

## Dr inż. Wojciech Kucharczyk

Wydział Mechaniczny  
Politechnika Radomska  
ul. Krasickiego 54B, 26-600 Radom  
E-mail: wojciech.kucharczyk@pr.radom.pl

### Zużywanie ablacyjne i ściernie laminatów fenolowo-formaldehydowych – szklanych z napełniaczami proszkowymi

**Słowa kluczowe:** *ablacja, zużywanie ściernie, napełniacze proszkowe, laminaty szklane*

**Streszczenie.** Przedstawiono wyniki badań zużywania kompozytów polimerowych: ablacyjnego, po 30 s oddziaływania wysokotemperaturowego strumienia gazów palnych oraz ściernego, po 1000 s tarcia próbki luźnym ścierniwem w testerze *T-07*. Doświadczeniom poddano szklane laminaty fenolowo-formaldehydowe z napełniaczami proszkowymi: korundem  $Al_2O_3$  oraz pyłem węglowym *C*. Określono jakościowy i ilościowy wpływ komponentów na wartości zużywania: średnią liniową szybkość ablacji  $v_a$  oraz średnią masową intensywności zużywania  $I_z$ . Stwierdzono, że kompozyty o składach fazowych zapewniających mniejszą intensywność zużywania ściernego charakteryzują się większą szybkością zużywania ablacyjnego.

#### 1. Wstęp

Zastosowanie modyfikowanych tworzyw polimerowych, jako materiałów ablacyjnych chroniących przed nadmiernym wzrostem temperatury wiązało się od połowy XX wieku bezpośrednio z przemysłem zbrojeniowym oraz z techniką lotniczą, raketową i kosmiczną [7, 6]. Materiały te można również wykorzystać w projektowaniu pasywnych zabezpieczeń ogniotrwałych konstrukcji nośnych budowli wielkokubaturowych [12, 19], tuneli komunikacyjnych [5, 13] oraz do ochrony danych elektronicznych, optycznych, magnetycznych, itp.

Opracowanie składów, technologii wytwarzania i zbadanie właściwości materiałów ablacyjnych nabrało znaczenia w związku z istniejącym zagrożeniem terrorystycznym. Po analizie przyczyn i skutków katastrof w Oklahoma City, World Trade Center, itp. [12, 19], szczególnie w USA, prowadzone są prace badawcze, w trakcie których testowane jest zachowanie się tego typu materiałów. Zaczynają one być stosowane do zabezpieczania konstrukcji obiektów użyteczności publicznej [12, 19, 5, 13] oraz urzędzeń funkcjonujących w warunkach zagrożenia pożarowego lub krótkotrwałego, intensywnego, erozyjnego oddziaływania strumienia ciepłego.

Osłony autonomiczne oraz powłoki ablacyjne pozwalają chronić elementy konstrukcji budowlanych oraz ludzi podczas incydentalnych obciążeń cieplnych znacznie wyższych od dopuszczalnych. Klasyczne materiały ogniotrwałe nie zabezpieczają bowiem przed wzrostem temperatury na tylnych powierzchniach warstw osłonowych tak skutecznie jak materiały ablacyjne, których wysoki zastępczy opór cieplny  $r_{kp}$  [ $m^2 \cdot K/W$ ], pozwala zredukować temperaturę od kilkudziesięciu stopni do  $\sim 2000^\circ C$ , z zastosowaniem ścianek izolacyjnych o niewielkiej grubości.

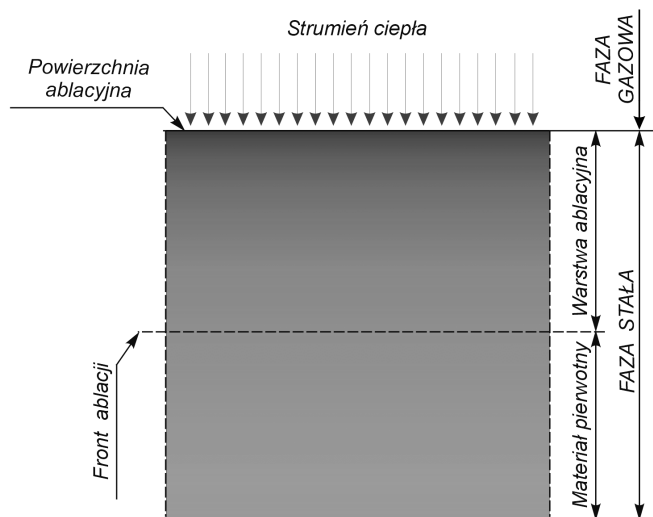
Przykładowo, według zaleceń *ITA* (*International Tunneling Association*) osłony ogniodopusne tuneli komunikacyjnych, powinny ograniczyć wzrost temperatury betonu do  $350^\circ C$  (powyżej której następuje spadek jego sztywności do 50 % wartości nominalnej [20]) oraz uchronić go przed łuszczeniem i odłupywaniem się, a zastosowane w konstrukcjach elementy stalowe nie mogą przekroczyć temperatury  $300^\circ C$  [5, 13], powyżej której zaczyna się drastyczny spadek wytrzymałości stali [2].

