materiału obrabianego. Szlifowano powierzchnie wewnętrzne pierścieni wykonanych ze stopu Titanium Grade 2 o średnicy wewnętrznej $d_w = 56$ mm i szerokości $b_w = 20$ mm.

Tabela 2. Skład chemiczny stopu Titanium Grade 2
Table 2. Chemical composition of the Titanium Grade 2 alloy

Materiał	Nr materiału	Norma	Skład chemiczny i udział procentowy pierwiastków
Titanium Grade 2	3.7035	UNS R50400 ASTM B861	C(0,08)+Fe(0,25)+O(0,25 max)+Ni(0,03)+ H(0,015 max)+Ti(reszta)

2.3. WARUNKI PROCESU SZLIFOWANIA

Proces prostoliniowo-zwrotnego szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych zrealizowano z użyciem stanowiska badawczego wyposażonego w szlifierkę uniwersalną do wałków i otworów typu RUP 28P (produkcji Zakładów Mechanicznych Tarnów SA, Polska), którą wyposażono dodatkowo w szybkoobrotowe elektrowrzeciono ściernicy typu EV-70/70-2WB (produkcji firmy Fisher, Szwajcaria). Szczegółową charakterystykę warunków przeprowadzonych prób szlifowania zamieszczono w tabeli 3.

Tabela 3. Warunki szlifowania
Table 3. Grinding conditions

Proces szlifowania	Prostoliniowo-zwrotne, obwodowe szlifowanie walcowych powierzchni walcowych
Szlifierka	Szlifierka uniwersalna (do wałków i otworów) typu RUP 28P produkcji Zakładów Mechanicznych Tarnów SA (Polska), wyposażona w szybkoobrotowe elektrowrzeciono ściernicy typu EV-70/70-2WB produkcji firmy Fisher (Szwajcaria) – maksymalna prędkość obrotowa: $60\,000\text{ min}^{-1}$, moc: 5,2 kW
Ściernica	1-35×10×10-SG/F46G10VTO
Parametry obciążania ściernicy	Obciążacz: jednoziarnisty obciążacz diamentowy o masie: $Q_d = 1,25\text{ kt}$ Prędkość obrotowa ściernicy podczas obciążania: $n_{sd} = 10\,000\text{ min}^{-1}$ Nadatek w trakcie obciążania: $a_d = 0,0125\text{ mm}$ Prędkość posuwu osiowego stołu podczas obciążania: $v_{fd} = 10\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ Liczba przejść obciążających: $i_d = 6$
Parametry szlifowania	Prędkość obwodowa ściernicy: $v_s = 18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ Prędkość posuwu osiowego stołu: $v_{fa} = 20\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ Całkowity nadatek obróbkowy (styk roboczy): $a_{e\text{ calk}} = 0,15\text{ mm}$ Prędkość obwodowa przedmiotu obrabianego: $v_w = 1,1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ Czas szlifowania: $t_g = 90\text{ s}$ (dla jednego otworu) Wydatek PCS: $Q_{PCS} = 4,0\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$
PCS	5% roztwór wodny oleju Castrol Syntilo RHS podawany metodą zalewową
Przedmiot obrabiany	Wewnętrzne powierzchnie walcowe pierścieni wykonanych ze stopu Titanium Grade 2, średnica wewnętrzna: $d_w = 56\text{ mm}$, szerokość: $b_w = 20\text{ mm}$

2.4. SYSTEMY POMIAROWE

Podczas badań eksperymentalnych zastosowano nowoczesną aparaturę obserwacyjno-pomiarową, w której skład wchodziły dwa elektronowe mikroskopy skaningowe oraz zaawansowany detektor EDS. Obserwacje CPS 10×10-SG/F46G10VTO przed i po procesie impregnacji węglem amorficznym dokonywane były z wykorzystaniem elektronowego mikroskopu skaningowego JSM-5500LV firmy JEOL Ltd. (Japonia). Urządzenie, wyposażone w zestaw typowych detektorów: wtórnych SE (ang. *secondary electron*) i wstecznie rozproszonych BSE (ang. *backscattered electron*), pozwalało na obrazowanie powierzchni próbek w zakresie powiększeń od $18\times$ do $300\,000\times$, przy napięciach przyspieszających U_a w zakresie od 0,5 do 30 kV. Komora próżniowa mikroskopu umożliwia pracę w zakresie ciśnień P od 10 do 270 Pa. Uzyskiwane rozdzielczości były

