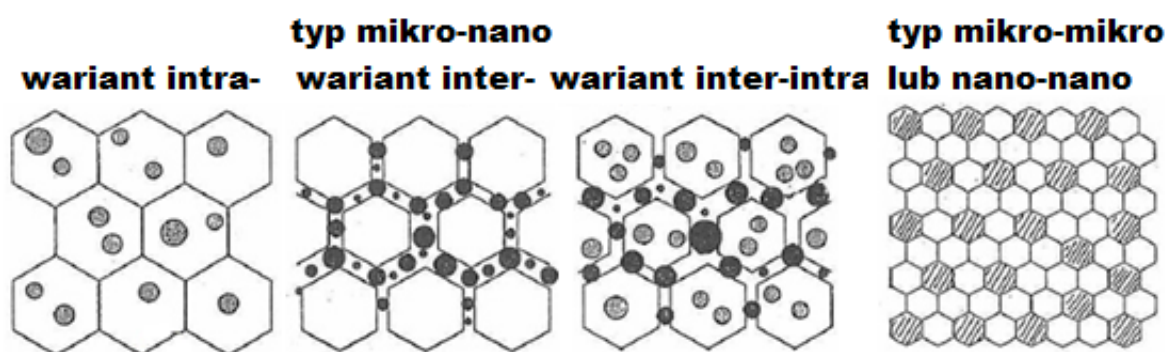


Materiały pomocnicze do ćwiczenia laboratoryjnego
„Właściwości mechaniczne ceramicznych kompozytów ziarnistych”
z przedmiotu „Współczesne materiały inżynierskie”
dla studentów IV roku Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

Większość materiałów ceramicznych stosowana jest w technice w formie polikrystalicznej, uzyskanej finalnie w czasie procesu spiekania (wypalania). Bardzo często jest to polikryształ jednofazowy lub zawierający niewielkie udziały faz innych niż podstawowa, będące efektem dodatku związków ułatwiających spiekanie lub nieusuniętych zanieczyszczeń. Ciągły rozwój materiałów i optymalizacja ich właściwości użytkowych prowadzi często do wytworzenia materiałów kompozytowych, zawierających świadomie wprowadzone, ściśle określone dodatki faz innych niż podstawowa, które modyfikują mikrostrukturę oraz wprowadzają mechanizmy poprawiające właściwości tworzywa.

Z punktu widzenia zastosowań klasycznie konstrukcyjnych, najistotniejsze cechy materiału to wytrzymałość, odporność na kruche pękanie, wartość energii pękania i ewentualnie cechy użytkowe, takie jak np. odporność na ścieranie.

