

Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym

Modern material technologies in aerospace industry

Metaliczne materiały kompozytowe w aplikacjach lotniczych w tym materiały typu Glare Composite metallic materials in aviation applications (including Glare-type materials)

Politechnika Lubelska, Politechnika Rzeszowska, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Politechnika Śląska, Instytut Lotnictwa w Warszawie
Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk

Wyniki badań Results

Wytwarzanie kompozytów aluminiowo-ceramicznych z węglem szklistym

W wyniku połączenia technologii żelowania spienionej zawiesiny, nanotechnologii wytwarzania węgla szklistego i infiltracji ciśnieniowej opracowano całkowicie nową technologię wytwarzania kompozytów z osnową ze stopów aluminium zbrojonych ceramiką i węglem szklistym. Istotą tej technologii jest możliwość zmniejszenia gęstości kompozytu dzięki zastosowaniu hybrydowego zbrojenia, tj. pianek z tlenku glinu wypełnianych węglem szklistym. Wytwarzanie takich kompozytów składa się z następujących etapów:

1. wytworzenie pianki o porowatości do 90% zapewniającej dużą odporność na zużycie oraz zmniejszenie gęstości kompozytu,
2. nasączenie pianki prekursorem węgla szklistego zapewniającego małe opory tarcia i zużycie współpracujących ślizgowo skojarzeń,
3. piroliza prekursora w atmosferze argonu,
4. ciśnieniowa infiltracja nasączonej węglem szklistym pianki ciekłym stopem np., aluminium.

By combining gelcasting of foams, nanotechnology of glassy carbon manufacturing and pressure infiltration, it was possible to elaborate novel manufacturing technology of composites with aluminium alloys matrix reinforced with ceramics and glassy carbon. The essence of this technology is the ability to decrease the density and increase tribological properties of the composite through the application of hybrid reinforcement e.g. foams from aluminium oxide filled with glassy carbon.

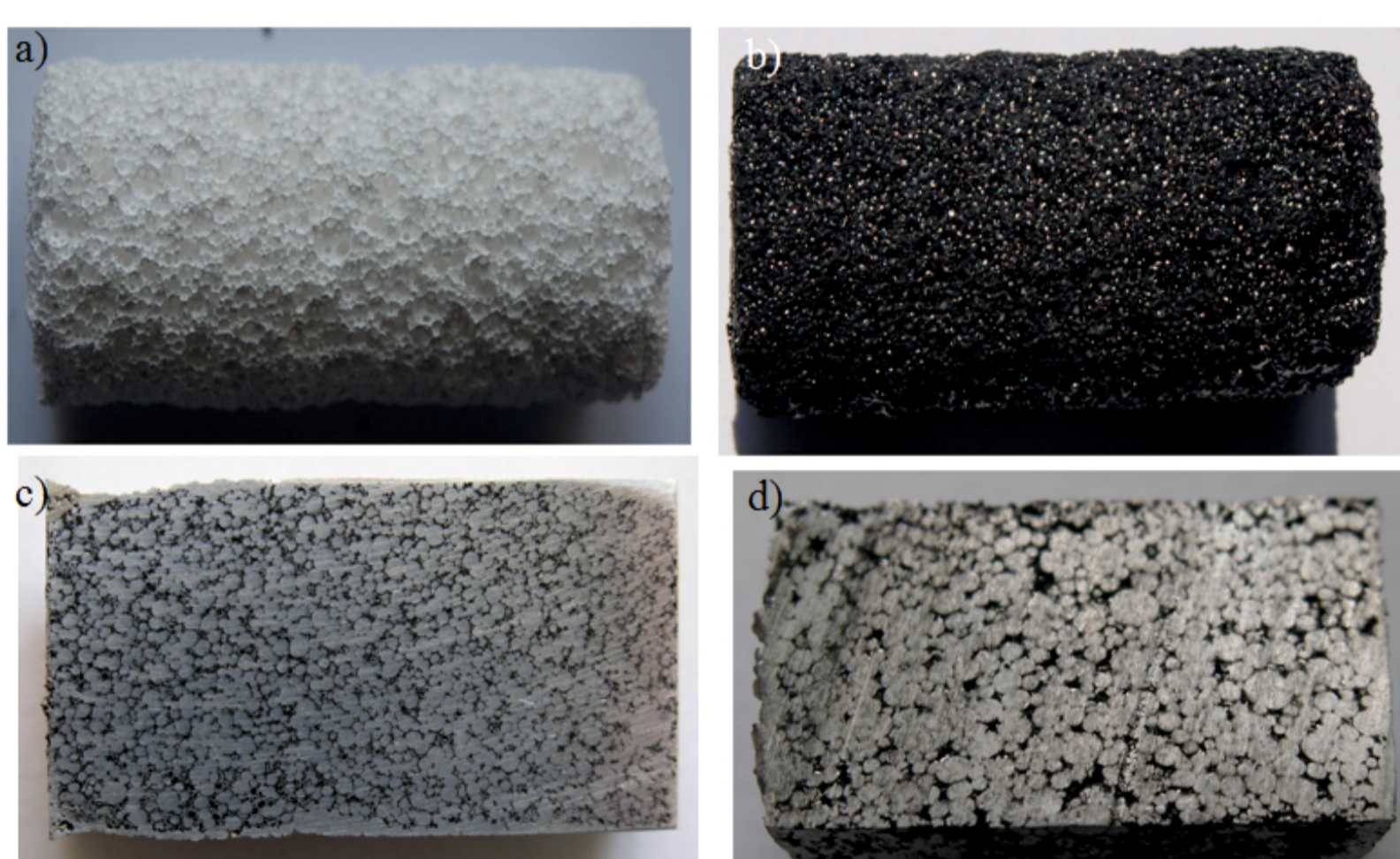
Preparation of these composites consists of the following steps:

1. production of foam with porosity of up to 90% which would ensure high wear resistance and reduce composite density,
2. foam saturation with a glassy carbon precursor which would guarantee low friction resistance and low wear of sliding contacts,
3. precursor pyrolysis in argon atmosphere,
4. pressure infiltration with e.g. aluminium alloy penetrating the foam saturated with glassy carbon