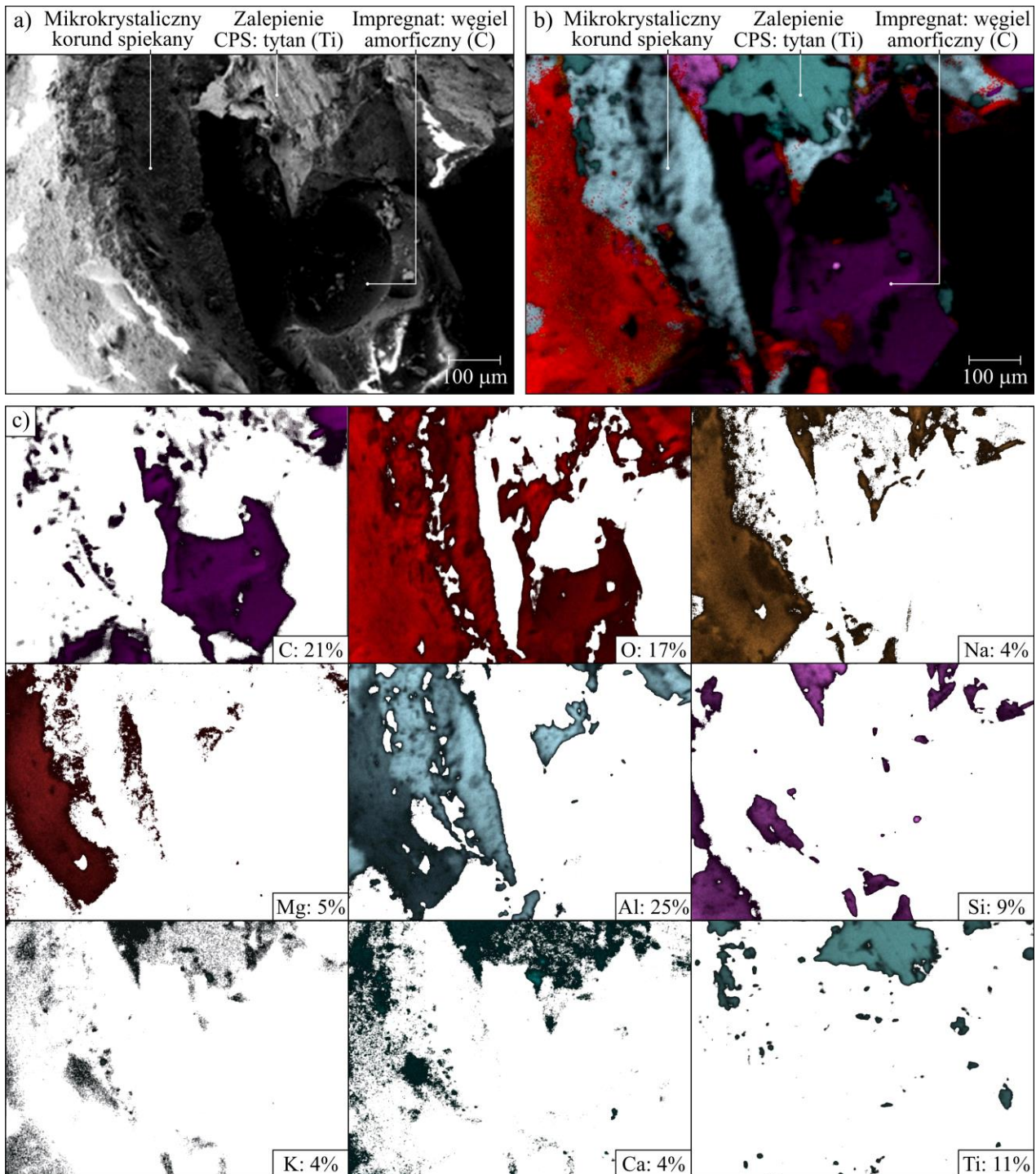
następujące: 4 nm dla SE (w trybie wysokiej próżni, przy $U_a = 30$ kV) oraz 5 nm dla BEI (w trybie niskiej próżni, przy $U_a = 30$ kV). Obrazowanie, pomiary i proste przetwarzanie obrazów odbywało się za pomocą dedykowanego oprogramowania firmy JEOL.

