

dr inż. Wojciech Tuchowski¹⁾

ORCID: 0000-0002-9962-1469

mgr inż. Michał Rogala²⁾

ORCID: 0000-0003-1813-8721

dr inż. arch. Karolina Kurtz-Orecka^{3)*}

ORCID: 0000-0002-9843-5701

prof. dr hab. inż. Katarzyna Gawdzińska⁴⁾

ORCID: 0000-0001-6989-6966

dr hab. inż. Zbigniew Matuszak, prof. PMS⁴⁾

ORCID: 0000-0002-0554-730X

Evaluation of fire properties of aluminum and aluminum-ceramic foams

DOI: 10.15199/33.2023.01.07

Streszczenie. W pracy przedstawiono zastosowanie piany aluminiowej oraz piany aluminiowo-ceramicznej domieszkowanej cząsteczkami węgla krzemu w budownictwie, np. instalacjach fotowoltaicznych. Przeprowadzone badania reakcji na ogień wykazały, że struktury porowate mają wyższą temperaturę topnienia niż materiał stały. Ponadto ścianki piany pokryte są cienką warstwą Al_2O_3 , co podwyższa wartość temperatury topnienia struktury. Obie badane piany, ze względu na swoją niepalność, mogą być stosowane w budownictwie lub w przemyśle morskim, po przeprowadzeniu badań uzupełniających określających ich klasę palności. Przeprowadzane badania są badaniami wstępnymi związanymi z doбором materiałów porowatych przeznaczonych na izolację.

Słowa kluczowe: instalacja fotowoltaiczna; piana metalowa; piana kompozytowa; palność.

Abstract. The paper presents the application of aluminium foam and aluminium-ceramic foam, doped with silicon carbide particles as a part of photovoltaic installations. The tests of reaction to fire showed, that the porous structures have a higher melting point than the solid material. Moreover, the foam walls are covered with a thin layer of Al_2O_3 , which raises the melting point of the structure. Both investigated foams, due to their non-flammability, can be used in civil engineering or in the marine industry, after conducting supplementary tests determining their flammability class. The tests carried out are preliminary tests related to the selection of porous materials dedicated to insulation.

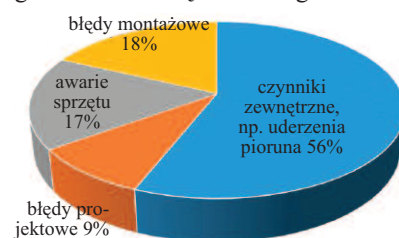
Keywords: photovoltaic installation; metallic foam; composite foam; flammability.

Holenderskie stowarzyszenie operatorów sieci gazowych i elektrycznych Netbeheer Nederland zaprezentowało raport [1], który zawiera scenariusze regionalne i światowe transformacji energetycznej. Scenariusz europejski uwzględnia wprowadzenie podatku od emisji CO_2 w krajach Unii Europejskiej (UE), którego prognozowany wzrost jest do 2050 r. Z raportu wynika, że produkcja energii w UE będzie nadal bazowała na wykorzystaniu paliw kopalnych, a ponadto rozwijać się będzie elektromobilność wykorzystania odnawialnych źródeł energii (OZE) oraz technologie wodorowe, np. w Niderlandach fotowoltaika osiągnie 42 GW mocy, energetyka wiatrowa 52 GW, a moc rezerwowa pozostanie na poziomie

45 – 53 GW [2]. Intensywny rozwój instalacji fotowoltaicznych jest również analizowany jako kierunek wspierania transformacji energetycznej obszaru przygranicznego wysp Uznam i Wolin na granicy polsko-niemieckiej [3].

Energia fotowoltaiczna, czyli pozyskiwana ze Słońca, chroni środowisko naturalne, ale stosowanie odnawialnych źródeł energii wymusza opracowanie nowych standardów bezpieczeństwa transportu i/lub eksploatacji obiektów, np. z zainstalowanymi instalacjami fotowoltaicznymi. Ogniwa fotowoltaiczne, z których zbudowane są moduły fotowoltaiczne, konwertują energię promieniowania słonecznego w energię elektryczną (tzw. efekt fotowoltaiczny). Wytworzony w ten sposób prąd stały przepływający przez falowniki zostaje przekształcony w prąd sinusoidalny (przebiegienny o napięciu 230 V). Tak wysokie napięcie prowadzi często do zagrożeń pożarowych. Oprócz napięcia wiele zależy od jakości samej instalacji, na którą wpływa profesjonalny montaż oraz materiał, z którego jest wykonana [4]. Z badania TÜV Rheinland – Fraun-