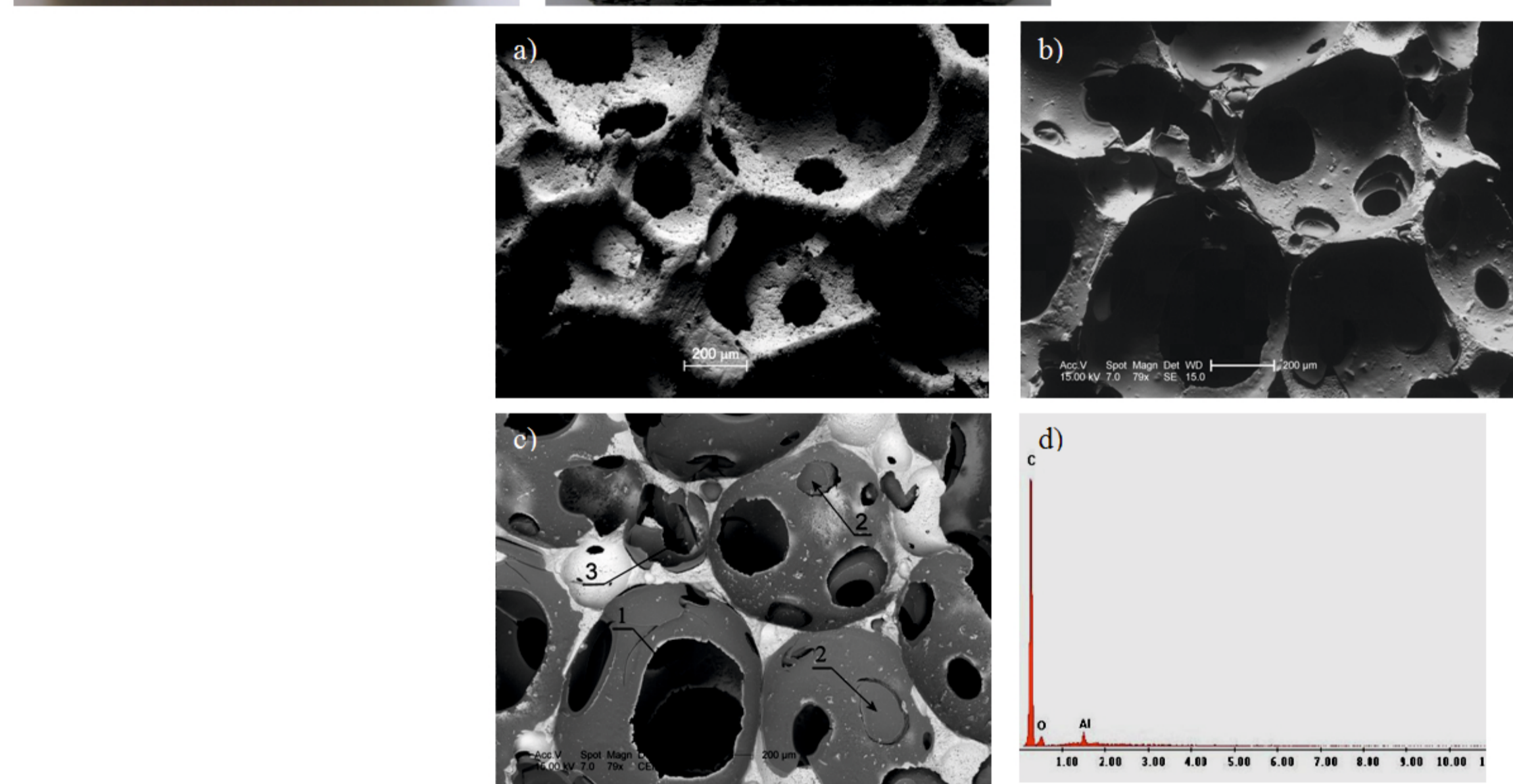
Wytwarzanie pianki ceramicznej

Wytworzone pianki składają się z ceramicznych sferoidów o średniej średnicy około 100 µm zlepionych ze sobą ściankami (rys. 1 i 2). W ściankach sferoidów znajdują się pory, które umożliwiają ich nasączenie wybranymi substancjami. Wytrzymałość pianek jest wystarczająca do ciśnieniowej infiltracji ciekłymi stopami.

The foams produced are composed of agglomerated ceramic spheroids with a average diameter of about 100 µm. The walls of spheroids are joined (Figs. 1 and 2). There are pores in the walls of spheroids which make their saturation with chosen liquid substances possible. The strength of foams is high enough for pressure infiltration with liquid alloys to occur. The foams produced are composed of agglomerated ceramic spheroids with a average diameter of about 100 µm. The walls of spheroids are joined (Figs. 1 and 2). There are pores in the walls of spheroids which make their saturation with chosen liquid substances possible. The strength of foams is high enough for pressure infiltration with liquid alloys to occur.



Rys. 1. Kształtka z porowatej pianki ceramicznej przed (a) i po (b) nasączeniu prekursorem węglowym, oraz po infiltracji strukturą ceramiczną zawierającą warstwę węgla szklistego stopem aluminium AC-ALMg5 (c) i AC-AICuMg1 (d).
Fig. 1 - Preform from porous ceramic foam before (a) and after (b) carbon precursor introduction and after infiltration with AC-ALMg5 (c) and AC-AICuMg1 (d) aluminium alloy



Rys. 2. Powierzchnia pianki ceramicznej przed nasączeniem (a) oraz po nasączeniu prekursorem węgla i pirolizie (b, c) i rozkład pierwiastków (d) SEM. 1 - otwarte pory do infiltracji stopem osnowy, 2 - pory zamknięte węglem szklistym, 3 - fragmenty węgla szklistego w sferoidzie ceramicznym
Fig. 2 - Ceramic foam surface before (a) and after (b, c) carbon precursor introduction and its pyrolysis; element distribution (d), SEM: 1 - open pores for matrix infiltration, 2 - pores closed with glassy carbon, 3 - glassy carbon piece inside ceramic

Nasączenie pianki ceramicznej prekursorem węgla Ceramic foam saturation with a carbon precursor

Węgiel szklisty na powierzchniach wewnętrznych i zewnętrznych sferoidów porowatej ceramiki tenkowej (rys. 1b) otrzymuje się przez karbonizację wprowadzonego wcześniej prekursora węgla w postaci polimeru polialkoholu furfurylowego w obecności katalizatora. Katalizatorem może być kwas solny. Metoda ta polega na impregnacji ceramiki prekursorem węgla a następnie wysuszeniu w 900°C. Czas nasączenia decyduje o ilości wytworzonego węgla.