Znacznie bardziej zaawansowanym urządzeniem była stacja robocza Auriga CrossBeam firmy Carl Zeiss Microscopy GmbH (Niemcy) będąca połączeniem mikroskopu z działem elektronowym typu Schotky'ego z emisją polową (kolumna typu GEMINI) oraz układu FIB (ang. *Focused Ion Beam*) z działem jonowym (kolumna typu Cobra). Mikroskop zapewniał zakres powiększeń od $12\times$ do $1\,000\,000\times$, przy napięciach przyspieszających U_a w zakresie od 0,1 do 30 kV. Osiągane rozdzielczości były wyższe niż w przypadku mikroskopu JSM-5500LV i wynosiły (dla obrazowania SEM): 1 nm, przy $U_a = 15$ kV i 1,9 nm, przy $U_a = 1$ kV. Próbkę przeznaczoną do obserwacji mocowano w komorze próżniowej mikroskopu na zmotoryzowanym 6-osiowym stoliku pomiarowym. Sterowanie urządzeniem oraz przetwarzanie obrazów realizowano za pomocą oprogramowania SmartSEM dostarczonego przez producenta. Modułowa konfiguracja systemu pozwalała na dostosowanie go do aktualnego programu badań. W tym celu istniała możliwość przyłączenia do portów komory próżniowej mikroskopu szeregu urządzeń zewnętrznych. W konfiguracji wykorzystywanej w badaniach eksperymentalnych prowadzonych przez autorów mniejszej pracy zastosowano detektor EDS serii SDD (ang. *Silicon Drift Detector*) ze zintegrowanym przedwzmacniaczem Octane plus firmy EDAX, Inc. (USA). Urządzenie charakteryzowało się stosunkowo dużą powierzchnią aktywną wynoszącą 100 mm^2 , liczbą zliczeń na wejściu/wyjściu wynoszącą 1,6 Mcps/800 kcps oraz rozdzielczością 123 eV. Analizy widm oraz mikroanaliza EDS przeprowadzana była z pomocą zaawansowanego oprogramowania TEAM dostarczonego przez producenta.

3. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

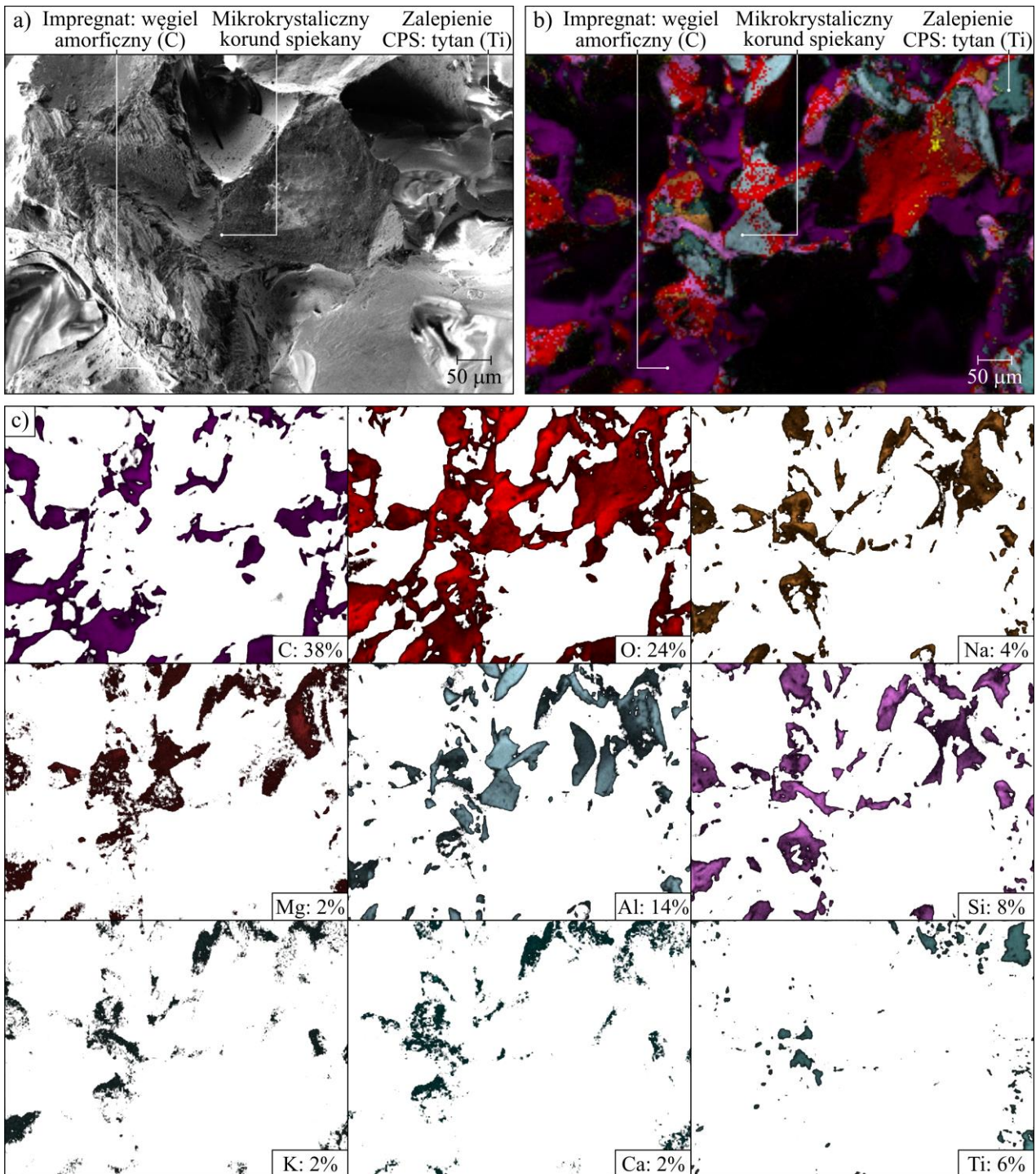
Wyniki badań doświadczalnych szlifowania dotyczące chropowatości powierzchni obrobionej, mocy szlifowania oraz analizy udziału powierzchniowego zalepień na CPS zostały opublikowane w pracy [15]. W tym miejscu przedstawiono wyniki szczegółowych analiz fragmentów czynnej powierzchni ściernicy impregnowanej węglem amorficznym po procesie szlifowania stopu Titanium Grade 2, przeprowadzonych z użyciem elektronowej mikroskopii skaningowej i spektroskopii dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego (SEM-EDS). Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono wyniki analizy przeprowadzonej dla dwóch wydzielonych fragmentów CPS, określonych jako obszar nr 1 (rys. 2) i obszar nr 2 (rys. 3).

Uzyskane wyniki analiz SEM-EDS (rys. 2 i 3) wskazują, że na czynnej powierzchni analizowanej ściernicy znajdują się wyraźne ślady zużycia w postaci mikrozalepień materiałem obrabianym (Ti) na wierzchołkach aktywnych ziaren ściernych. W przypadku analizy obszaru nr 1 (rys. 2) zalepienie jest bardziej rozległe i umiejscowione jest na wierzchołku stępionego ziarna ściernego, w odróżnieniu do powierzchni obszaru nr 2 (rys. 3), na którym zidentyfikowano większą liczbę mikrozalepień rozproszonych równomiernie na analizowanej CPS. Przeprowadzone analizy EDS wykazały również poza zalepieniami Ti wióry materiału obrabianego pozostałe w przestrzeniach międzyziarnowych. Są one szczególnie widoczne w wynikach analizy obszaru nr 1 (rys. 2c).



