

Wojciech Kucharczyk

Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny, Instytut Budowy Maszyn, Zakład Inżynierii Powierzchni i Sprzętu Mechanicznego
ul. Malczewskiego 29, 26-600 Radom, Poland

* Corresponding author. E-mail: wojciech.kucharczyk@pr.radom.pl

Otrzymano (Received) 29.02.2008

KSZTAŁTOWANIE ABLACYJNYCH WŁAŚCIWOŚCI TERMOOCHRONNYCH POLIMEROWYCH KOMPOZYTÓW PROSZKOWYCH

Polimerowe kompozyty ablacyjne można wykorzystać w projektowaniu pasywnych zabezpieczeń ogniotrwałych konstrukcji nośnych budowli wielokubaturowych, tuneli komunikacyjnych oraz do ochrony danych elektronicznych, optycznych, magnetycznych itp. Kształtowanie ablacyjnych właściwości termoochronnych polega na poszukiwaniu materiałów o dużym cieple właściwym $c_p(t)$ i dużej gęstości ρ oraz o niskim współczynniku przewodzenia ciepła $\lambda(t)$ (czyli małej dyfuzyjności cieplnej $\alpha(t)$ (wzór (2)). Takie warunki mogą spełniać proszkowe kompozyty polimerowe z wysokotopliwymi napelniającymi ceramicznymi, np. z: węglikiem krzemu SiC, tlenkiem aluminium Al_2O_3 , roztworem stałym WCTiC lub proszkiem wolframu W. Zaprezentowano założenia do konstytuowania ablacyjnych właściwości termoochronnych osłon autonomicznych o osnowie fenolowo-formaldehydowej oraz powłok wytworzonych na bazie żywicy epoksydowej, modyfikowanych wysokotopliwymi napelniającymi proszkowymi. Badania opisują wpływ komponentów na właściwości ablacyjne: średnią szybkość ablacji v_a [$\mu\text{m/s}$], względny ablacyjny ubytek masy U_a [%], temperaturę tylną powierzchni ścianki próbki izolującej t_s [$^{\circ}\text{C}$] kompozytu. Kompozyty fenolowo-formaldehydowe posiadają niższe niż kompozyty epoksydowe ablacyjne właściwości termoochronne (v_a , t_s). Mają jednak niższą U_a oraz wyższą wytrzymałość R_m , które to cechy są istotne w przypadku osłon autonomicznych. Jednocześnie zastosowanie wyższych zawartości SiC i proszku wolframu W powoduje poprawę wszystkich właściwości ablacyjnych kompozytów.

Słowa kluczowe: osłony i powłoki ablacyjne, kompozyty polimerowe, napelniacze wysokotopliwe, materiały termoochronne

MODIFICATION OF THERMO-PROTECTIVE ABLATION PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITES WITH PULVERACEOUS FILLERS

The ablation materials are useful in all kind of thermo-protective systems to design shields and coats – not only in space shuttles and missile constructions, but also in civil applications too. The results of research should be used due the fire protection of modern building constructions and in tunnelling designing. Polymer ablative materials can be used also as protections of electronic, optic and magnetic data. The ablative composites have the better thermo-protective properties when the components have: high density ρ , high thermal capacity $c_p(t)$ and small thermal conductivity $\lambda(t)$, so small thermal diffusivity too $\alpha(t)$ (formula 2). These conditions could be kept by polymer resins with ceramic high-fusible fillers. For example: SiC, Al_2O_3 , WCTiC or tungsten powder W. The ways of modification thermo-protective ablative properties of polymer autonomic shields (with phenolic- of formaldehyde matrix (F-F)) and paint coats with epoxy matrix (E) by high-fusible fillers were presented. The research carried out on this project is an attempt to explain the effect of ablation material components on the average linear rate of ablation v_a , the mass waste U_a and the back side temperature of specimen t_s . Phenolic- of formaldehyde composites have worse thermo-protective ablation properties (v_a , t_s) than epoxy. However (F-F) composites have lower U_a and higher R_m than epoxy have, and this are essential guilds in the case of autonomous shields. The simultaneous use of higher contents: SiC and the tungsten powder W improves all ablation properties of composites.