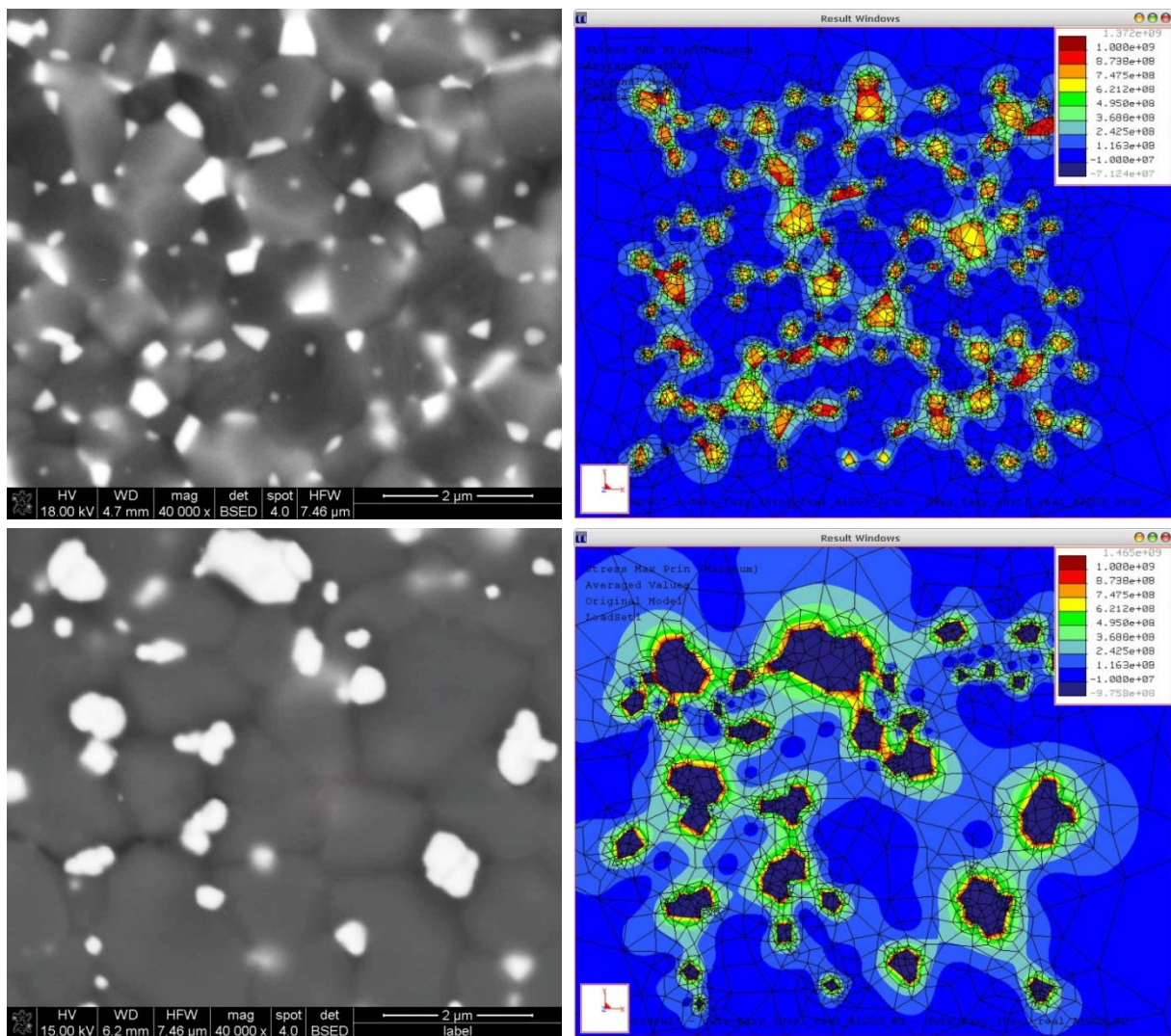
Na Rysunek 1 przedstawione są typy możliwych mikrostruktur kompozytów ziarnistych. W zależności od uzyskanej mikrostruktury poprawa właściwości dotyczyć może wszystkich wymienionych wcześniej jego cech mechanicznych lub tylko niektórych z nich.



Rys. 1. Schematyczne typy kompozytów ziarnistych – klasyfikacja podkreśla relację pomiędzy wielkościami i wzajemnym ułożeniem ziaren osnowy (kolor biały) i wtrąceń (kolory szare).

Wytwarzając materiał składający się z dwu- (lub większej ilości) faz należy liczyć się z faktem wprowadzenia do niego, podczas spiekania, naprężeń resztkowych wynikających z różnicy we współczynnikach rozszerzalności cieplnej (α) faz składowych. W czasie studzenia po spiekaniu materiału kompozytowego, różne jego fazy składowe kurczą się w różnym stopniu. Zachowanie spójności materiału powoduje powstawanie naprężeń, których wartości sięgają czasami setek MPa. Może to prowadzić nawet do powstawania pęknięć w kompozycie.

Ze względu na relację pomiędzy współczynnikami rozszerzalności cieplnej osnowy kompozytu (α_o) i wtrąceń (α_w) naprężenia w osnowie mogą mieć charakter ściskający ($\alpha_o < \alpha_w$) bądź rozciągający ($\alpha_o > \alpha_w$). Przykładem mogą tu być kompozyty na osnowie tlenku glinu ($\alpha_{Al_2O_3} = 7,9 \cdot 10^{-6} K^{-1}$) zawierające wtrącenia tlenku cyrkonu ($\alpha_{ZrO_2} = 11,0 \cdot 10^{-6} K^{-1}$) lub węglika wolframu ($\alpha_{WC} = 5,2 \cdot 10^{-6} K^{-1}$). Rysunek 2 ilustruje stan naprężeń powstały w obu kompozytach. W materiale Al_2O_3/WC ziarna tlenku glinu są efektywnie rozciągane, zaś w materiale Al_2O_3/ZrO_2 ziarna tlenku glinu są efektywnie ściskane.