Mimo wieloletnich zastosowań materiałów ablacyjnych, nadal pozostają niezbadane jakościowe i ilościowe zależności między wskazanym składem fazowym, a właściwościami ablacyjnymi, w kontekście innych cech eksploatacyjnych kompozytów używanych na osłony termoochronne [8, 4, 21].

W niniejszym opracowaniu podjęto próbę odpowiedzi na pytanie, jaki wpływ na zużycie ablacyjne (wyrażone średnią liniową szybkością ablacji  $v_a$  [ $\mu\text{m/s}$ ]) ma ilościowy i jakościowy skład fazowy laminatów fenolowo-formaldehydowych - szklanych z napełniaczami proszkowymi oraz czy zużycie to ma związek z odpornością kompozytu na zużywanie ściernego materiału rodzimego (charakteryzowane średnią masową intensywnością zużywania ściernego  $I_z$  [ $\text{mg/s}$ ]).

## 2. Ablacja kompozytów polimerowych

Proces ablacji jest 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, co ogranicza nagrzewanie materiału położonego poniżej frontu ablacji (rys. 1). Dopływ ciepła do materiału powoduje przemieszczanie się w głąb frontu ablacji i zwiększanie się grubości porowatej warstwy ablacyjnej. [8]



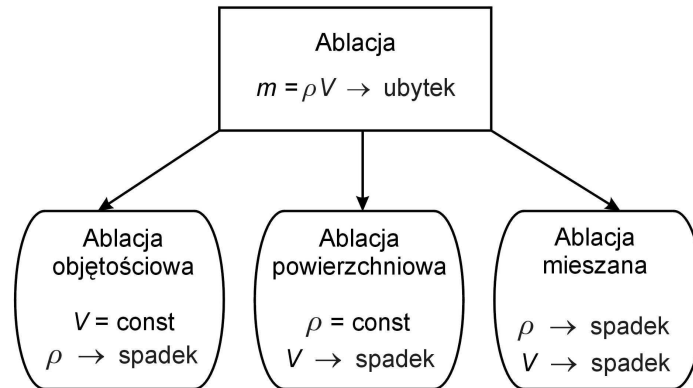
Rys. 1. Schemat fizycznego modelu ablacji [8]

W kompozytach polimerowych, po przekroczeniu temperatury ablacji zachodzą reakcje endotermiczne związane z rozkładem termicznym materiału osnowy, które powodują, że efektywne ciepło właściwe  $c_p$  żywic osiąga wysokie wartości. W czystej postaci żywice te są dobrym termoochronnym materiałem ablacyjnym [6,4,21]. Jednak, ze względu na ich mięknięcie oraz porowatość i kruchość tworzącej się warstwy ablacyjnej, wymagają dodatku wysokotopliwych napełniaczy włóknistych [7, 6, 14] lub proszkowych [17, 1].

W pracy [3] Yu.I. Dimitrienko zaprezentował klasyfikację procesu ablacji kompozytu poddanego oddziaływaniu strumienia gazów palnych (rys. 2). Proces utraty masy materiału  $m = \rho \cdot V$  (gdzie  $\rho$  jest gęstością, a  $V$  objętością) pod wpływem cieplnego i termomechanicznego oddziaływania strumienia gazu może powodować zmiany objętości albo gęstości lub zmiany obu tych wielkości równocześnie [3].