Keywords: ablative shields and coats, polymer composites, high-fusible fillers, thermo-protective materials

WPROWADZENIE

Zastosowanie modyfikowanych tworzyw polimerowych w roli kompozytów ablacyjnych jako materiałów chroniących przed nadmiernym wzrostem temperatury wiązało się od połowy XX wieku bezpośrednio z przemysłem zbrojeniowym oraz z techniką lotniczą, raketową i kosmiczną [1, 2]. Materiały te można również

wykorzystać w projektowaniu pasywnych zabezpieczeń ogniotrwałych konstrukcji nośnych budowli wielokubaturowych [3], tuneli komunikacyjnych [4] oraz do ochrony danych elektronicznych, optycznych, magnetycznych itp. [5].

W ostatnich dziesięciu latach seria katastrof budowlanych, w których nagłe pojawienie się wysokotemperaturowego strumienia ciepła miało decydujące znaczenie w zapoczątkowaniu procesu gwałtownej destrukcji tych budowli, przyczyniła się do zmiany kierunku badań [3, 5].

Zagadnienie opracowania składów i przebadania pod kątem właściwości termoochronnych materiałów ablacyjnych nabrało znaczenia w związku z istniejącym zagrożeniem terrorystycznym, co zostało uwzględnione w ramach programu NATO - DAT (*Defence Against Terrorism*). Na podstawie analizy skutków ataków terrorystycznych w Oklahoma City, na World Trade Center, itp., szczególnie w USA, testuje się zachowanie się tego typu materiałów. Zaczynają one być stosowane do ochrony nielicznych, ale ważnych obiektów użyteczności publicznej, do zabezpieczania konstrukcji nośnych budowli architektonicznych oraz urządzeń funkcjonujących w warunkach zagrożenia pożarowego lub krótkotrwałego intensywnego oddziaływania strumienia cieplnego - np. danych przechowywanych na nośnikach elektronicznych, optycznych, magnetycznych itp. Jak dotąd brak jest zainteresowania w kraju ablacyjnymi termoochronnymi tworzywami konstrukcyjnymi do takich zastosowań.

Oslony autonomiczne oraz powłoki ablacyjne - zarówno malarskie, jak i nanoszone metodą natryskową, pozwalają chronić elementy konstrukcji budowlanych, a także zgromadzone w pomieszczeniach magazynowych dane przechowywane na nośnikach elektronicznych podczas obciążeń cieplnych zbliżonych do ekstremalnych. Klasyczne materiały i systemy przeciwpożarowe nie dają takiej możliwości [3], gdyż w sytuacjach awaryjnych nawet szybkie stłumienie ognia nie zmniejsza przewodzenia ciepła przez ściankę osłony w stopniu uniemożliwiającym przekroczenie dopuszczalnej temperatury pracy nośnika danych elektronicznych (powyżej 50°C) czy też temperatury krytycznej konstrukcji stalowej. Wzrost temperatury stalowych elementów nośnych konstrukcji budowli wielokubaturowych powyżej 800°C może spowodować nawet o 6÷8 razy spadek wytrzymałości na rozciąganie stali i prawie o 2 razy zmniejszenie jej sztywności [6].