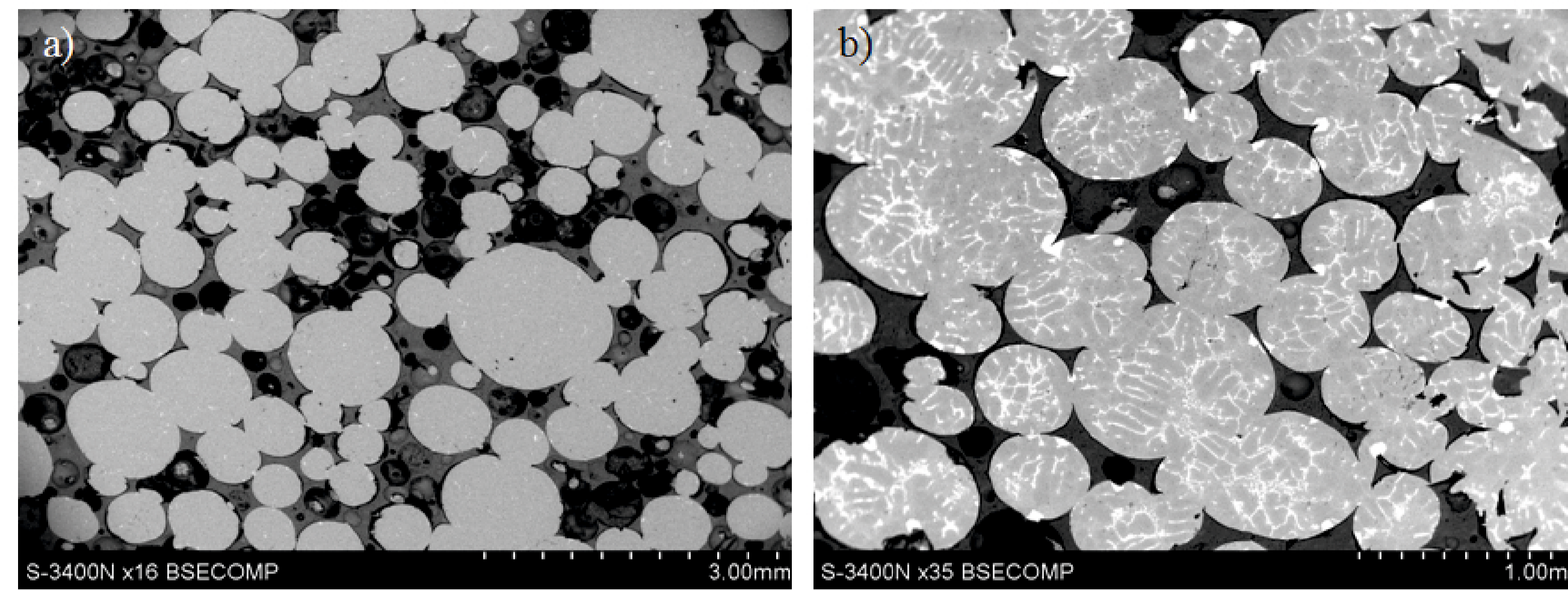
Zaimpregnowana ceramika wystawia się na działanie par alkoholu furfurylowego w temperaturze od 200 do 900°C. Polimeryzacja osadzających się par alkoholu i późniejsza piroliza alkoholu furfurylowego (FA) jest interesująca ze względu na rodzaj węgla uzyskanego po pirolizie (węgiel amorficzny), zaś wysoka wydajność karbonizacji sprawia, że alkohol furfurylowy stanowi bardzo dobre źródło węgla.

Synteza węgla szklistego w ceramice piankowej Glassy carbon synthesis in foam ceramics

Piroliza prekursora węgla przeprowadza się przez ogrzewanie zaimpregnowanej ceramiki w temp. do 1000°C w obecności argonu w czasie potrzebnym do wytworzenia węgla szklistego. W ten sposób powstaje węgiel szklisty, którego ścianki zamiast płaszczyzn grafenowych są zbudowane z węgla amorficznego lub o strukturze turbostratycznej. Po schłodzeniu ceramika tenkowa jest pokryta węglem szklistym po stronie zewnętrznej i wewnętrznej, czemu towarzyszy połysk powierzchni, rysunki 2b, 2c, 2d 4 i 5. Więcej informacji na temat wytwarzania kompozytu można znaleźć w opisie patentowym [9].