W przypadku zmiany gęstości materiału z zachowaniem stałej objętości mamy do czynienia z procesem pirolizy, charakterystycznym dla kompozytów polimerowych, przebiegającym w temperaturze  $500 \div 1000$  °C i nazywanym *ablacją objętościową*. Proces, w trakcie którego zmniejsza się objętość materiału, a jego gęstość pozostaje stała jest przypadkiem *ablacji powierzchniowej*. Jest on typowy dla utleniającego się grafitu, metali i ich stopów, szkła oraz niektórych rodzajów ceramiki ulegających topnieniu. Występowanie

jednocześnie procesów termicznej degradacji charakterystycznych dla obu powyższych grup określane jest jako *ablacja mieszana*. Przebiega ona zazwyczaj w wysokiej temperaturze (1000 ÷ 1500 °C) i jest skutkiem cieplnego, jak i erozyjnego oddziaływania strumienia gazu. We wszystkich powyższych przypadkach dochodzi do ablacyjnego (a w niektórych czysto erozyjnego) zużycia materiału rodzimego. [3]



Rys. 2. Klasyfikacja głównych procesów ablacji materiałowej:  $m$  – masa,  $\rho$  – gęstość,  $V$  – objętość [3]

Do prawidłowego wykorzystania właściwości ablacyjnych materiału wymagana jest znajomość i uwzględnienie na etapie konstrukcyjno-technologicznym ablacyjnego zużycia się materiału, czyli procesu zmniejszania się czynnej objętości tworzywa nie podlegającego ablacji. Efekt ten charakteryzuje liniowa szybkość ablacji  $v_a$  [ $\mu\text{m/s}$ ], definiowana jako średnia szybkość przemieszczenia frontu ablacji, czyli średnia szybkość powstawania warstwy ablacyjnej i tworzenia tzw. „żużla szklitego”. Jej wyznaczenie umożliwia określenie chwilowego położenia frontu ablacji, a tym samym czynnej grubości ścianki izolującej [6, 1, 3, 11].

Do procesu ablacyjnego zużycia osłon termoochronnych urządzeń pracujących w warunkach zagrożenia pożarowego lub krótkotrwałego intensywnego oddziaływania strumienia cieplnego dochodzi zazwyczaj w sytuacjach awaryjnych i są to, z założenia, sytuacje incydentalne. W trakcie użytkowania urządzeń w normalnej temperaturze pracy, często obciążeniom mechanicznym, jak i eksploatacyjnym (w tym zużyciu ściernemu) podlega również ablacyjna osłona termoochronna. Obciążenia te wpływają na stan właściwości ablacyjnych jej materiału, obniżając je [7, 21, 3]. Zasadnym zatem jest zbadanie i opisanie zależności cech ablacyjnych od innych właściwości materiału, niezwiązanych bezpośrednio z wysokotemperaturowymi warunkami eksploatacyjnymi osłon termoochronnych, w tym także zależności od intensywności zużycia ściernego.

### 3. Dobór komponentów

Do wykonania próbek badawczych z laminatu szklanego z wypełnierzami proszkowymi, w oparciu o analizę literatury [7, 14, 21], zastosowano:

- 1. Materiał osnowy termoutwardzalnej:** żywice fenolowo-formaldehydowe (*Modofen 54S* oraz *Nowolak MR* użyte w stosunku wagowym 1 : 1) produkcji Zakładów Chemicznych „Organika-Sarzyna”.
- 2. Wzmocnienie włókniste:** zrównoważoną *tkaninę szklaną* STR-022 o gramaturze 250 g/m<sup>2</sup> produkowaną przez Krośnieńskie Huty Szkła „Krosno” SA.
- 3. Wypełniacze sypkie:** *korund*  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (ALO G5-4) o ziarnach wielkości 2 ÷ 5  $\mu\text{m}$  i minimalnej zawartości tlenku glinu 99,5% (95%  $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$ ), produkcji węgierskiej firmy AJKA ALUMINA; drobnoziarnisty *pył węglowy C* o ziarnistości do 5  $\mu\text{m}$  i czystości nie mniejszej niż 98%.