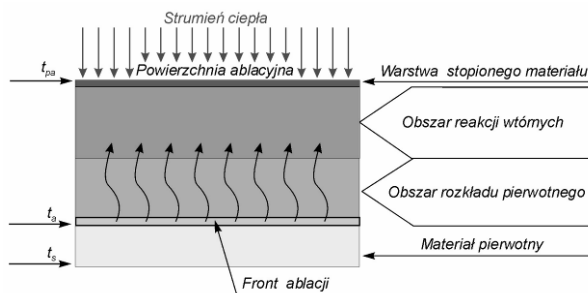
ABLACJA KOMPOZYTÓW POLIMEROWYCH

Modele fizyczne ablacji są tworzone dla ściśle zdefiniowanych przypadków. Można jednak wyodrębnić pewne elementy wspólne, które pozwolą na stworzenie ogólnego modelu ablacji. Wyróżnia się w nim (rys. 1): *powierzchnię ablacyjną*, *powierzchnię rozkładu* zwaną *frontem ablacji* oraz *warstwę ablacyjną*, znajdującą się między powierzchnią ablacyjną i frontem ablacji.

Proces ablacyjny zaczyna się, gdy temperatura powierzchni ablacyjnej osiąga wartość, w której następuje rozkład termiczny polimerowej osnowy materiału abla-

cyjnego. Procesy chemiczne zachodzące w warstwie ablacyjnej można podzielić na grupy:

- reakcje rozkładu termicznego i pirolizy w organicznej osnowie materiału;
- przemiany termochemiczne gazowych i stałych produktów rozkładu;
- reakcje chemiczne pomiędzy gazowymi i stałymi produktami rozkładu;
- reakcje i przemiany w fazie ciekłej.



Rys. 1. Schemat fizycznego modelu ablacji: t_{pa} - temperatura powierzchni ablacyjnej, t_a - temperatura frontu ablacji, t_s - temperatura tylnej powierzchni ścianki izolującej [2]

Fig. 1. The physical ablation model: t_{pa} - temperature of ablative surface, t_a - temperature of ablation, t_s - back side temperature of specimen [2]

Ablacja jest samoregulującym się procesem wymiany ciepła i masy, w wyniku którego na skutek przemian fizycznych oraz reakcji chemicznych dochodzi do nieodwracalnych zmian strukturalnych i chemicznych materiału z równoczesnym pochłanianiem ciepła. Proces ten jest inicjowany i podtrzymywany z zewnętrznych źródeł energii cieplnej.

W procesie ablacji strumień energii zużywany jest na:

- depolimeryzację organicznych składników kompozytu;
- topnienie, parowanie i sublimację łatwo topliwych napełniaczy kompozytu i produktów depolimeryzacji;
- endotermiczne reakcje pomiędzy składnikami kompozytu i produktami depolimeryzacji;
- nagrzewanie produktów odprowadzanych do otoczenia;
- nagrzewanie warstwy wierzchniej obiektu i obszarów pod nim leżących;
- konwekcyjną wymianę ciepła z otoczeniem;
- wymianę ciepła przez promieniowanie.

PRZEWODZENIE CIEPŁA W CIELE STAŁYM

Wymiana ciepła w ciałach stałych jest opisana przez równanie różniczkowe nieustalonego przewodzenia ciepła *Fouriera-Kirchhoffa* (1). W przypadku wymiany ciepła pomiędzy gazem i ciałem stałym potrzebna jest jeszcze znajomość współczynnika przejmowania ciepła $\alpha(t)$ na granicy ośrodków oraz rozkład temperatury gazu przy powierzchni ciała stałego:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial \lambda}{\partial t} \left[\left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{q_v}{\rho c_p} \quad (1)$$

$$\alpha(t) = \frac{\lambda(t)}{\rho c_p(t)} \quad (2)$$

gdzie: t - temperatura, τ - czas, a - dyfuzyjność cieplna, ρ - gęstość, c_p - ciepło właściwe, λ - współczynnik przewodzenia ciepła, q_v - wydajność wewnętrznych źródeł ciepła.