Infiltracja pianki stopem aluminium Foam infiltration with aluminium alloy

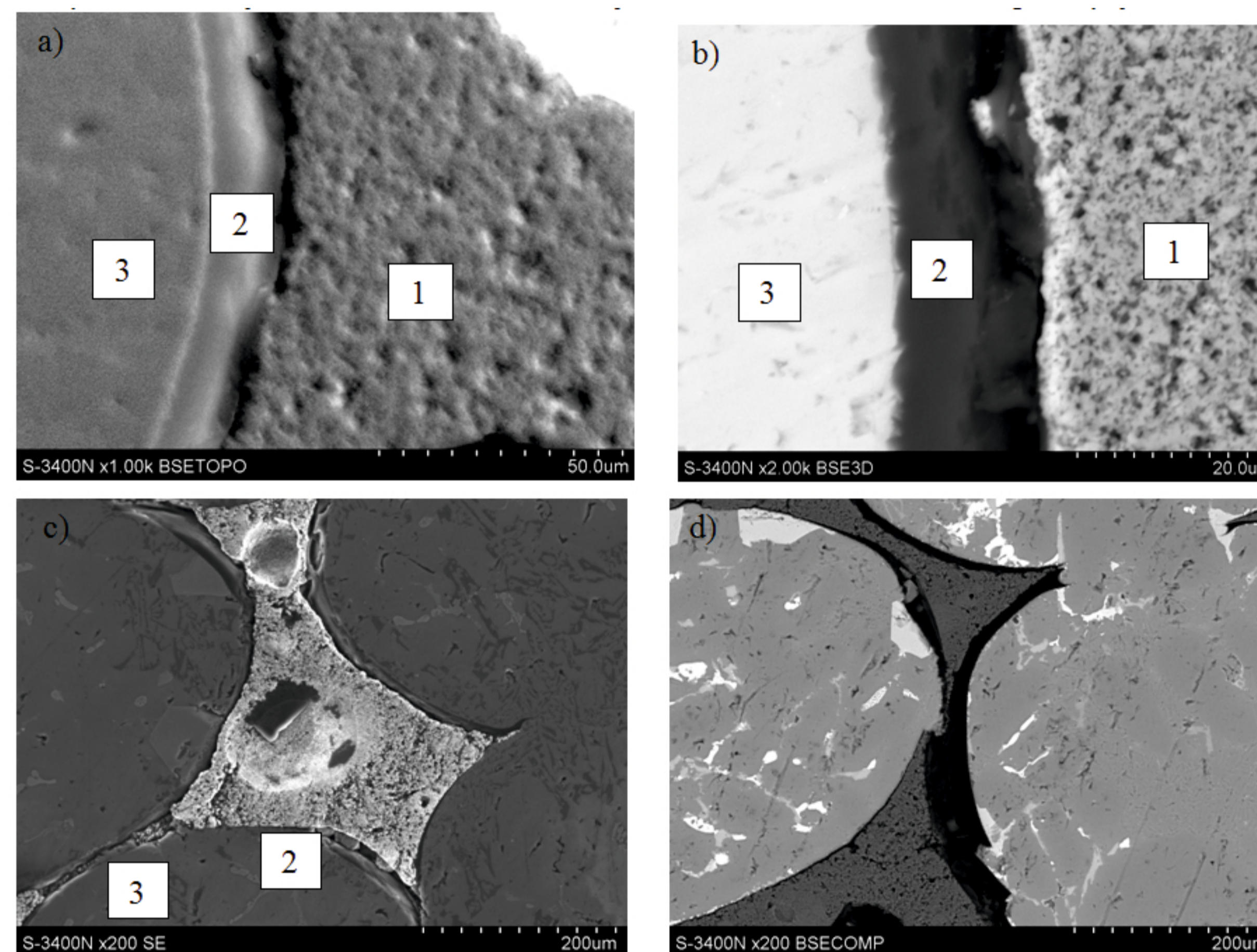
Po zakończeniu procesów nasączenia prekursorem węgla i pirolizie jest wykonywany proces infiltracji wybranym stopem aluminium. Jest on wykonywany w formie pod ciśnieniem do 60 MPa. Do infiltracji użyto dwóch stopów odlewniczych, tj. AC-ALMg5 i AC-AICu3Mg1 stosowanych do wytwarzania elementów maszyn.



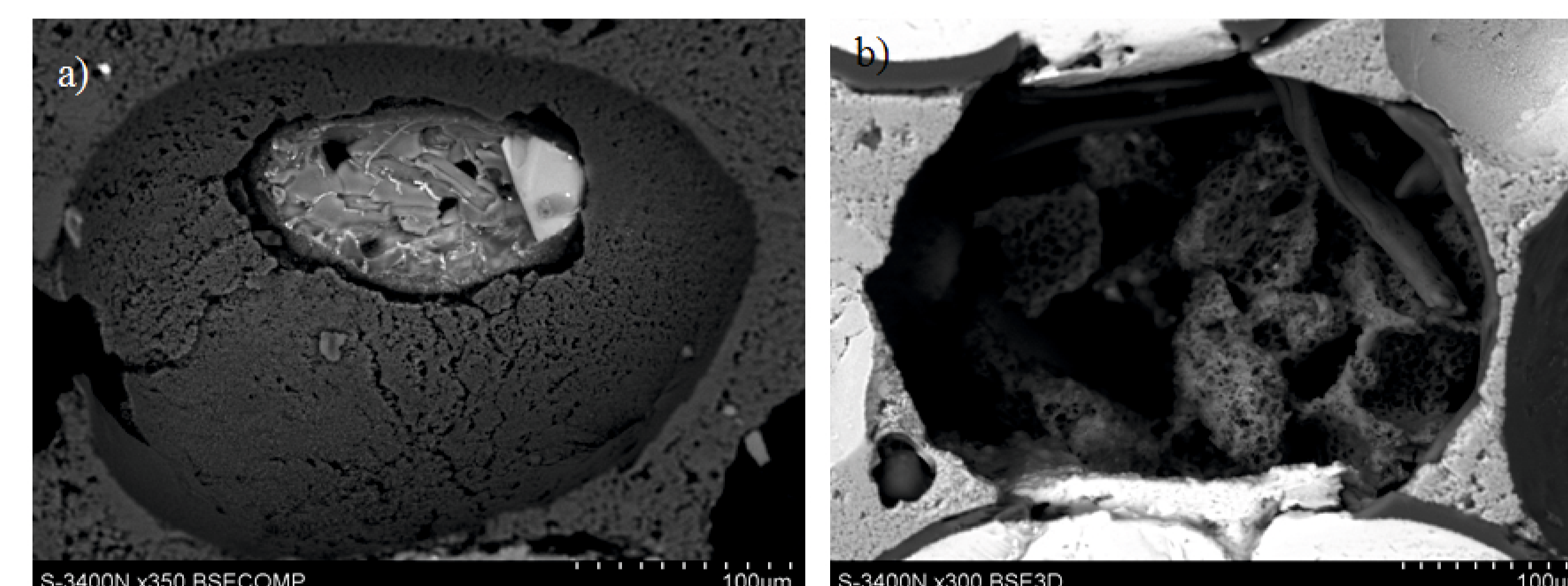
Rys. 3. Mikrostruktury kompozytu z osnową ze stopu AC-ALCuMg1 (a) oraz stopu AC-ALMg5 (b).
Fig. 3 - Polished crosssections of examined composite with AC-ALCuMg1 matrix (a) and AC-ALMg5 matrix (b)

Struktura i wybrane właściwości kompozytu Structure and selected composite properties

Strukturę wytworzonych kompozytów badano mikroskopem skaningowym na zglądach metalograficznych. Wyniki przedstawiono na rysunkach 4 i 5. Kompozyty z obydwoma osnowami, tj. stopami aluminium z miedzią i magnezem charakteryzują się równomiernym rozmieszczeniem zarówno osnowy jak i fazy zbrojącej oraz smaru stałego, jakim jest węgiel szklisty. Na rysunku 4 widać ceramiczne sfery wypełnione stopem osnowy. Średnia średnica sfer jest nierównomierna, dlatego elipsoidalne sfery osnowy mają różną średnicę. Na rys. 4 pokazano granicę fazy stopu osnowy, węgla szklistego i ceramicznej fazy zbrojącej. Z rysunku wynika, że warstewki węgla szklistego w kompozycie z osnową ze stopu ALMg5 i ze stopu AICuMg1 mają podobne grubości, tj. około 15 µm.