hofer przeprowadzonego w Niemczech w 2015 r. wynikają najczęstsze przyczyny pożaru instalacji fotowoltaicznej [1], które zaprezentowano na rysunku 1. Z analizowanych przyczyn jasno wynika, że coraz większe zapotrzebowanie na tego typu inwestycje nie ma odwzajemnienia w jakości wykonania instalacji. Pośpiech, niestaranny montaż systemu oraz względy ekonomiczne przy wyborze tańszych rozwiązań mogą nieść za sobą ryzyko pożaru. W niektórych krajach, np. w Polsce, Państwowa Straż Pożarna nie prowadzi oficjalnych statystyk dotyczących tego typu zdarzeń. Zgodnie z Ustawą z 13 lutego 2020 r.



Rys. 1. Przyczyny pożaru instalacji fotowoltaicznej

Opracowanie własne na podstawie [5, 6]
Fig. 1. Causes of a photovoltaic installation fire
Own elaboration based on [5, 6]

¹⁾ Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Techniki Morskiej i Transportu

²⁾ Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny

³⁾ Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

⁴⁾ Politechnika Morska w Szczecinie, Wydział Mechaniczny

^{*}) Adres do korespondencji: kurtz@zut.edu.pl

o zmianie ustawy – Prawo budowlane [7] oraz niektórych innych ustaw z 19 września 2020 r. weszły w życie przepisy dotyczące bezpieczeństwa pożarowego instalacji fotowoltaicznych. Wymagają one uzgodnienia projektów urządzeń fotowoltaicznych o mocy zainstalowanej większej niż 6,5 kW z rzeczoznawcą ds. zabezpieczeń przeciwpożarowych pod względem zgodności z wymaganiami ochrony przeciwpożarowej oraz zawiadomienia Państwowej Straży Pożarnej o zamontowaniu takiej instalacji. Panuje opinia, że pożarów instalacji fotowoltaicznych jest bardzo dużo. W każdym przypadku ich skutek jest katastrofalny, a rosnący popyt na tego typu źródła energii zwiększa liczbę zdarzeń niepożądanych, takich jak zagrożenie i utrata życia ludzkiego, a także uszkodzenia konstrukcji budynków i mienia. **Pożary instalacji fotowoltaicznej spowodowane są przede wszystkim przez:**

- błędy w projektowaniu (np. zły dobór kabli, złączek, niewłaściwie dobrany materiał);
- nieprawidłowy montaż (złe podłączenie kabli, wtyczek, złączek, zła jakość materiałowa tych podzespołów),
- brak przeszkolonej i doświadczonej kadry montażowej;
- awarie elementów instalacji (przegrzewanie się paneli fotowoltaicznych, uszkodzenia inwerterów);
- brak kontroli eksploatacyjnej w postaci oceny jakości materiałów, połączeń, pomiarów rezystancji instalacji.

Rozwiązaniem problemów z rozprzestrzenianiem się pożarów powstałych w wyniku awarii instalacji fotowoltaicznych może być wprowadzenie do ich konstrukcji izolacji z aluminium w postaci mat lub pian aluminium oraz aluminium-ceramicznych (kompozytowych). Aluminium traktowane jest jako materiał niepalny, pomimo niezbyt wysokiej temperatury topnienia, bo zaledwie 660°C, przy czym aluminium zachowuje swoje właściwości mechaniczne w przypadku pożaru względnie długo. Ciepło właściwe aluminium i jego stopów waha się od 816 J/(kg·K) do 1050 J/(kg·K). Jest to wartość prawie dwukrotnie większa niż w przypadku stali (ok. 460 J/(kg·K)). W praktyce oznacza to, że aluminium o takiej ma-