Kształtowanie *ablacyjnych właściwości termoochronnych* polega na poszukiwaniu materiałów o dużym ciepłe właściwym $c_p(t)$ i dużej gęstości ρ oraz o niskim współczynniku przewodzenia ciepła $\lambda(t)$ (czyli małej dyfuzyjności cieplnej $\alpha(t)$ (2)). W kompozytach polimerowych po przekroczeniu temperatury ablacji t_a (rys. 1) występują reakcje endotermiczne związane z rozkładem termicznym materiału osnowy, które powodują, że efektywne ciepło właściwe c_p żywicy osiąga wysokie wartości. W czystej postaci żywice te są dobrym materiałem ablacyjnym. Jednak, ze względu na ich mięknięcie oraz porowatość i kruchość tworzącej się warstwy ablacyjnej, wymagają „zbrojenia” wysokotopliwymi napełniaczami sybkimi lub włóknistymi, szczególnie zaś tymi o dużej gęstości, np. proszkiem wolframu lub jego węglikiem.

Temperatura ablacji zależy od rodzaju i składu chemicznego tworzywa wielkocząsteczkowego. Dla większości materiałów organicznych mieści się w zakresie od 150 do 300°C [2].

BADANIA ABLACYJNYCH WŁAŚCIWOŚCI TERMOOCHRONNYCH

Celem przeprowadzonych badań było opracowanie i zweryfikowanie założeń do konstruowania zarówno polimerowych powłok, jak i osłon autonomicznych modyfikowanych napełniaczami proszkowymi, służących do ochrony przed krótkotrwałym oddziaływaniem wysokotemperaturowego strumienia cieplnego.

Badania procesów ablacyjnych realizowano, zakładając, że: charakterystyki termofizyczne komponentów ($\lambda(t)$, $\alpha(t)$, $c_p(t)$) są wyłączną funkcją temperatury; strumień doprowadzanego podczas próby ablacyjnej ciepła ma stałą wartość; powierzchnia ablacyjna jest izotermiczną powierzchnią frontu ablacji; pominięta jest wymiana ciepła z otoczeniem na powierzchni zewnętrznej.

Osnową kompozytowych próbek powłokowych była żywica epoksydowa *Epidian 112 (E)* sieciowana bezciśnieniowo w temperaturze pokojowej utwardzaczem poliamidowym *Saduramid 10/50* (czas utwardzania wynosił 7 dni). Na osnowę osłon autonomicznych wybrano żywice fenolowo-formaldehadowe (*F-F*):

Modofen 54S oraz *Nowolak MR* (użyte w stosunku masowym 1:1). Próbki (*F-F*) formowano pod naciskiem 0,4 MPa i utwardzono bezciśnieniowo w 150°C przez 1 h. Materiały użyte na osnowy są produkowane przez ZCh Organika-Sarżyna. Właściwości ablacyjne żywicy modyfikowano, dodając wysokotopliwe napełniacze sypkie, w tym o dużej gęstości (tab. 1).

TABELA 1. **Komponenty polimerowych kompozytów ablacyjnych (dla temperatury 20°C) [5, 8-10]**

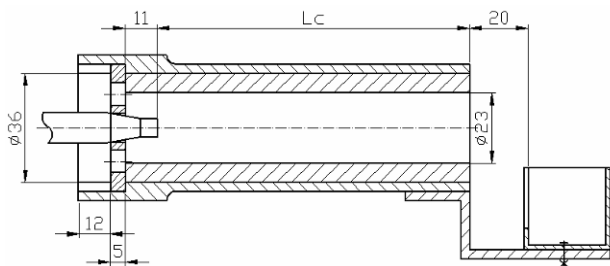
TABLE 1. **The components of ablative polymer composites (at temperature 20°C) [5, 8-10]**