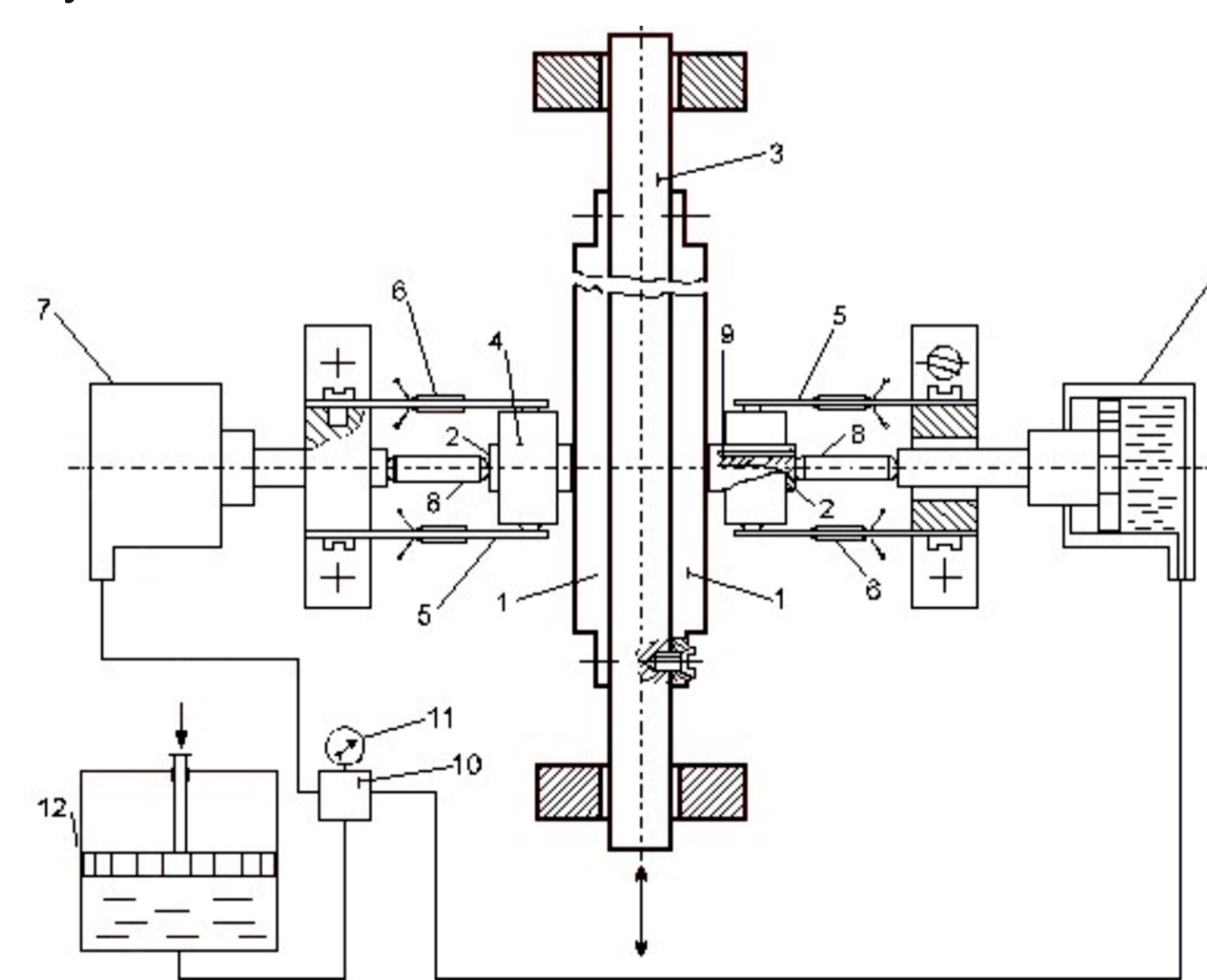
Rys. 4. Granice rozdzielenia między stopami aluminium a ceramicznymi sferoidami w kompozycie dla osnowy ze stopu AICuMg1 (a,c) i osnowy ALMg5 (b,d): 1 - pianka ceramiczna, 2 - warstwa węgla szklistego, 3 - materiał osnowy.
Fig. 4 - Boarder zone between aluminium alloy and ceramic spheroid for composite with AICuMg1 (a, c) and ALMg5 (b, d) alloy matrix: 1 - ceramic spheroid, 2 - glassy carbon film, 3 - aluminium alloy matrix



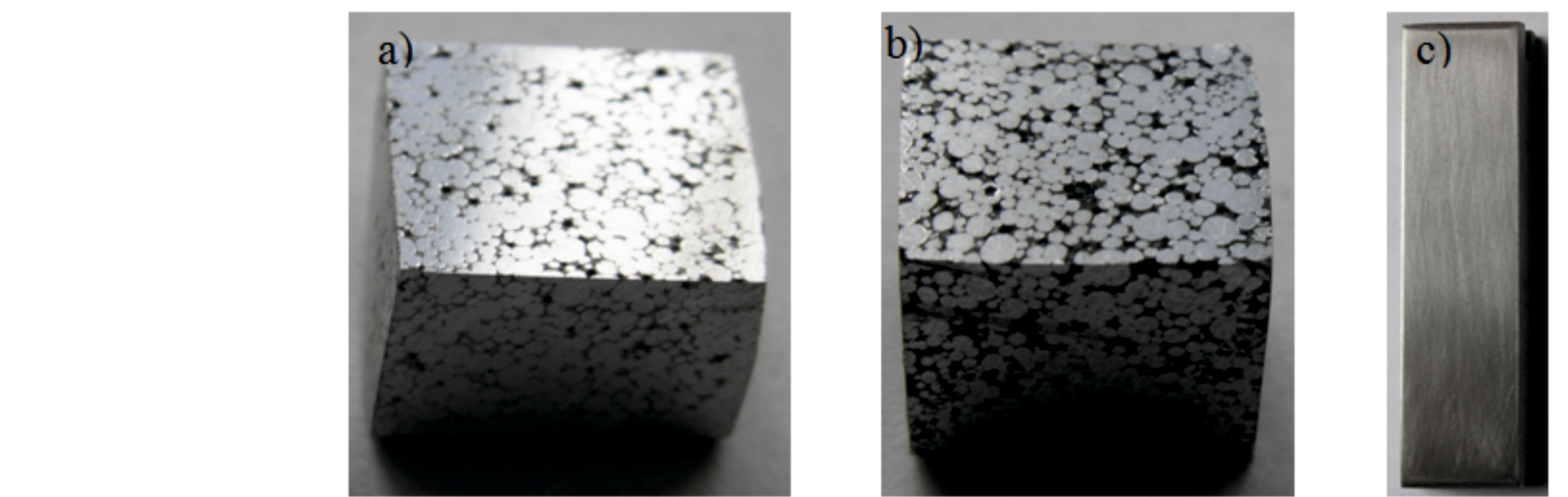
Rys. 5. Ceramiczne sferoidy pokryte węglem szklistym: a) przepalony sferoid tenkowy z pozostałością warstwy węgla, b) przepalony sferoid wypełniony pasemkami węgla szklistego i odłamkami ceramiki.
Fig. 5 - Alumina spheroid coated with glassy carbon film and filled with bundles of glassy carbon: a) opened oxide spheroid with remaining carbon film, b) opened oxide spheroid with glassy carbon layer bundles and ceramic splinters