Rys. 2. Wybrane rezultaty analiz uzyskane z czynnej powierzchni ściernicy impregnowanej węglem amorficznym po procesie szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych w stopie Titanium Grade 2 (obszar nr 1) uzyskane z użyciem stacji roboczej Auriga SEM-FIB CrossBeam firmy Carl Zeiss Microscopy GmbH i detektora EDS Octane plus firmy EDAX, Inc.: a) obraz SEM (rozmiar: 0,95×0,59 mm, pow. 342×); b) mikroanaliza EDS – mapa pierwiastków na CPS; c) rozmieszczenie poszczególnych pierwiastków na CPS i ich udział procentowy

Fig. 2. Selected results obtained for the amorphous carbon impregnated grinding wheel active surface after the reciprocal internal cylindrical grinding of Titanium Grade 2 alloy (Area no. 1) by the use of Auriga SEM-FIB CrossBeam workstation produced by Carl Zeiss Microscopy GmbH and Octane plus EDS detector produced by EDAX, Inc.: a) SEM micrograph (size: 0.95×0.59 mm, mag. 342×); b) microanalysis EDS – elements map on the grinding wheel active surface; c) location of elements and their percentage on the grinding wheel active surface



Rys. 3. Wybrane rezultaty analiz uzyskane z czynnej powierzchni ściernicy impregnowanej węglem amorficznym po procesie szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych w stopie Titanium Grade 2 (obszar nr 2) uzyskane z użyciem stacji roboczej Auriga SEM-FIB CrossBeam firmy Carl Zeiss Microscopy GmbH i detektora EDS Octane plus firmy EDAX, Inc.: a) obraz SEM (rozmiar: 0,71×0,45 mm, pow. 296×); b) mikroanaliza EDS – mapa pierwiastków na CPS; c) rozmieszczenie poszczególnych pierwiastków na CPS i ich udział procentowy

Fig. 3. Selected results obtained for the amorphous carbon impregnated grinding wheel active surface after the reciprocal internal cylindrical grinding of Titanium Grade 2 alloy (Area no. 2) by the use of Auriga SEM-FIB CrossBeam workstation produced by Carl Zeiss Microscopy GmbH and Octane plus EDS detector produced by EDAX, Inc.: a) SEM micrograph (size: 0.71×0.45 mm, mag. 296×); b) microanalysis EDS – elements map on the grinding wheel active surface; c) location of elements and their percentage on the grinding wheel active surface

Istotnym aspektem uzyskanych analiz jest relatywnie nieduży udział procentowy Ti, który wynosił odpowiednio 11% i 6% dla obszaru nr 1 i nr 2 czynnej powierzchni ściernicy.

Kolejnym interesującym pierwiastkiem był węgiel. Mapa występowania C na czynnej powierzchni analizowanych obszarów CPS została przedstawiona na rys. 2c (obszar nr 1) oraz rys. 3c (obszar nr 2) kolorem ciemnofioletowym. Uzyskane wyniki analiz świadczą o tym, że na CPS po procesie szlifowania pozostaje nadal relatywnie duży udział substancji impregnującej w postaci węgla amorficznego. Dla obszaru nr 1 było to 21% (rys. 2c), a dla obszaru nr 2 aż 38% (rys. 3c), przy czym w tym drugim przypadku węgiel był rozmieszczony w sposób bardziej równomierny niż dla obszaru nr 1. Znacząca obecność C świadczy o dużej skuteczności zastosowanej metody impregnacji, która umożliwiła dotarcie węgla amorficznego do przestrzeni międzyziarnowych w całej objętości ściernicy o spoiwie ceramicznym. Równomierne rozprowadzenie impregnatu jest niezbędne dla prawidłowej eksploatacji ściernicy, zarówno ze względu na wyrównowanie narzędzia, jak również ze względu na zapewnienie udziału substancji impregnującej w procesie szlifowania również po kolejnych cyklach obciążania.