sie jak stal będzie potrzebowało dwa razy więcej energii do nagrzania o 1°C. W związku z tym, aluminium elementy konstrukcyjne oraz izolacje będą rozgrzewane dwa razy dłużej niż stalowe, a tym samym materiał będzie trwalszy niż stal, zanim zacznie się topić [8]. Właściwość ta zwiększa niezawodność aluminium podczas pożaru i rekompensuje jego dosyć niską temperaturę topnienia, zwiększając czas potrzebny do osiągnięcia temperatury topnienia. Ponadto należy podkreślić, że aluminium nie wspomaga procesu palenia, gdyż nie pali się w atmosferze powietrza, lecz dopiero wówczas, gdy zamiast powietrza atmosferycznego otoczone jest czystym tlenem [9]. Aluminium może zatem stanowić zabezpieczenie przeciwogniowe, gdy zastosujemy je jako izolację w instalacjach fotowoltaicznych. Trzeba jednak pamiętać, że instalacje te ze względu na umiejscowienie, np. na dachach budynków, muszą mieć określoną masę, dlatego też proponujemy stosowanie lekkich struktur aluminium w postaci spienionej.

Piany aluminium-ceramiczne są wytwarzane przez spienianie kompozytu zawieszinowego (w aluminium znajdują się najczęściej cząstki SiC [10]). Ze względów przeciwpożarowych piany aluminium lub aluminium-ceramiczne powinny mieć, po stopieniu w temperaturze nawet znacznie wyższej od temperatury topnienia, strukturę nieciągłej zawiesziny wtrąceń stałych w ciekłym metalu nieposiadającą konsystencji ciekłej [11]. Ciągłość zawiesziny zależy od zawartości fazy stałej. Graniczną zawartość fazy stałej, powyżej której zawieszina traci ciągłość, opisuje zależność (1) [12]:

$$v_s = \frac{\pi}{6} \left[\frac{1}{1 + \sqrt{\phi \cdot \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}} \right]^3 \quad (1)$$

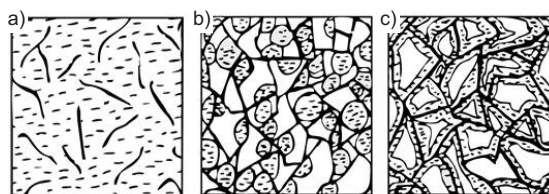
gdzie:

v_s – objętościowy udział fazy stałej w zawieszynie, powyżej którego traci ona ciągłość;
 θ – kąt zwilżania cząstek stałych przez ciecz w atmosferze powietrza [°].

Wartości v_s obliczone z zależności (1) są małe w porównaniu z wynikającymi z technologii kompozytów zawieszinowych [13]. Należy więc przyjąć założenia [11], że:

- ciągłość zawiesziny występuje wówczas, gdy ciecz wypełnia przestrzenie między cząstkami zbrojenia, co przedstawiono na rysunku 2a;

- utrata ciągłości fazy ciekłej następuje wówczas, gdy przestrzenie pomiędzy cząstkami fazy stałej nie są całkowicie wypełnione cieczą, co powoduje, że cząstki te mogą się bezpośrednio stykać (rysunki 2b i 2c).



Rys. 2. Struktura zawiesziny: a) z ciągłą fazą ciekłą; b) z nieciągłą fazą ciekłą słabo zwilżającą fazę stałą; c) z nieciągłą fazą ciekłą dobrze zwilżającą fazę stałą [11]
Fig. 2: Suspension structure: a) with continuous liquid phase; b) with discontinuous liquid phase with poor wetting of the solid phase; c) with discontinuous liquid phase with good wetting of the solid phase [11]

Można więc przyjąć, że:

$$\frac{v_{rz}}{v_p} = \frac{\rho_p}{\rho_{rz}} \quad (2)$$

gdzie:

v_{rz} – objętość rzeczywista fazy stałej;
 v_p – objętość pozorną (nasypową) cząstek fazy stałej;
 ρ_{rz} – gęstość rzeczywista fazy stałej [kg/m³];
 ρ_p – gęstość pozorną cząstek fazy stałej [kg/m³]
 zatem

$$v_p = \frac{\rho_p}{\rho_{rz}} \quad (3)$$

Słuszność takiego podejścia została zweryfikowana zastosowaniem modelu fizycznego zawiesziny oraz zawiesziny cząstek Al_2O_3 w ciekłym żużlu porafinacyjnym złożonym z soli [13]. Przedstawione rozważania dotyczą zawieszin żużlowych, ale mogą być z powodzeniem zastosowane w przypadku zawieszin cząstek stałych w ciekłym metalu, np. aluminium, z którego wytworzono pianę. Zatem przez analogię stwierdzono, że:

- w wyniku stopienia piany z aluminium, jego stopów i kompozytów ważne, ze względów przeciwpożarowych, byłoby uzyskanie nieciągłej zawiesziny cząstek stałych w ciekłym metalu;

■ uzyskanie takiej mieszaniny uwarunkowane jest: procentowym udziałem masowym cząstek stałych oraz kształtem tych cząstek.