Wytrzymałość na ściskanie i odporność na zużycie Compressive strength and wear resistance

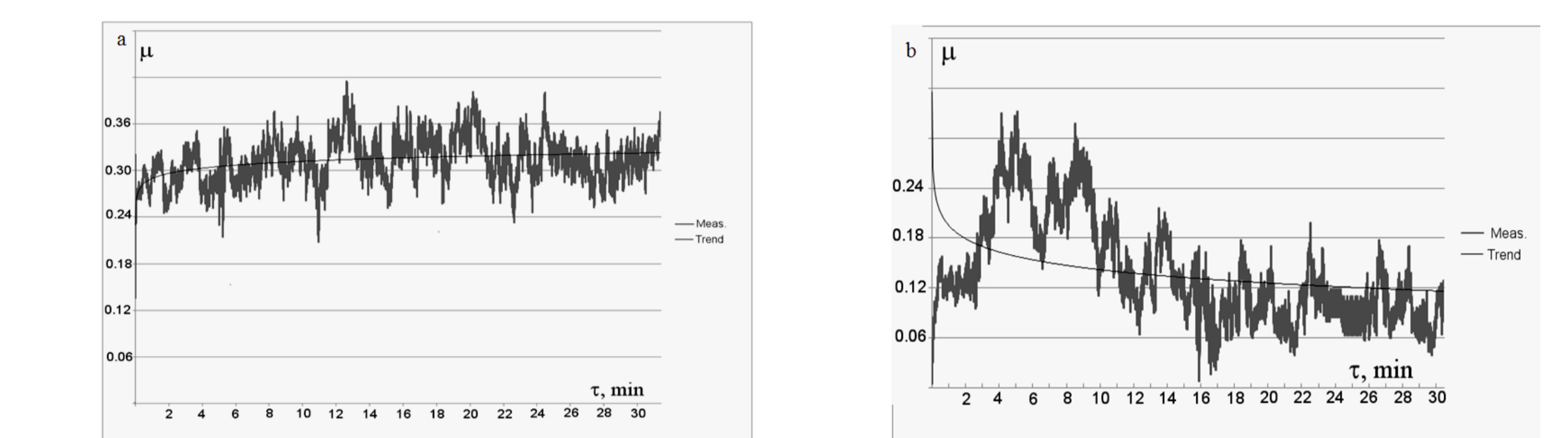
Wytrzymałość na ściskanie opracowanych kompozytów jest istotna ze względu na ich potencjalne zastosowania do wytwarzania elementów silników spalinowych. Badanie wytrzymałości na ściskanie wykonano na kształtkach przygotowanych zgodnie z EN ISO 7500-1. Badany kompozyt charakteryzuje się wytrzymałością na ściskanie $R_c=219,4$ MPa i $A=18,5\%$ przy wytrzymałości osnowy $R_c=50,5$ i $A=47,1\%$. Wstępne badania tribologiczne materiału osnowy i kompozytu wykonano w ruchu posuwisto-zwrotnym na stanowisku symulującym warunki pracy bezolejowych sprężarek powietrza i ruchu zimnych maszyn tłokowych, tj. gdy lepkość oleju jest zbyt duża i smarowanie rozryzowe jest nieskuteczne (rys.6). Węzeł tarcia tego stanowiska stanowią wycinki z płaszczka tłoka (sześcián o boku 10 mm) i głazdi tulei cylindrowej (prostópadościan 140x16x8 mm). Widoki próbek i przeciwpórek użytych do badań przedstawiono na rys. 7. Badania przeprowadzono w warunkach tarcia technicznie suchego. Podczas badań mierzono siły tarcia przy prędkości względnej $v=2,5$ m/s i nacisku jednostkowym próbkę na przeciwpórkę $p=2$ MPa. Dla określenia wpływu obecności węgla szklistego na właściwości tribologiczne przeprowadzono badania porównawcze kompozytu zawierającego tylko osnowę i ceramiczne sferoidy tenkowe oraz kompozytu zawierającego osnowę, sferoidy tenkowe i węgiel szklisty. Wyniki zestawiono na rysunkach 8 i 9.