Rys. 2. Rzeczywiste mikrostruktury kompozytowe i odpowiadające im rozkłady naprężeń resztkowych; w górnym wierszu Al_2O_3/ZrO_2 ; w dolnym Al_2O_3/WC (kolor granatowy maksymalne naprężenia ściskające, kolor brązowy maksymalne naprężenia rozciągające; liniowy marker na zdjęciach mikrostruktur oznacza 2 mikrometry).

Stan naprężeń w osnowie wpływać musi na wydatek energetyczny związany z rozprzestrzenianiem się pęknięcia w materiale (energia pęknięcia). W przypadku gdy osnowa podlega ściskaniu, propagacja pęknięcia wymaga dodatkowego nakładu energii. Powinno to poprawiać właściwości mechaniczne.

Podstawowe równanie mechaniki pęknięcia definiuje nam relację pomiędzy wytrzymałością, a odpornością na kruche pęknięcie według zależności:

$$K_{Ic} = \sigma_c \sqrt{\pi a_c} \quad \text{lub równoważnej:} \quad \sigma_c = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi a_c}}$$

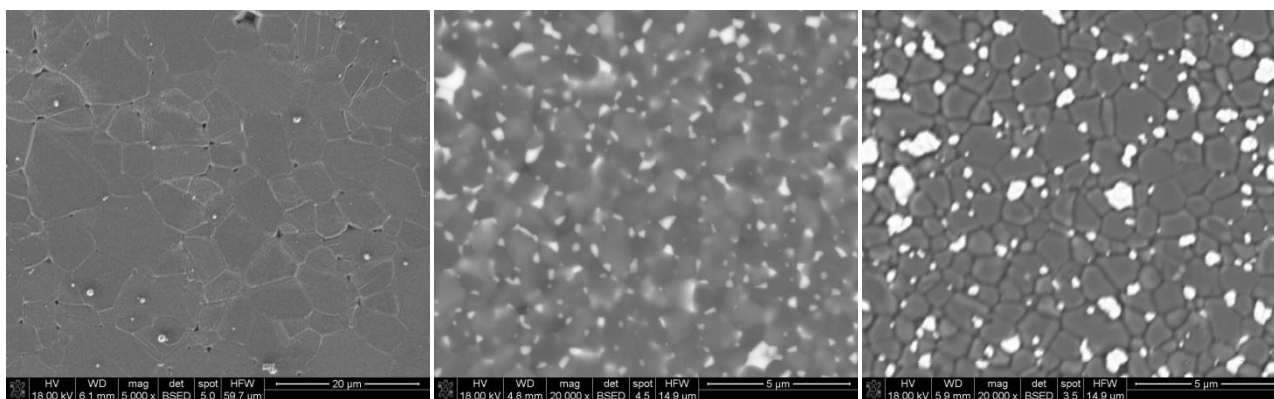
gdzie:

K_{Ic} – współczynnik odporności na kruche pęknięcie

σ_c – wytrzymałość mechaniczna, tzn. krytyczna wartość naprężenia, zapoczątkowująca pęknięcie katastroficzne