Wyznaczenie gęstości potrzebnej do oszacowania ciągliwości pian aluminium oraz zawieszin powstałych w wyniku ich stopienia jest trudne.

W [11] porównano dwa rodzaje pian: aluminiową i aluminiowo- ceramiczną (zbrojoną cząstkami SiC). Próbkę piany topiono w piecu w atmosferze powietrza w temperaturze 800°C. Produkty stopienia przedstawiono na fotografii 1. Stwierdzono, że piana aluminiowa, pozbawiona cząstek SiC, ma strukturę niejednorodną. Występowały w niej obszary zawiesziny nieciąglej (o konsystencji niepełnej) oraz obszary zawiesziny na pograniczu ciągliwości i nieciągliwości (o konsystencji półpełnej). Natomiast produkty stopienia piany aluminiowo- ceramicznej (kompozytowej) miały jednolitą strukturę nieciąglą niewykazującą zdolności do płynięcia.

a)



b)



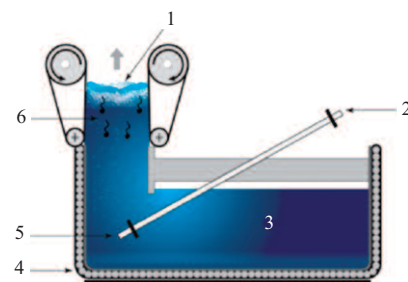
Fot. 1. Produkty stopienia: a) piany aluminiowej; b) piany aluminiowo- ceramicznej [11]
Photo 1. Products of melting of: a) aluminum foam; b) aluminum-ceramic foam [11]

Temperatura topnienia i współczynnik rozszerzalności cieplnej pian aluminium powinny być takie same, jak w przypadku podstawowych stopów aluminium. Temperatura topnienia pian aluminium jest jednak nieco wyższa niż podstawowego stopu, ponieważ pory w pianie aluminiowej są pokryte cienką warstwą Al_2O_3 o wyższej temperaturze topnienia, a tym samym zwiększają temperaturę topnienia pian aluminium do 780°C. Piany metalowe po przekroczeniu tej temperatury płyną. Zgodnie z normą PN-EN ISO 1182 [15] materiały niepalne muszą zachowywać stabilność w określonym czasie i temperaturze (750°C). Dodatek do ciekłego aluminium (lub jego stopu) dostatecznie dużej liczby ceramicznych cząstek stałych (np. SiC) może wpłynąć na przerwanie ciągliwości fazy ciekłej, dlatego wykonaliśmy badanie niepalności pian aluminium i aluminiowo- ceramicznych metodami wg PN-EN ISO 1182 [15] i Kodeksu FTP część 1 IMO [16], aby ocenić słuszność określonych zagadnień i potwierdzić możliwość stosowania tych materiałów na izolacje przy instalowaniu np. paneli fotowoltaicznych.

Materiał i metoda badań

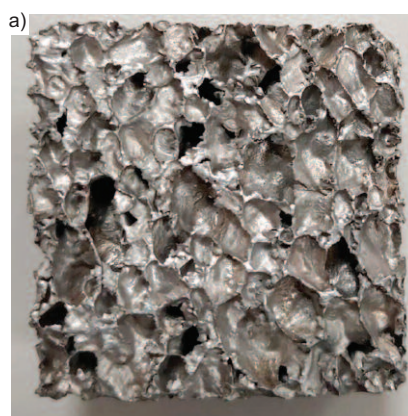
Piany wytworzono metodą wdmuchiwania gazu (ang. *gas blowing*), w tym przypadku powietrza, do ciekłego aluminium lub kompozytu aluminiowo- ceramicznego (rysunek 3). Kompozyt do wytwarzania pian aluminiowo- ceramicznych składał się z aluminium i 15% masowych cząstek SiC. Podczas spieniania mieszadło pracowało w sposób ciągły z prędkością 150 obr/min i jednoczesnym wypływem gazu spieniającego (powietrze) 8 dm³/min. Jest to metoda prosta technologicznie oraz tania. Wymaga jednak dużego doświadczenia i precyzyjnego sterowania parametrami procesu, aby zapewnić powtarzalność strukturalną wyrobu, który kształtuje się w tej metodzie po procesie technologicznym. Strukturę gotowych produktów przedstawiono na fotografii 2.