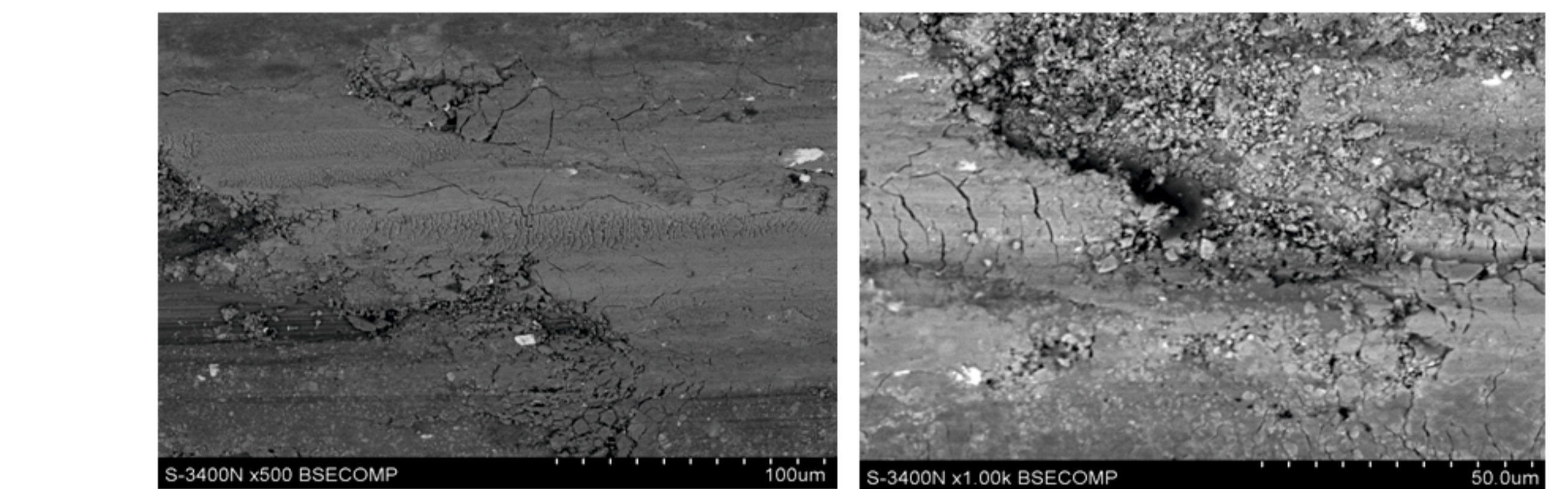
Rys. 6. Schemat stanowiska do badań tribologicznych: 1 - przeciwpórkę (kompozyt), 2 - próbka (żeliwo), 3 - prowadnica, 4 - uchwyty próbek, 5 - przetwórniki siły, 6 - tensometry w układzie pełnego mostka, 7 - siłownik hydrauliczny, 8 - popychacz przegubowy, 9 - otwór na termoelement, 10 - 4/2 rozdzielacz, 11 - ciśnieniomierz, 12 - pompa hydrauliczna.
Fig. 6 - Scheme of the tribological tester: 1 - counter-specimen; 2 - specimen; 3 - specimen holder; 4 - hinged specimen holder; 5 - force sensor; 6 - strain gauge bridge; 7 - hydraulic cylinder; 8 - hinged pusher; 9 - bore for thermocouple; 10 - 4/2 manipulator; 11 - pressure gauge; 12 - hydraulic pump



Rys. 7. Próbkę i przeciwpórkę użyte do badań: a) kompozyt z ceramiką, b) kompozyt z ceramiką i węglem szklistym, c) przeciwpórkę z żeliwa GJL-300.
Fig. 7 - Samples and countersamples used for investigations: a) composite with ceramics, b) composite with ceramics and glassy carbon, c) GJL-350 cast-iron

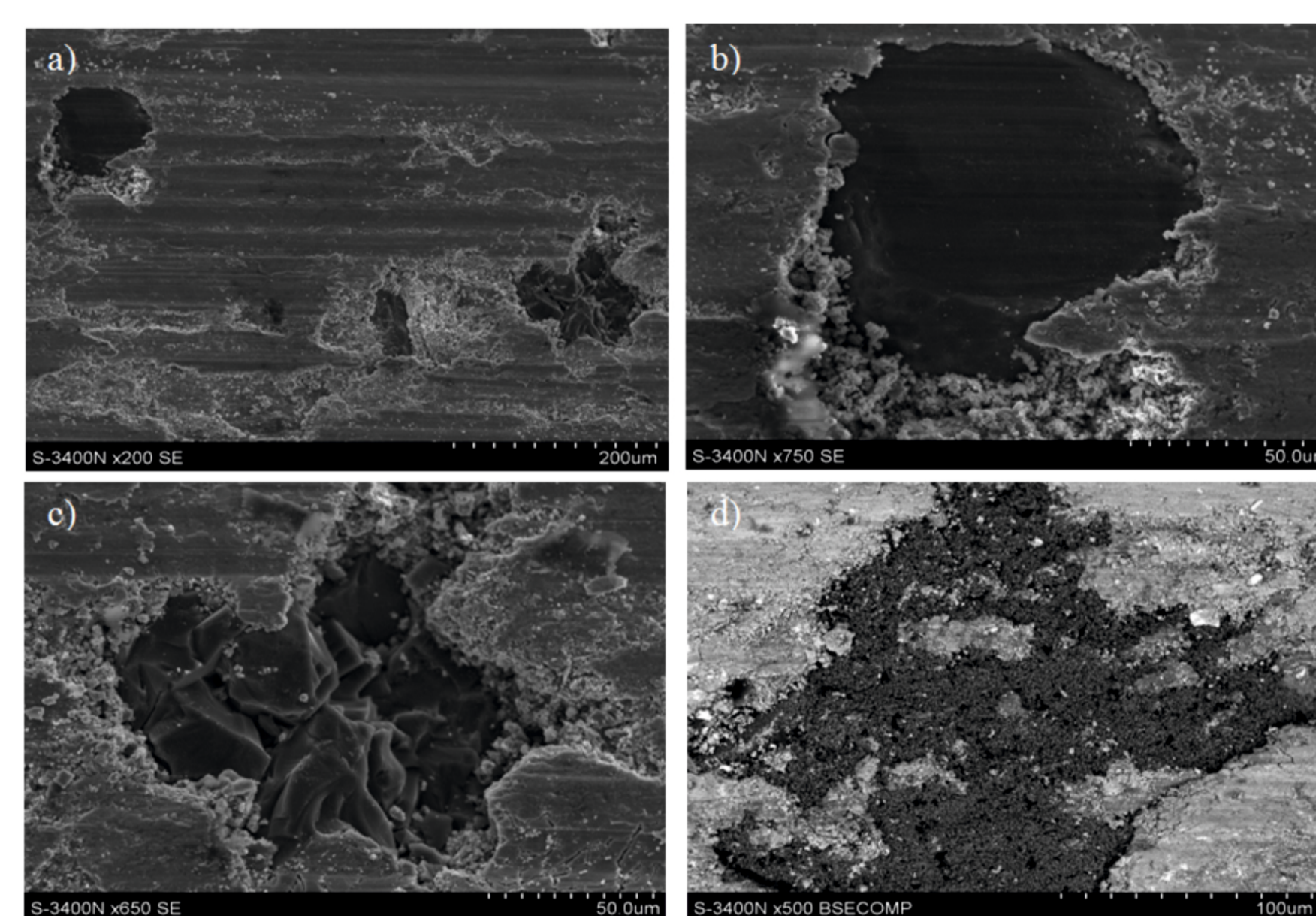


Rys. 8. Zależność współczynnika tarcia w skojarzeniu kompozyt/GJL-300 w funkcji czasu współpracy: a) kompozyt nie zawierający pokrycia z węgla szklistego, b) kompozyt z pokryciem z węgla szklistego.
Fig. 8 - Friction coefficient in composite/GJL-350 contact versus sliding time: a) composite without GC, b) composite with GC