Nazwa i oznaczenie	Gęstość ρ g/cm ³	Temperatura topnienia t_{top} °C	Ciepło właściwe c_p , kJ/kg·K	Współczynnik przewodzenia ciepła λ W/m·K
Osnowa epoksydowa <i>E</i>	1,1	150 (mięknięcie)	0,75 (w 30°C) [5]	0,24
Osnowa <i>F-F</i>	1,3	250 (rozkład)	0,40 (w 30°C) [5]	0,262
Al ₂ O ₃	3,7	2046	0,75	21,0
SiC	2,5	2250 (3023)	0,83	72,0
roztwór stały 50WC50TiC	12,0	3250 TiC 2630 WC		33,9 [9]
proszek W	19,0	3410	0,10	153 [10]

Udziały masowe napełniaczy proszkowych ($x_1 = \text{SiC}/(\text{SiC}+\text{Al}_2\text{O}_3)$; $x_2 = \text{W}/(\text{W}+\text{WCTiC})$) i udział masowy osnowy (x_3) stanowiły zmienne niezależne planu badań I rzędu typu 2³ z powtórzeniami (tab. 2), reprezentowanego ortogonalną macierzą pełnoczynnikową [7]. Składowymi funkcji obiektu badań były: średnia szybkość ablacji \bar{v}_a [μm/s], względny ablacyjny ubytek masy \bar{U}_α [%], temperatura tylnej powierzchni ścianki próbki izolującej \bar{t}_s [°C].

Opierając się na pozycji [9], opracowano projekt, wykonano i przetestowano układ stanowiący źródło wymuszenia cieplnego (tzw. „działo ablacyjne”). Stabilizowany strumień cieplny uzyskiwano dzięki zastosowaniu płomienia palnika acetylenowo-tlenowego o charakterze normalnym. Dobrano dwie długości czynne działa L_C (rys. 2) oraz czas badań ablacyjnych $\tau = 40$ s. Temperatura powierzchni ablacyjnej t_{pow} w zależności od długości czynnej działa oraz składu fazowego próbki, przyjmowała wartości z przedziału 1100÷1420°C. Grubość ścianki próbki izolującej wynosiła 10 mm.

Dzięki stabilizacji płomienia gazów palnych na całej powierzchni próbki uzyskano niemal jednakową wartość temperatury powierzchni ablacyjnej. Prędkość gazów palnych została zredukowana, więc zmniejszeniu uległo także ich oddziaływanie erozyjne na próbkę.



Rys. 2. Działo ablacyjne stabilizujące temperaturę płomienia gazów palnych [5]: działo wysokotemperaturowe - $L_{C1} = 65$ mm, $t_{pa} = 1300\pm 1420^\circ\text{C}$; działo niskotemperaturowe - $L_{C2} = 105$ mm, $t_{pa} = 1100\pm 1300^\circ\text{C}$

Fig. 2. Flame stabilization of flammable gases in the ablation gun [5]: high-temperature ablation gun - $L_{C1} = 65$ mm, $t_{pa} = 1300\pm 1420^\circ\text{C}$; low-temperature ablation gun - $L_{C2} = 105$ mm, $t_{pa} = 1100\pm 1300^\circ\text{C}$

TABELA 2. Składy badanych kompozytów - E i F-F
TABLE 2. Content of components

Nr	SiC %		Al ₂ O ₃ %		W %		WCTiC %		Osnowa %	
	E	F-F	E	F-F	E	F-F	F	F-F	E	F-F
1	7	8	28	32	7	8	28	32	30	20
2	28	32	7	8	7	8	28	32	30	20
3	7	8	28	32	28	32	7	8	30	20
4	28	32	7	8	28	32	7	8	30	20
5	5	7	20	28	5	7	20	28	50	30
6	20	28	5	7	5	7	20	28	50	30
7	5	7	20	28	20	28	5	7	50	30
8	20	28	5	7	20	28	5	7	50	30

Składy fazowe kompozytów przedstawiono w tabeli 2, wyniki badań ich ablacyjnych właściwości termoochronnych w tabeli 3, a graficzną interpretację wyników - z uwzględnieniem wytrzymałości na rozciąganie materiału pierwotnego - na rysunkach 3 i 4. Wszystkie wyniki badań zostały zaczerpnięte z pracy doktorskiej [5] autora niniejszego artykułu.