Pozostałe pierwiastki wykazane w analizie EDS reprezentują materiał ziarna ściernego zbudowanego z mikrokryształicznego korundu spiekane, oraz związków zawartych w spoiwie ceramicznym o strukturze szklanokryształicznej. Spoiwo zastosowane do budowy ściernic należy do tworzyw ceramicznych z układu CMAS ($\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$) [7],[8]. Należy podkreślić, że na ostateczny rezultat przeprowadzonej analizy wpływ miały również zanieczyszczenia będące efektem procesu szlifowania, pochodzące m.in. od PCS.

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone analizy SEM-EDS pozwoliły na jednoznaczną identyfikację rozmieszczenia pierwiastków chemicznych na wybranych dwóch obszarach czynnej powierzchni ściernicy impregnowanej węglem amorficznym po procesie szlifowania prostoliniowo-zwrotnego walcowych powierzchni wewnętrznych wykonanych ze stopu Titanium Grade 2. Umożliwiło to określenie udziału procentowego oraz kształtu i rozmieszczenia zalepień będących skutkiem adhezji wiórów Ti do CPS. Istotna była również możliwość określenia udziału substancji impregnującej (węgla amorficznego) na CPS po zakończeniu procesu szlifowania. Uzyskane wyniki analiz wykazały, że zastosowana metoda impregnacji w skuteczny sposób zapewnia obecność impregnatu w objętości ściernicy, również w kolejnych cyklach pracy narzędzia. Autorzy w kolejnych pracach planują prowadzenie analiz czynnych powierzchni ściernic, impregnowanych innymi substancjami impregnującymi, m.in. takimi jak: grafit, silikon, MoS_2 i hBN.

PODZIĘKOWANIA

Autorzy pragną podziękować prof. dr hab. inż. Daniela Herman z Zakładu Podstaw Nauki o Materiałach i Ceramiki Technicznej Wydziału Technologii i Edukacji Politechniki Koszalińskiej za wykonanie ściernic, prof. ndzw. dr. hab. Waleremu Sienickiemu i mgr. inż. Michałowi Wojtewiczowi z Zespołu Badawczo-Dydaktycznego Chemii Stosowanej

Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej za impregnację ściernic wykorzystanych w opisanych badaniach oraz Ryszardowi Gritzmanowi z Wydziału Technologii i Edukacji Politechniki Koszalińskiej za akwizycję obrazów mikroskopowych ściernicy w stanie przed i po impregnacji z użyciem mikroskopu skaningowego JSM-5500LV firmy JEOL Ltd.