Badanie niepalności materiałów metodami wg PN-EN ISO 1182 i kodeksu FTP część 1 IMO wykonano w akredytowanym laboratorium „Syhta Laboratorium Sp. J.” [17]. Zgodnie z PN-EN ISO 1182 [15] badanie prze-

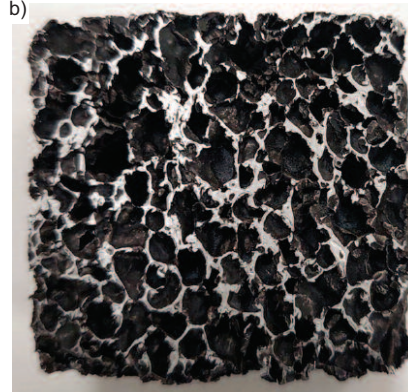


Rys. 3. Schemat wytwarzania pian metodą wdmuchiwania gazu; 1 – wytworzona piana; 2 – gaz podawany do przedmuchu; 3 – ciekły metal lub stop metalu; 4 – podgrzewana komora na ciekły metal; 5 – rotor prowadzący gaz; 6 – drenaż piany

Fig. 3. Scheme of foam production by the gas blowing method; 1 – produced foam; 2 – gas supplied for blowing; 3 – liquid metal or metal alloy; 4 – heated chamber for liquid; 5 – rotor distributing gas; 6 – foam drainage



b)

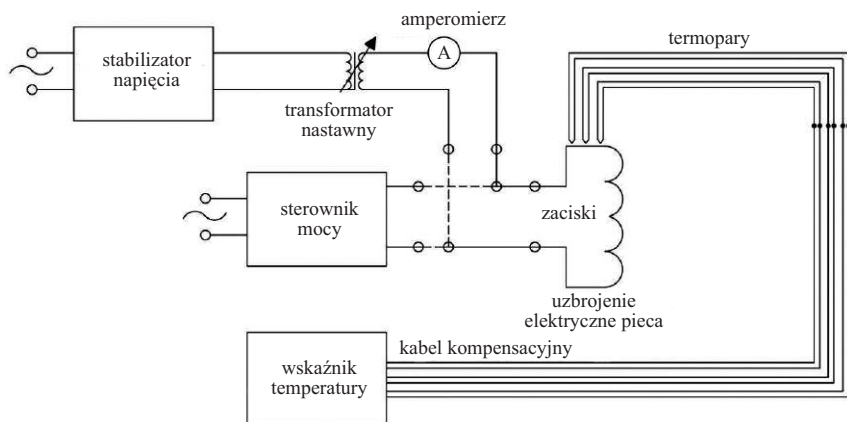


Fot. 2. Badania makroskopowe: a) piany aluminiowej; b) piany aluminiowo- ceramicznej

Photo 2. Macroscopic examination: a) aluminum foam; b) aluminum-ceramic foam

prowadza się w elektrycznym piecu rurowym o średnicy wewnętrznej 75 mm (rysunek 4), który przed badaniem należy rozgrzać do ustabilizowanej temperatury 750 ± 5°C.

Podczas badania określa się: temperaturę pieca w funkcji czasu; temperaturę powierzchni próbki w funkcji czasu;



Rys. 4. Stanowisko do badania niepalności materiałów
Fig. 4. Station for testing non-flammability of materials

temperaturę wewnątrz próbki w funkcji czasu; czas zapłonu próbki; czas zakończenia palenia się próbki oraz ubytek masy próbki. Badanie prowadzi się do momentu uzyskania końcowej równowagi cieplnej. Przyjmuje się, że ten stan został osiągnięty, gdy szybkość zmian temperatury pieca, powierzchni próbki i wnętrza próbki nie przekracza $0,2^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