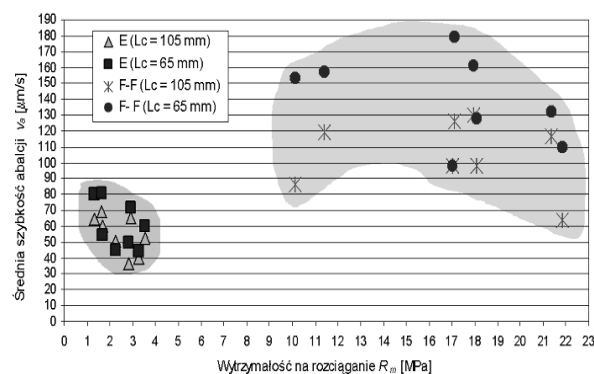
Temperatura tylnej powierzchni ścianki próbki izolującej t_s kompozytów fenolowo-formaldehydowych jest dla niskich zawartości żywicy prawie dwa razy wyższa niż w przypadku kompozytów epoksydowych. Dla większych zawartości osnowy temperatura w obu grupach jest porównywalna.

Kompozyty na bazie żywicy epoksydowej ulegają w procesie ablacji intensywnej pirolizie z wydzielaniem lotnych produktów rozkładu. Tworząca się warstwa ablacyjna nie jest spójna i stabilna, lecz krucha, bardzo porowata i samoczynnie oddziela się od materiału rodzimego. W obszarze zatrzymania się frontu ablacji następuje zwęglenie materiału osnowy próbki i tworzy się tzw. „żużel szklisty” (ang. *coke*). Warstwę ablacyjną kompozytów fenolowo-formaldehydowych stanowi również materiał porowaty, ale spójny i niewykazujący rozwarstwień.

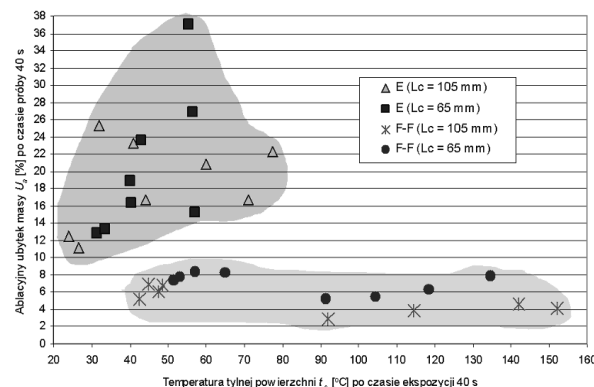
Przyjęto, że najlepsze ablacyjne właściwości termoochronne mają te spośród zbadanych kompozytów, które, zachowując wysoką wytrzymałość na rozciąganie R_m , cechują się najmniejszą średnią szybkością ablacji v_a , najmniejszym ablacyjnym ubytkiem masy U_a oraz najniższą temperaturą tylnej powierzchni ścianki próbki t_s .

TABELA 3. Wyniki badań ablacyjnych kompozytów E i F-F
TABLE 3. The results of ablation research

Nr próbki	\bar{v}_a , $\mu\text{m/s}$ dla $L_{C1} = 65 / L_{C2} = 105$		\bar{U}_a , % dla $L_{C1} = 65 / L_{C2} = 105$		\bar{t}_s , $^\circ\text{C}$ dla $L_{C1} = 65 / L_{C2} = 105$	
	E	F-F	E	F-F	E	F-F
1	44 / 40	153 / 87	19 / 17	5,2 / 2,9	40 / 44	92 / 92
2	71 / 66	179 / 126	15 / 17	6,3 / 4,1	57 / 71	119 / 152
3	60 / 53	158 / 119	24 / 20	5,5 / 3,9	43 / 60	105 / 115
4	50 / 36	161 / 130	27 / 22	7,9 / 4,6	57 / 78	135 / 142
5	45 / 51	110 / 64	13 / 11	7,4 / 5,2	32 / 27	52 / 43
6	80 / 65	128 / 98	13 / 12	8,3 / 6,8	34 / 24	65 / 49
7	55 / 60	132 / 117	37 / 23	8,4 / 6,1	56 / 41	57 / 48
8	81 / 69	98 / 98	16 / 25	7,7 / 6,9	41 / 32	53 / 45