#### 4. Plan badań

Liczba wykonywanych doświadczeń oraz ich składy fazowe zostały ustalone na podstawie przyjętego planu badań doświadczalnych, (tab. 1) [10, 15], czyli ortogonalnej macierzy pełnoczynnikowej I rzędu typu  $2^3$  z powtórzeniami. Trzema parametrami wejściowymi  $x_i$  o wartościach kodowych na dwu poziomach (dolnym  $-1$  i górnym  $+1$ ) były składniki kompozytu:

$x_1$  – masowy udział osnowy kompozytu: 24% ( $-1$ ) i 30% ( $+1$ );

$x_2$  – liczba warstw tkaniny szklanej: 8 szt. ( $-1$ ) i 12 szt. ( $+1$ );

$x_3$  – relacja masowa korundu  $Al_2O_3$  do sumy mas obu wypełniaczy  $Al_2O_3/(Al_2O_3 + C)$ : 20% ( $-1$ ) i 80% ( $+1$ ).

Zakresy zmiennych niezależnych wynikały z przyjętych założeń projektowych składów kompozytów [9], z uwzględnieniem ograniczeń technologicznych przygotowania i utwardzenia próbek, tj., lepkości mieszaniny żywic z proszkami, możliwości przesylenia tkaniny szklanej oraz warunków sieciowania żywic fenolowo-formaldehydowych.

Składowymi funkcji odpowiedzi  $y$  (parametrami wyjściowymi) były: średnia liniowa szybkość ablacji  $v_a$  [ $\mu\text{m/s}$ ] oraz średnia masowa intensywność zużywania ściernego  $I_z$  [ $\text{mg/s}$ ].

Rzeczywiste składy fazowe, wraz z ich zapisem kodowym, badanych laminatów fenolowo-formaldehydowych zaprezentowano w tabeli 2.

Tab. 1. Pełnoczynnikowa macierz planowania I rzędu typu  $2^3$  z powtórzeniami [10, 15]

$j^*$	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$	$y_j$
1	+	-	-	-	+	+	+	-	
2	+	+	-	-	-	-	+	+	
3	+	-	+	-	-	+	-	+	
4	+	+	+	-	+	-	-	-	
5	+	-	-	+	+	-	-	+	
6	+	+	-	+	-	+	-	-	
7	+	-	+	+	-	-	+	-	
8	+	+	+	+	+	+	+	+	
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{23}$	$b_{123}$	

\* wartość „j” oznacza numer doświadczenia (numer kompozytu) o składzie określonym układem zmiennych  $x_i$

Tab. 2. Zapis zmiennych kodowych i rzeczywiste składy fazowe kompozytów

Nr próby	Masowe udziały komponentów w kompozycie [%]						
	osnowa ( $x_1$ )		tkanina szklana ( $x_2$ )		wypełniacze proszkowe ( $x_3$ )		
					$Al_2O_3$	$C$	
1	-	24	-	18	-	11,6	46,4
2	+	30	-		-	10,4	41,6
3	-	24	+	25	-	10,2	40,8
4	+	30	+		-	9,0	36,0
5	-	24	-	13	+	50,4	12,6
6	+	30	-		+	45,6	11,4
7	-	24	+	19	+	45,6	11,4
8	+	30	+		+	40,8	10,2

Współczynniki regresji:  $b_1, b_2, b_3$  oraz interakcji:  $b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$  określają wpływ danej wielkości wejściowej (lub kilku wielkości, czyli interakcje) na  $\bar{y}$ , czyli wartość wyjściową według równania funkcji obiektu badań (1) [10, 15]:

$$\bar{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (1)$$

Wartości współczynników regresji oblicza się z relacji (2):

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^8 x_{ij} \cdot \bar{y}_j}{N} \quad i = 0, 1, 2, 3 \quad (2)$$

Analiza statystyczna otrzymanych wyników prowadzona jest w celu określenia proggu istotności współczynników regresji  $b_i$  i oceny ich wpływu na wartość parametru wyjściowego  $\bar{y}$  według poniższych zależności [10, 15]. Wariancja (3) oraz błąd wyznaczenia współczynników regresji (4) wynoszą:

$$s(\bar{y}) = \sqrt{\frac{\sum d_j^2}{2N}} \quad (3) \quad s(b_i) = \sqrt{\frac{s^2(\bar{y})}{N}} \quad (4)$$

gdzie:  $d_j = \bar{y} - y_{jk}$  ( $\bar{y}$  – wartość średnia z  $k$  pomiarów;  $y_{jk}$  – wartość  $k$ -tego pomiaru w  $j$ -tym doświadczeniu;  $k = 1, 2$ ;  $N$  – liczba doświadczeń).