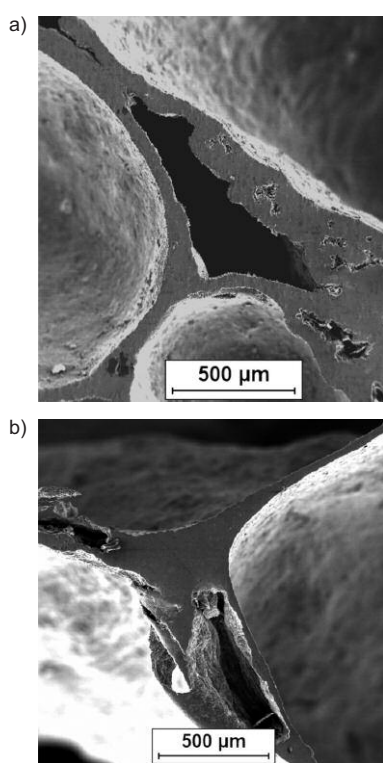
Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów oblicza się czas palenia się próbki, maksymalny przyrost temperatury pieca, maksymalny przyrost temperatury powierzchni próbki, maksymalny przyrost temperatury wnętrza próbki i względny ubytek masy próbki. Uzyskane wyniki stanowią podstawę do klasyfikacji reakcji na ogień badanego materiału. Badaniu poddaje się 5 próbek w kształcie walca o średnicy 45 mm i wysokości 50 mm (fotografia 3).

Na fotografii 4 przedstawiono strukturę pian aluminium (a) i aluminiowo-ceramicznych (kompozytowych) – (b) poddanych próbie palności. Wi-



Fot. 3. Widok próbek pian aluminium i aluminiowo-ceramicznych przed badaniem niepalności

Photo 3. View of aluminum and aluminum-ceramic foam samples before non-flammability tests



Fot. 4. Widok SEM: a) piany aluminium; b) piany kompozytowej

Photo 4. SEM view of: a) aluminum; b) composite foam

doczne są wyraźnie pustki o różnej wielkości i kształcie powstałe w wyniku spieniania. Piany charakteryzują się różnorodną strukturą niepozbawioną wad, takich jak np. brak ciągłości czy pęknięcia w ściankach piany.

Omówienie wyników

Ocena niepalności pian aluminium metodami wg PN-EN ISO 1182 i kodeksu FTP część 1 IMO. Wyniki badań piany aluminiowo-ceramicznej

wraz z wykresem ilustrującym przebieg zmian temperatury w funkcji czasu przedstawiono w tabeli 1 i na rysunku 5, z którego wynika, że piany aluminiowo-ceramiczne są materiałem niepalnym, gdyż wytrzymują wymagany normą czas w temperaturze $750 \pm 5^{\circ}\text{C}$. Na fotografii 5 przedstawiono widok próbki piany aluminiowo-ceramicznej po badaniu palności, a w tabeli 2 końcowe wyniki badania niepalności pian aluminiowych i aluminiowo-ceramicznych.

Prezentowane badanie polega na analizie zjawisk termodynamicznych zachodzących podczas nagrzewania próbki w wysokiej temperaturze w piecu o kształcie cylindrycznym. Metoda przeznaczona jest do oznaczania niepalności materiałów budowlanych i okrętowych.

Tabela 1. Wyniki badań palności próbki piany aluminiowo-ceramicznej zgodnie z PN-EN ISO 1182 [15]

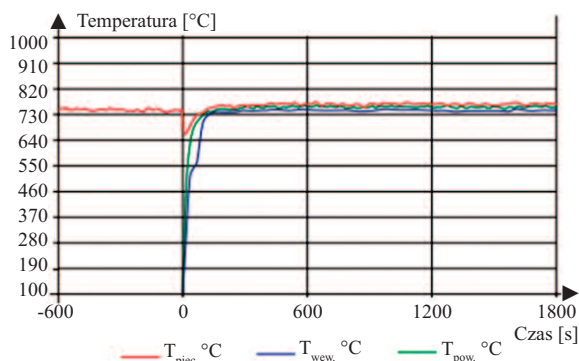
Table 1. Results of testing the flammability of an aluminum ceramic foam sample in accordance with PN-EN ISO 1182 [15]