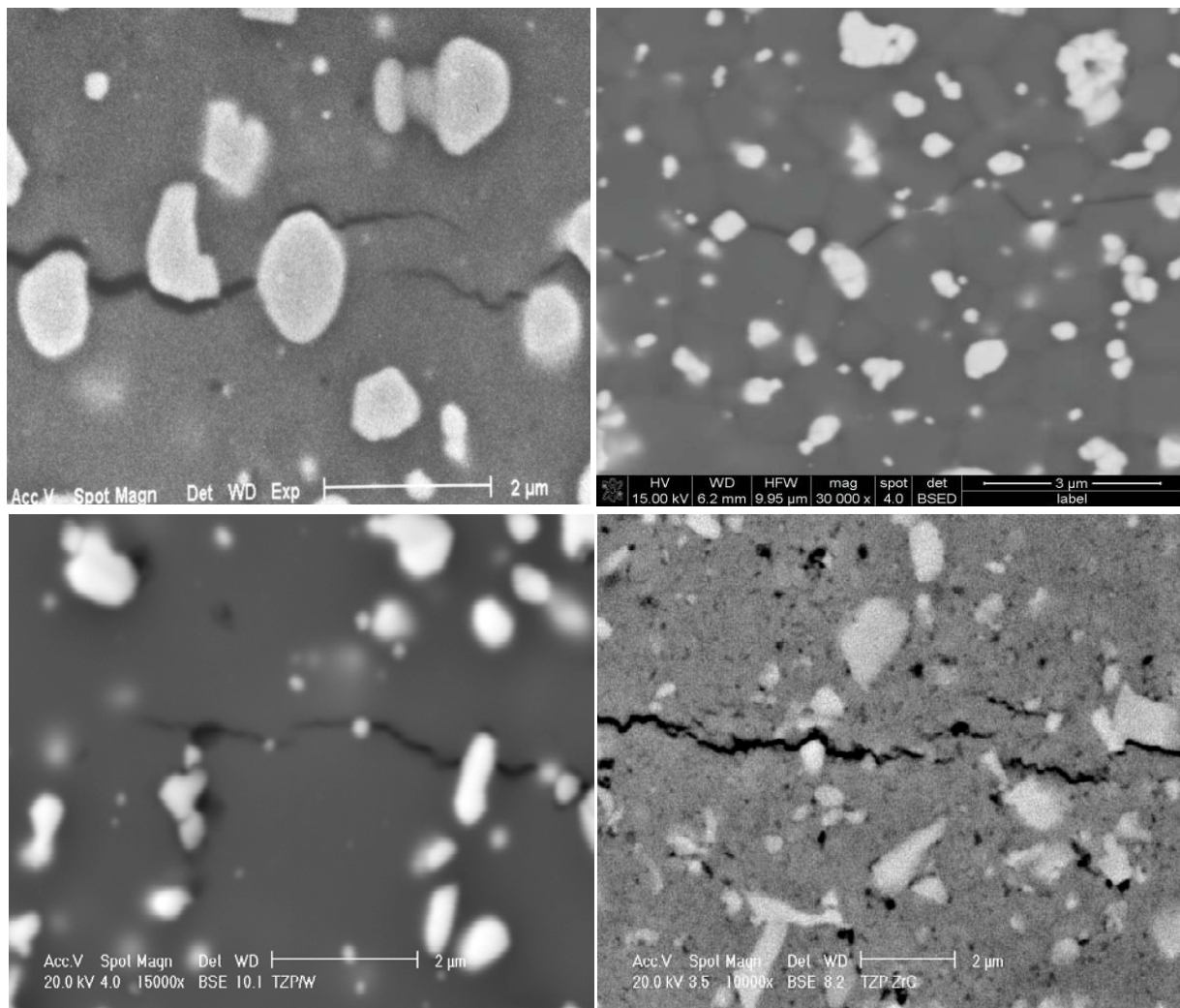
a_c – krytyczna długość pęknięcia zapoczątkowującego pęknięcie katastroficzne (wada krytyczna).

Z podniesieniem wytrzymałości będziemy mieli do czynienia wtedy, kiedy w kompozycie dojdzie do sytuacji, zmniejszenia rozmiaru wady krytycznej. Do takiej sytuacji może dojść, na przykład poprzez modyfikację mikrostrukturalną – ograniczenie rozrostu ziaren. Zwykle rozmiar wady krytycznej (por, pęknięcie) jest rzędu wielkości ziaren. Redukcja wielkości ziarna, przy zachowaniu dobrego zagęszczenia, pozwala na znaczne podniesienie wytrzymałości. Zastosowanie dodatku wtrąceń, zwykle bardzo efektywnie ogranicza rozrost wielkości ziaren osnowy w kompozycie. Ilustrują to wyraźnie obrazy zestawione na Rysunku 3.



Rys. 3. Mikrostruktury w obrazie SEM: po lewej jednofazowy tlenek glinu, w środku kompozyt osnowa tlenek glinu – wtrącenia tlenek cyrkonu, po prawej kompozyt osnowa tlenek glinu – wtrącenia węgiel wolframu. Wszystkie materiały zostały spieczone w takich samych warunkach. Poziomy marker na zdjęciu lewym oznacza 20 µm, na pozostałych 5 µm.