Rys. 9. Powierzchnie kompozytu bez pokrycia z węgla szklistego po tarcu (widoczne spękania i wykruszenia spowodowane odkształceniami ceramicznych sferoidów).
Fig. 9 - Surfaces of composite without GC after sliding (cracks and crushes caused due to ceramic spheroid deformation)

O właściwościach tribologicznych analizowanych materiałów kompozytowych decydują m.in. właściwości wytrzymałościowe materiału osnowy, ilość węgla szklistego oraz jego równomierne rozmieszczenie i połączenie z osnową. W opracowanych kompozytach węgiel szklisty jest umiejscowiony na ściankach sferoidów ceramicznych w postaci ciągłej warstewki oraz wypełnia niektóre ze sferoidów wiązkami (rys. 5). Takie rozmieszczenie działającego jako smar stały węgla szklistego zapobiega szczypaniu adhezyjnemu podczas współpracy ślizgowej, np. z stopem aluminium lub żelazem. Badania wytrzymałościowe wykazały, że wprowadzenie do osnowy 10% sfer tlenku glinu spowodowało znaczne (4,3 razy) zwiększenie wytrzymałości na ściskanie oraz pogorszenie plastyczności (2,5-krotnie). Zwiększenie wytrzymałości jest spowodowane połączeniami sferoidów tworzącymi przestrzenny szkielet i wypełnieniem ich stopem osnowy. Podczas ściskania przemieszczanie osnowy jest hamowane przez sferoidy. Przeprowadzone badania tribologiczne kompozytów we współpracy z żelazem szarym w warunkach tarcia technicznie suchego wykazały, że obecność warstewki węgla szklistego na ściankach tenkowych sferoidów zmniejsza współczynnik tarcia z 0,3 (rys. 8a) dla kompozytu bez węgla do 0,12 (rys. 8b) dla kompozytu z węglem. Mechanizm zużycia współpracujących elementów jest podobny dla obydwóch kompozytów. W skojarzeniu dominuje zużycie ściernie. Żelazo jest zużywane przez twarde sferoidy tlenkowe. Podczas współpracy ślizgowej kompozytu zawierającego węgiel szklisty produkty zużycia węgla osadzają się na współpracujących powierzchniach łagodząc tarcie (rys. 10). Część sferoidów pokrytych węglem znajdująca się w strefie tarcia (rys. 10a and b) jest źródłem smaru stałego powodującego zmniejszenie sił tarcia. Sferoidy znajdujące poniżej powierzchni styku nie biorą udziału w tarcu (rys. 10c and d). W początkowych minutach współpracy skojarzenia ma miejsce wykruszenie tlenku i inkludowanie do żeliwa. Te odłamki powodują zużycie ściernie kompozytu. Po około 20 minutach współpracy produkty zużycia ceramiki zostają usunięte ze strefy tarcia i współczynnik tarcia stabilizuje się (rys. 8b). W skojarzeniu z kompozytem bez węgla szklistego współczynnik tarcia po kilku minutach osiąga wartość około 0,3 i nie zmienia się przez cały czas badań. Świadczy to o homogenicznej budowie kompozytu. Nie wypełnione całkowicie stopem osnowy sferoidy znajdujące się bezpośrednio pod powierzchnią styku pękają w wyniku odkształceń, zapadają się pociągając do wnętrza materiał osnowy, co objawia się lukowymi spękaniami (rys.9).



Rys. 10. Powierzchnia kompozytu po tarcu: pokryta węglem szklistym cząstka ceramiczna ze śladami tarcia (a i b) oraz cząstki nie biorące udziału w tarcu (c i d) prevents adhesive tacking at sliding e.g. with another aluminium alloy or cast iron.
Fig. 10 - Surfaces of composite with GC after sliding: ceramic spheroid with sliding traces (a and b) covered with GC and spheroids which don't take part in sliding (c and d)

Wnioski Conclusions

Jak wynika z przeprowadzonych badań jest możliwe wytworzenie hybrydowego kompozytu z osnową ze stopu aluminium zbrojonego ceramicznymi sferami pokrytymi węglem szklistym. Proces wytwarzania takich kompozytów składa się z trzech etapów, tj. wytwarzania spienionej ceramiki o porowatości do 90%, nasączenia jej prekursorem węgla szklistego i pirolizy tego prekursora oraz ciśnieniowej infiltracji ciekłym stopem. Dzięki takiemu procesowi uzyskuje się kompozyt o równomiernym rozłożeniu węgla szklistego w całej objętości, co znacznie poprawia właściwości tribologiczne kompozytu. Dotychczasowe technologie wytwarzania kompozytów z węglem szklistym nie gwarantowały równomiernego rozłożenia węgla, co było ich istotnym mankamentem zwiększającym opory tarcia podczas współpracy ślizgowej np. z żelazem ze względu na możliwość lokalnego szczypania ze stopem osnowy.

As the conducted investigations show, it is possible to produce hybrid composite with aluminium alloy matrix and reinforced with ceramic spheres covered with glassy carbon. The production process of such composites consists of three stages: production of foam ceramics with 90% porosity, its saturation with glassy carbon precursor and precursor pyrolysis and finally pressure infiltration with liquid alloy. The process designed in such a way makes it possible to obtain a composite with uniform distribution of glassy carbon over the entire volume which greatly improves tribological properties of a composite. The technologies applied so far for the production of composites with glassy carbon require mixing of the suspension and do not guarantee uniform carbon distribution. This seem to be the most significant disadvantage increasing the frictional resistance during sliding, e.g. with cast iron, since local tacking with matrix alloy is possible to occur.