Warunki pomiaru	temperatura otoczenia: 20°C ciśnienie atmosferyczne: 1011 hPa sezonowanie: w temperaturze $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ oraz w wilgotności $(50 \pm 5)^{\circ}\text{C}$, aż do osiągnięcia stałej masy
Masa próbki [g]	masa początkowa: 11,63 g masa końcowa: 11,58 g względny ubytek masy: 0,43%
Czas [s]	spalanie próbek: 0,00 s pomiar: 1800 s
Temperatura maksymalna [$^{\circ}\text{C}$]	piec: $(772 \pm 0,6)^{\circ}\text{C}$ powierzchnia próbki: $(765 \pm 0,8)^{\circ}\text{C}$ wnętrze próbki: $(749 \pm 0,6)^{\circ}\text{C}$



Fot. 5. Widok piany aluminiowo-ceramicznej po badaniu palności

Photo 5. View of aluminum ceramic foam after flammability test



Rys. 5. Przebieg zmian temperatury w funkcji czasu zarejestrowany podczas próby palności piany kompozytowej: T_{piec} – temperatura pieca w funkcji czasu; T_{pow} – temperatura powierzchni próbki w funkcji czasu; T_{wew} – temperatura wewnątrz próbki w funkcji czasu (badanie wykonano na zlecenie Politechniki Morskiej w Szczecinie w „Sychta Laboratorium Sp. J.”)

Fig. 5. The course of temperature changes in a time function, recorded during flammability tests of composite foam, where T_{furnace} – temperature of the furnace in a time function; T_{surface} – temperature of the sample surface in a time function; T_{inside} – temperature inside the sample in a time function (the test was made for the Maritime University of Szczecin in “Sychta Laboratorium Sp. J.”)

Tabela 2. Wyniki końcowe badań

Table 2. Final results of the study

Mierzony parametr	Średnia – 5 pomiarów	Odchylenie standardowe
Masa początkowa próbki [g]	14,20	2
Masa końcowa próbki [g]	14,10	2
Temperatura początkowa pieca [°C]	749	1
Czas pomiaru [s]	1860	134
Temperatura maksymalna pieca [°C]	778	2
Temperatura maksymalna powierzchni próbki [°C]	779	5
Temperatura maksymalna wnętrza próbki [°C]	758	4
Temperatura końcowa pieca [°C]	773	3
Maksymalny przyrost temperatury pieca [°C]	5	0,6
Temperatura końcowa powierzchni próbki [°C]	769	4
Maksymalny przyrost temperatury powierzchni próbki	3	0,8
Temperatura końcowa wnętrza próbki [°C]	755	4
Maksymalny przyrost temperatury wnętrza próbki [°C]	3	0,6
Czas palenia się próbki płomieniem [s]	0	0
Wzrost temperatury pieca [°C]	4,2	1
Wzrost temperatury powierzchni próbki [°C]	3	1
Wzrost temperatury wnętrza próbki [°C]	3	1
Względny ubytek masy [%]	0,5	0,4

Wnioski

Z przeprowadzanych badań wynika, że piana aluminiowa po stopieniu może nie mieć konsystencji ciekłej i nie wykazywać zdolności do płynięcia, co jest korzystne ze względów przeciwpożarowych. Jest to efekt tego, że może być nieciągłą zawieszoną cząstek stałych w ciekłym metalu. Cząstki tworzące zawieszinę, to cząstki stałe zbrojenia ceramicznego

SiC, z którego wykonano pianę oraz błonki tlenkowe powstałe na rozwinętej powierzchni metalu, stanowiącej powierzchnię pęcherzy zawartych w pianie.

Zdolność piany do tworzenia po stopieniu nieciągłej zawiesziny można intensyfikować przez wprowadzanie stałych cząstek SiC do aluminium, z którego wytwarza się pianę.

Zgodnie z przedstawioną definicją [18, 19], piana aluminiowo-ceramiczna jest niepalna, gdyż wytrzymuje temperaturę 750°C w czasie określonym przez normę PN-EN ISO 1182 [14]. Uzyskane wyniki pozwalają na wskazanie możliwości zastosowania pian aluminiowych i aluminiowo-ceramicznych w inżynierii lądowej i morskiej, ale dopuszczenie materiału do stosowania wymaga przeprowadzenia dalszych badań określających cechy fizyczne i mechaniczne materiału, co będzie przedstawione w kolejnych publikacjach.