Istotność współczynników regresji oceniano na podstawie testu *t-Studenta*; gdzie  $t_{obl} \gg t_{tabl}$  ( $t_{tabl} = 2,306$  dla przyjętego poziomu prawdopodobieństwa  $P = 0,95$ ). Sprawdzano równanie (5), skąd po przekształceniach otrzymano zależności (6) oraz (7):

$$\frac{b_i \cdot \sqrt{N}}{s(\bar{y})} = t_{obl} \quad (5) \quad b_i = \frac{2,306 \cdot s(\bar{y})}{\sqrt{N}} \quad (6)$$

$$b_{istot} \geq b_i = \frac{2,306}{\sqrt{8}} \cdot s(\bar{y}) = 0,8153 \cdot s(\bar{y}) \quad (7)$$

## 5. Badania zużywania ablacyjnego i ściernego

### 5.1. Warunki badań ablacyjnych

Badania ablacyjne kompozytów realizowano dla przyjętych założeń: charakterystyki termofizyczne materiałów są wyłączną funkcją temperatury; strumień doprowadzanego ciepła w czasie próby ablacyjnej ma stałą wartość; powierzchnia ablacyjna jest izotermiczną powierzchnią frontu ablacji (rys. 1); pominięta jest wymiana ciepła z otoczeniem na powierzchni zewnętrznej [7, 8].

Próbki ablacyjne (kostki 10 x 25 x 35 mm) umieszczono w osłonie z ogniotrwałej płyty kartonowo-gipsowej, gdzie były poddawane oddziaływaniu strumienia gazów palnych w czasie  $\tau = 30$  sekund. Źródłem ciepła było spalanie mieszaniny gazów: acetylenu i tlenu w palniku smoczkowym typu PU-241A, z nasadką numer 3, dające tzw. płomień normalny (stosunek tlenu do acetylenu 1 : 1,2). Oś palnika usytuowana była prostopadle do powierzchni warstw laminatu (w środku boku 25 x 35 mm). Powierzchnia ablacyjna próbki znajdowała się na końcu strefy redukcyjnej płomienia, tj. w odległości do 10 mm od jego jądra. Temperatura płomienia przy powierzchni ablacyjnej wynosiła około 2 500 °C. [8, 17, 1, 16]

Po przeprowadzonych próbach oddziaływania strumienia gazów palnych na próbkach wykonano zglądy w płaszczyźnie normalnej do powierzchni ablacyjnej. Dokonano pomiarów położenia frontu ablacji, obliczono głębokość jego przemieszczenia i na tej podstawie średnią liniową szybkość ablacji  $v_a$ .

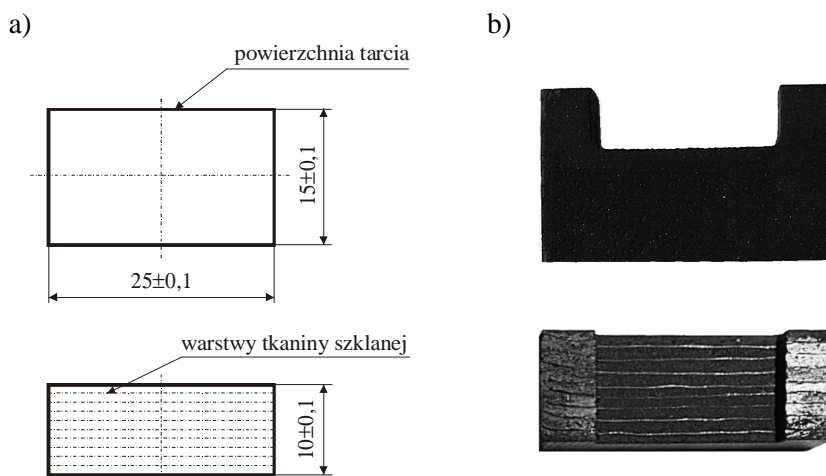
## 5.2. Ocena intensywność zużywania ściernego

Do określenia masowej intensywności zużywania ściernego  $I_z$  (zmiany masy próbki odniesionej do czasu zużywania) zastosowano zmodyfikowany tester  $T-07$  przeznaczony do oceny odporności na zużycie materiałów i pokryć metalowych podczas tarcia o luźne ścierniwo, z zachowaniem warunków i parametrów badań zalecanych przez producenta (tab. 3). [18, 22]

Kształt i wymiary próbki [9, 22] przedstawiono na rysunku 3a, a na rysunku 3b zdjęcie przykładowej próbki po przeprowadzeniu próby ściernia. Powierzchnia zużywania oraz kierunek działania siły tarcia były ustalone prostopadle do warstw tkaniny szklanej laminatu (rys. 3a) [9].