Rys. 3. Szybkość ablacji v_a i wytrzymałość na rozciąganie R_m kompozytów
Fig. 3. The average rate of ablation v_a and the tensile strength R_m



Rys. 4. Temperatura tylnej powierzchni ścianki izolującej t_s i ablacyjny ubytek masy U_a

Fig. 4. The back side temperature of specimen t_s and the ablation mass waste U_a

Na rysunku 3 przedstawiono obie grupy kompozytów w układzie współrzędnych $R_m - v_a$ (wytrzymałość na rozciąganie - szybkość ablacji), zaś na rysunku 4 w układzie $U_a - t_s$ (ablacyjny ubytek masy - temperatura tylnej powierzchni próbki po czasie ekspozycji $\tau = 40$ s). Punktom na tych wykresach odpowiadają składy fazowe kompozytów w kolejnych próbach doświadczalnych. Zależności te są ilustracją wniosków, które dotyczą porównania ablacyjnych właściwości termoochronnych i wytrzymałości na rozciąganie obu grup kompozytów, a także wpływu temperatury powierzchni ablacyjnej t_{pa} na wartości składowych funkcji odpowiedzi.

Spośród wszystkich badanych składów materiałowych najmniejszą szybkość ablacji v_a ma próbka nr 4 - zawierająca 30% żywicy epoksydowej, a także większe udziały proszku wolframu W nad roztworem stałym WCTiC oraz węgla krzemu SiC nad tlenkiem glinu Al_2O_3 .

Najmniejszym ablacyjnym ubytkiem masy U_a charakteryzuje się próbka nr 1 z 20% udziałem żywicy fenolowo-formaldehidowej i przewagą: roztworu stałego WCTiC nad proszkiem W oraz tlenku glinu Al_2O_3 nad karborundem SiC.

Temperatura tylnej powierzchni ścianki izolującej t_s jest najniższa dla kompozytów epoksydowych oznaczonych numerami 5 i 6, zawierających 50% żywicy oraz większe udziały roztworu stałego WCTiC niż ciężkiego napełniacza wolfradowego W.

Najwyższą wytrzymałość na rozciąganie R_m można natomiast uzyskać dla 30% udziału osnów - zarówno w przypadku kompozytów epoksydowych, jak i fenolowo-formaldehidowych. Większe zawartości zarówno korundu Al_2O_3 , jak i roztworu stałego WCTiC wpływają na poprawę wytrzymałości R_m bardziej niż karborund SiC i proszek wolframu W.

WNIOSKI

1. Proszkowe kompozyty fenolowo-formaldehidowe mają niższe niż kompozyty epoksydowe ablacyjne właściwości termoochronne: ponad 2 razy większą średnią szybkość ablacji v_a oraz ponad 80% wyższą średnią temperaturę tylnej powierzchni ścianki t_s .
2. Kompozyty fenolowo-formaldehidowe cechują się większą stabilnością i spójnością materiału w warunkach eksploatacyjnych (ponad 3 razy mniejszy ablacyjny ubytek masy U_a) oraz 7 razy wyższą średnią wytrzymałością na rozciąganie R_m . Są to cechy istotne w przypadku osłon autonomicznych.
3. Trzy razy większy ubytek masy w procesie pirolizy kompozytów epoksydowych niż fenolowo-formaldehidowych nie dyskwalifikuje osnów epoksydowych do zastosowań na powłoki ablacyjne. Niższe wartości średniej szybkości ablacji v_a i niższe temperatury tylnej powierzchni ścianki t_s kompozytów epoksy-

dowych mają większe znaczenie niż spójność między warstwą ablacyjną i materiałem o niezdegradowanej strukturze oraz jego mała stabilność.