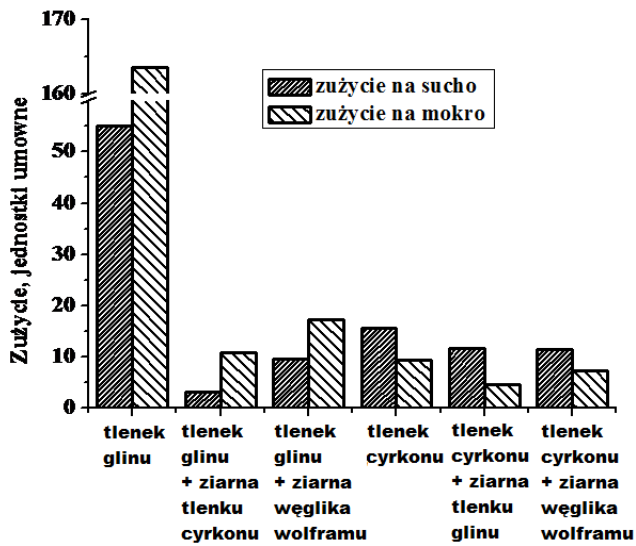
Dodatkowym czynnikiem wzmacniającym (podnoszącym wytrzymałość) materiał może być obecność naprężeń ściskających w osnowie. W takim przypadku może zachodzić jednocześnie ze wzmocnieniem, umocnienie (rozumiane jako podniesienie odporności na pęknięcie). Nie jest to jednak relacja oczywista, ponieważ finalne podniesienie odporności na kruche pęknięcie zależy od kilku dodatkowych czynników, m. in. nowych mechanizmów rozpraszania energii związanych z oddziaływaniem pęknięcia z wtrąceniami (Rys. 4.) oraz relacji wytrzymałości granic międzyfazowych (osnowa-wtrącenie) do wytrzymałości granic międzyziarnowych w osnowie.



Rys. 4. Mechanizmy umacniania kompozytów związane z oddziaływaniem pęknięcia z wtrąceniami: odchylenie biegu pęknięcia, rozgałęzianie biegu pęknięcia, mostkowanie pęknięcia (cząstki sztywne lub plastyczne), fragmentacja pęknięcia.

Wspomniane powyżej zmiany w sposobie pęknięcia kompozytów w stosunku do materiałów jednofazowych uwidaczniają się również w innych cechach użytkowych. Dobrym przykładem jest odporność na zużycie ścierne. Na Rysunku 5 zestawiono wyniki testów odporności na zużycie, mierzone objętościowym ubytkiem materiału, dla dwóch materiałów tlenkowych – tlenku glinu i tlenku cyrkonu, oraz kompozytów na ich osnowie.

Bardzo efektywne podniesienie odporności na ścieranie wiązać trzeba ze zmianą mechanizmów zużycia, które są spowodowane obecnością wtrąceń. W bardzo kruchym tlenku glinu, z którego podczas ścierania na sucho, bardzo łatwo usuwane są całe ziarna, wprowadzenie wtrąceń i ograniczenie rozrostu ziaren powoduje spektakularne ograniczenie objętości usuwanego materiału. Efekt ten jest znacznie słabszy podczas ścierania w obecności wody, co spowodowane jest łatwą erozją granic międzyziarnowych w tlenku glinu. Z kolei w tlenku cyrkonu, materiale o niewielkim rozmiarze ziarna i stosunkowo odpornym na ścieranie, wprowadzenie wtrąceń nie poprawia odporności na ścieranie tak spektakularnie, ale daje wyraźne efekty zarówno podczas ścierania na sucho jak i na mokro. Przykładowe ilustracje powierzchni po testach ścierania, ilustrujące różnice w mechanizmach zużycia podano na Rysunku 6.