LITERATURA

- [1] ALBERTS M., KALAITZIDOU K., MELKOTE S., 2009, *An investigation of graphite nanoplatelets as lubricant in grinding*, Int J Mach Tool Manu, 49/12-13, 966-970.
- [2] CHIRKOV G.V., 2007, *Characteristics of the grinding wheel impregnation processes*, Russian Engineering Research, 27, 387-389.
- [3] CHOI G.S., CHOI G.H., 1997, *Process analysis and monitoring in abrasive water jet machining of alumina ceramics*, Int J Mach Tool Manu, 37, 295-307.
- [4] DAVIS T.D., DICORLETO J., SHELDON D., VECCHIARELLI J., ERKEY C.A., 2004, *Route to highly porous grinding wheels by selective extraction of pore inducers with dense carbon dioxide*, J Supercrit Fluids, 30, 349-358.
- [5] GALLAGHER T.P., 1967, *Process for impregnating porous bodies with a solid fusible substance*, Patent 3341355, USA.
- [6] HARMANN M.L., 1927, *Abrasive article*, Patent 1615271, USA.
- [7] HERMAN D., 1998, *Glass and glass-ceramic binder obtained from waste material for binding alundum abrasive grains into grinding wheels*, Ceram Int, 24/7, 515-520.
- [8] HERMAN D., MARKUL J., 2004, *Influence of microstructures of binder and abrasive grain on selected operational properties of ceramic grinding wheels made of alumina*, Int J Mach Tool Manu, 44, 511-522.
- [9] JONES H.H., 1941, *Composition for impregnating grinding wheels*, Patent 2240302, USA.
- [10] KITAJIMA M., UNNO K., TAKEHARA H., KONO T., SOMA S., 2010, *Segmented grinding wheel and manufacturing method therefor*, Patent 2010/0261420 A1, USA.
- [11] KREMEN Z.I., 2003, *A new generation of high-porous vitrified cBN wheels*, Ind Diamond Rev, 63, 53-56.
- [12] MARINESCU I.D., ROWE W.B., DIMITROV B., INASAKI I., 2004, *Tribology of abrasive machining processes*, William Andrew, Inc., Norwich.
- [13] NADOLNY K., KAPŁONEK W., WOJTEWICZ M., SIENICKI W., 2013, *The assessment of sulfurization influence on cutting ability of the grinding wheels in internal cylindrical grinding of Titanium Grade 2*, Indian J Eng Mater S, 20, 108-124.
- [14] NADOLNY K., PLICHTA J., SUTOWSKI P., 2014, *Regeneration of the grinding wheel active surface using high-pressure hydro-jet*, J Cent South Univ T, 21, 3107-3118.
- [15] NADOLNY K., SIENICKI W., WOJTEWICZ M., 2015, *The effect upon the grinding wheel active surface condition when impregnating with non-metallic elements during internal cylindrical grinding of titanium*, Arch Civ Mech Eng, 15/1, 71-86, DOI: 10.1016/j.acme.2014.03.004.
- [16] PIERSON H.O., 1993, *Handbook of carbon, graphite, diamonds and fullerenes: processing, properties and applications*, Noyes Publications, Park Ridge.
- [17] SALMON S.C., 2003, *The effects of hard lubricant coatings on the performance of electro-plated superabrasive grinding wheels*, Key Eng Mat, 238-239, 283-288.
- [18] SHAJI S., RADHAKRISHNAN V., 2002, *An investigation on surface grinding using graphite as lubricant*, Int J Mach Tool Manu, 42, 733-740.
- [19] SIENICKI W., WOJTEWICZ M., NADOLNY K., 2011, *Sposób impregnacji ceramicznych narzędzi ściernych*, Zgłoszenie patentowe do UP RP nr P. 395441 z dnia 27.06.2011 r.
- [20] TEICHER U., GHOSH A., CHATTOPADHYAY A.B., KÜNZANZ K., 2006, *On the grindability of titanium alloy by brazed type monolayered superabrasive grinding wheels*, Int J Mach Tool Manu, 46, 620-622.
- [21] XU X., YU Y., HUANG H., 2003, *Mechanisms of abrasive wear in the grinding of titanium (TC4) and nickel (K417) alloys*, Wear, 255, 1421-1426.

SEM-EDS ANALYSIS OF WEAR OF THE AMORPHOUS CARBON-TREATED GRINDING WHEEL ACTIVE SURFACE AFTER RECIPROCAL INTERNAL CYLINDRICAL GRINDING PROCESS OF TITANIUM GRADE 2

In this paper, a detailed analysis of the condition of the grinding wheel impregnated with a new type of impregnate (amorphous carbon) on the reciprocal internal cylindrical grinding process of Titanium Grade 2. In order to accurately identify of wear symptoms caused on the grinding wheel during grinding process, analyzes were performed using scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) techniques. During the experimental research modern instruments of observation and measurement were used: two scanning electron microscopes (JSM-5500LV by JEOL Ltd., Japan and workstation Auriga CrossBeam by Carl Zeiss Microscopy GmbH,

Germany) as well as advanced EDS detector (Octane plus by EDAX, Inc., USA). Conducted SEM-EDS analysis made it possible to determine the percentage, the shape and arrangement of cloggings resulting from adhesion of Ti chips to the grinding wheel active surface and to determine the share of an amorphous carbon after the grinding.

Keywords: *grinding wheel impregnation, grinding of titanium alloys, SEM-EDS, hard-to-cut materials, internal cylindrical grinding*