Literatura

- [1] Den Ouden B, Kerkhoven J, Warnaars J, Terwel R, Coenen M, Verboon T, Tihiönen T, Koot A. Klimaatneutrale energietransitie in behoeve van de integrale infrastructuurverkenning 2030-2050. Berenschot Groep B.V. 2020, https://www.netbeheernederland.nl/_upload/Files/Toekomstscenario%27s_64_9ab35ac320.pdf, data dostępu 17.05.2022.
- [2] <https://biznesalert.pl/netbeheer-nederland-niderlandy-transformacja-energetyczna-oze-fotowoltaika/data-dostepu-17.05.2022>.
- [3] Krzoss G, Rybaczek S. Koncepcja podnoszenia poziomu samowystarczalności energetycznej na przykładzie wysp Uznam i Wolin. In: Kurtz-Orecka K, Tuchowski W, Przepiórski J, editors. Wyspy Uznam i Wolin – lokalne uwarunkowania globalnej transformacji. Monografia projektu INT190 Modelowy Region Energii Odnawialnych Wysp Uznam i Wolin. Szczecin: Wyd. Zachod-

niopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie; 2022. pp. 308-318.

[4] Piliński M. Bezpieczeństwo instalacji fotowoltaicznych, „Rynek fotowoltaiczny” – dodatek do „Magazynu Rynek Elektryczny” 2019; 3.

[5] Sepanski A et al. Assessment of the fire risk in PV-arrays and development of security concepts for risk minimization. Köln: TÜVRheinland Energie und Umwelt GmbH; 2015.

[6] <https://enerad.pl/aktualnosci/pozar-fotowoltaiki/> data dostępu 18.05.2022.

[7] Dz.U. 2020.471 Ustawa z 13 lutego 2020 r. o zmianie ustawy – Prawo budowlane oraz niektórych innych ustaw.

[8] Gilbert Kaufman J. Fire Resistance of Aluminum and Aluminum Alloys Measuring the Effects of Fire Exposure & on the Properties of Aluminum Alloys. Novelty OH: ASM International Materials Park; 2016.

[9] https://www.capral.com.au/wordpress/wp-content/uploads/Fire-Safety-of-Aluminium-and-its-Alloys_20210112_v2.pdf data dostępu 17.05.2022.

[10] Gawdzińska K, Chybowski L, Beijer A, Kriple S. Determination of technological parameters of saturated composites based on sic by means of a model liquid, Metalurgija. 2016; 55: 659-62.

[11] Grabian J, Gawdzińska K, Szweyger M. Behaviour of aluminum foam under fire conditions. Archives of Foundry Engineering. 2008; 8 (2): 41-4.

[12] Ślezione J. Kształtowanie właściwości kompozytów stop Al – cząstki ceramiczne wytwarzanych metodami odlewniczymi. Politechnika Śląska Zeszyty Naukowe. 1994; 1258.

[13] Sobczak J. Kompozyty metalowe. Kraków – Warszawa: Instytut Odlewnictwa, Instytut Transportu Samochodowego; 2001.

[14] Witczak D. Mechanizm zągęszczania żużla ekstrahującego stałe wtrącenia niemetaliczne z aluminium i jego stopów. Praca doktorska. Poznań: Politechnika Poznańska; 1998.

[15] PN-EN ISO 1182-12: 2020 Badania reakcji na ogień wyrobów – Badania niepalności.

[16] International Code for Application of Fire Test Procedures. Part 1. The International Maritime Organization; 2010.

[17] <http://www.sychta.eu/pn-en-iso-1182.html> data dostępu 25.05.2022.

[18] Fangrat J, Machnowski W. Włókiennicze wyroby wyposażenia wnętrza a bezpieczeństwo pożarowe budynków. Przegląd Włókienniczy. 2003; 10: 16.

[19] Bogalecka M. Pożary jako przyczyny wypadków statków morskich w ujęciu statystycznym. BiTP. 2015; 37: 171-80.

Podziękowania

Praca naukowa współfinansowana z Programu Interreg V A Meklemburgia-Pomorze Przednie/Brandenburgia/Polska w ramach projektu międzynarodowego INT190 MoRE „Modelowy Region Energii Odnawialnych Wysp Wolin i Uznam” oraz ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach programu „PMW” w latach 2020 – 2022; umowa nr 5195/INTERREGVA MV/BB/PL/2021/2.

Przyjęto do druku: 21.12.2022 r.