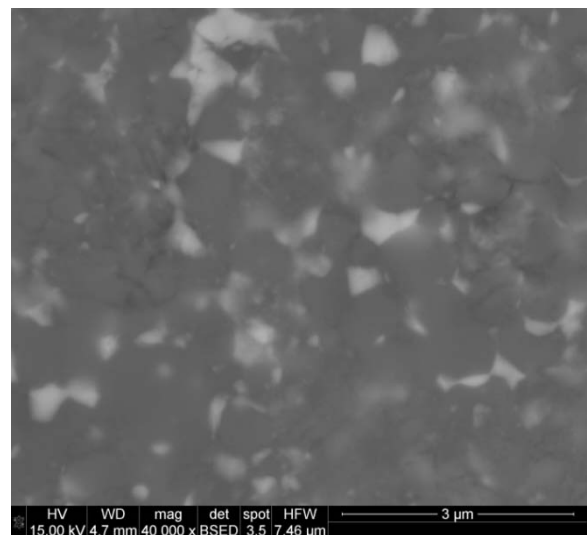
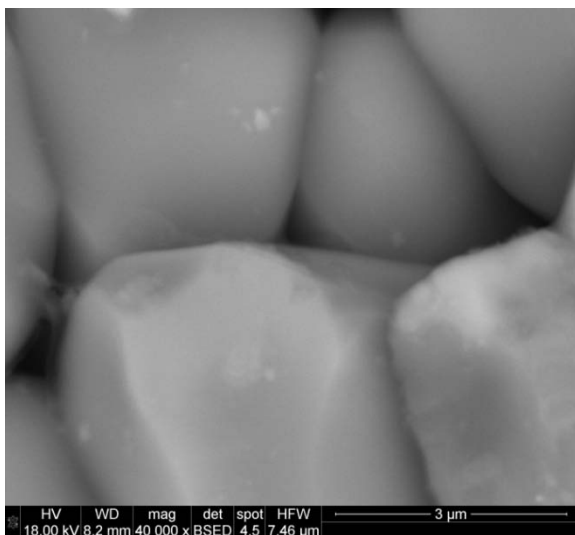
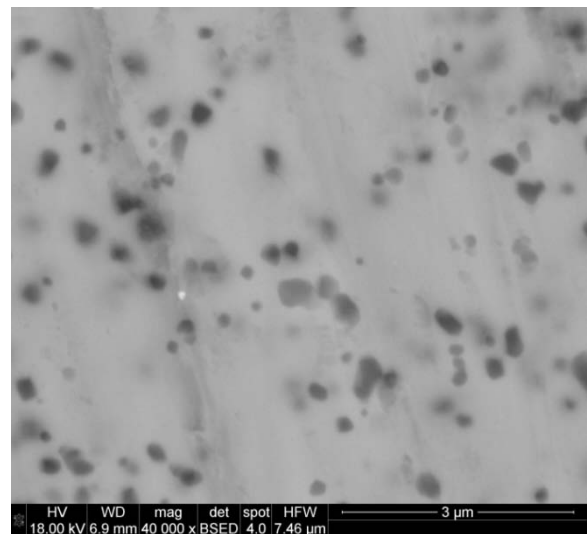
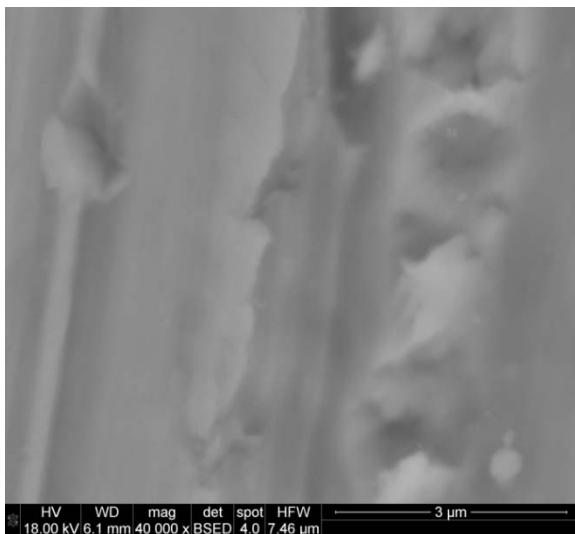


Rys. 5. wykres po lewej - zestawienie wyników testów ścierania na sucho i w zawiesinie wodnej spieków z tlenku glinu i tlenku cyrkonu, oraz kompozytów na ich osnowach.

Rys. 6. Mikrofotografie SEM poniżej zestawiają w parach obrazy śladów wytarcia:

- dla tlenku cyrkonu i kompozytu osnowa tlenek cyrkonu – wtrącenia tlenek glinu, ścieranie na sucho (górny wiersz);

- dla tlenku glinu i kompozytu osnowa tlenek glinu – wtrącenia tlenek cyrkonu, ścieranie w zawiesinie wodnej (dolny wiersz).



Literatura:

1. Roman Pampuch „Współczesne materiały ceramiczne”, AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2005.
2. Zbigniew Pędzich, Zużycie abrazyjne kompozytów ziarnistych na osnowach tlenkowych, Kompozyty/Composites 8 [4] (2008) 403-408

Opracował dr inż. Zbigniew Pędzich