4. Wartości średniej szybkości ablacji v_a zależą głównie od rodzaju żywicy użytej na osnowę. Dla kompozytów epoksydowych szybkości te są do 2 razy mniejsze w przypadku niższej temperatury powierzchni ablacyjnej ($t_{pa} = 1100-1300^\circ C$) oraz do 2,3 razy mniejsze dla wyższej temperatury powierzchni ablacyjnej ($t_{pa} = 1300-1420^\circ C$) niż średnie szybkości ablacji v_a kompozytów fenolowo-formaldehidowych.
5. Zwiększenie do 50% zawartości żywicy epoksydowej powoduje wzrost do 90% średniej szybkości ablacji v_a oraz 50% utratę wytrzymałości na rozciąganie R_m , ale jednocześnie wpływa na obniżenie o $\frac{2}{3}$ temperatury tylnej powierzchni ścianki t_s .
6. Największy wpływ na ablacyjne właściwości termoochronne kompozytów fenolowo-formaldehidowych ma udział osnowy. Zwiększanie zawartości żywicy z 20 do 30% może spowodować: spadek średniej szybkości ablacji v_a o 40%; maksymalnie o 50% wzrost ablacyjnego ubytku masy U_a ; spadek temperatury tylnej powierzchni ścianki izolującej t_s o 70%; zwiększenie o 120% wytrzymałości na rozciąganie R_m .
7. W obu grupach kompozytów większy masowy udział wysokotopliwego napełniacza ciężkiego - proszku wolframu W - nie wywiera spodziewanego, korzystnego wpływu na wartości zmiennych wyjściowych. Zwiększenie jego zawartości - związane z równoczesnym zmniejszeniem udziału roztworu stałego WCTiC - w prawie wszystkich statystycznie istotnych oddziaływaniach indywidualnych powoduje obniżenie właściwości ablacyjnych (głównie względnego ubytku masy U_a oraz temperatury tylnej powierzchni ścianki t_s).

LITERATURA

- [1] Jackowski A., Ablacja ścianki płaskiej w warunkach erozyjnego unoszenia warstwy ablacyjnej, Biuletyn WAT, Nr 6 (460), Warszawa 1986, 23-33.
- [2] Jackowski A., Model fizyczny ablacji (opracowanie niepublikowane), WAT, Warszawa 1990.
- [3] Federal Emergency Management Agency: World Trade Center Building Performance Study: Data Collection, Preliminary Observation, and Recommendation. FEMA 403(2002, New York.
- [4] Haack A., Latest achievements and perspectives in tunnel safety, 30th ITA - World Tunnel Congress, Singapore 22-27 May 2004.
- [5] Kucharczyk W., Kształtowanie ablacyjnych właściwości termoochronnych kompozytów polimerowych napełniaczami proszkowymi, Rozprawa doktorska, Politechnika Radomska, Radom 2007.
- [6] Bielajew N.M., Wytrzymałość materiałów, Wyd. MON, Warszawa 1954.
- [7] Polański Z., Planowanie doświadczeń w technice, PWN, Warszawa 1984.
- [8] Poradnik Mechanika. w. 1.03.11. sofdis 2000-2003.

- [9] Song G.M., Zhou Y., Wang Y-J., Effect of carbide particles on the ablation properties of tungsten composites, *Materials Characterization* 2003, 50, 293-303.
- [10] Song G.M., Zhou Y., Wang Y-J., Thermomechanical properties of TiC particle reinforced tungsten composites for high temperature applications, *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 2003, 21, 1-12.