Tab. 3. Parametry i warunki badań ściernych [18]

Siła docisku próbki do przeciwróbki: $P = 44 \text{ N}$	Przeciwróbka: rolka stalowa pokryta warstwą gumy o twardości $78 \div 85 \text{ Sh A}$
Prędkość obrotowa przeciwróbki: $n = 60 \text{ obr/min}$	Ścierniwo: elektrokorund nr 90 (PN-76/M-59115)
Czas testu (liczba obrotów przeciwróbki): $\tau = 1000 \text{ s } (N_b = 1000 \text{ obr})$	Wielkość badana: intensywność zużywania $I_z$ [mg/s]



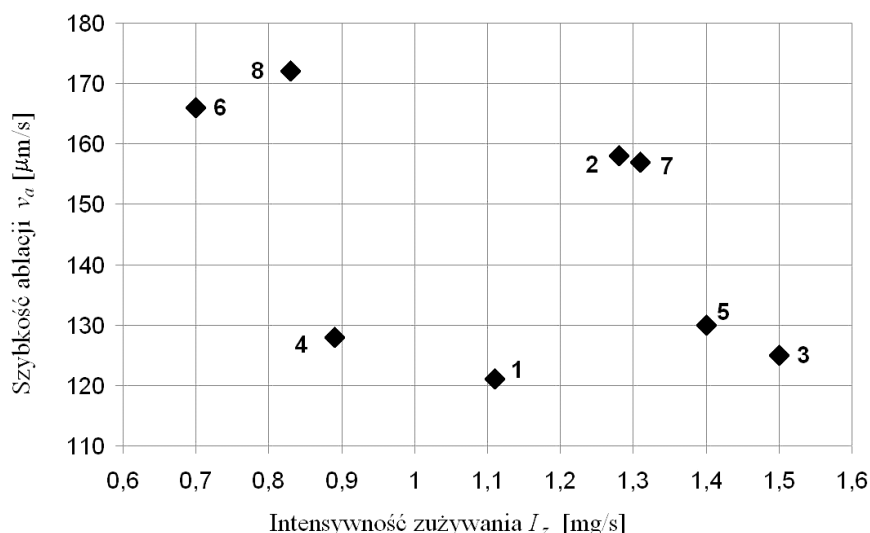
Rys. 3. Próbką do badań ściernych [9, 22]: a) rysunek konstrukcyjny, b) po próbie ścierności

## 5.3. Wyniki badań ablacyjnych i ściernych

Wyniki badań zużywania ablacyjnego (średniej liniowej szybkości ablacji  $v_a$ ) oraz ściernego (średniej masowej intensywności zużywania  $I_z$ ) przedstawiono w tabeli 4, a ich graficzną interpretację na rysunku 4.

Tab. 4. Wyniki badań ablacyjnych i ściernych

Parametr	Numer próby								
	1	2	3	4	5	6	7	8	
osnowa [%]	24	30	24	30	24	30	24	30	
tkanina szklana [%]	18		25		13		19		
napelniacze [%]	$Al_2O_3$	11,6	10,4	10,2	9,0	50,4	45,6	45,6	40,8
	C	46,4	41,6	40,8	36,0	12,6	11,4	11,4	10,2
$v_a$ [ $\mu\text{m/s}$ ]	121	158	125	128	130	166	157	172	
$I_z$ [mg/s]	1,11	1,28	1,50	0,89	1,40	0,70	1,31	0,83	



Rys. 4. Wyniki badań szybkości ablacji  $v_a$  i intensywności zużycia ściernego  $I_z$

Poszukiwano takiego składu fazowego kompozytu, dla którego zarówno średnia szybkość ablacji  $v_a$ , jak i intensywność zużycia ściernego  $I_z$  materiału rodzimego przyjmują wartości najmniejsze. Warunki te dobrze spełnia próbka nr 4 o składzie fazowym: 30% osnowy, 25% wzmocnienia z tkaniny szklanej, 9% korundu  $Al_2O_3$  i 36% pyłu węglowego C (rys. 4).

#### 5.4. Analiza statystyczna wyników badań

W oparciu o wyniki zawarte w tabeli 4 wykorzystując wzory (2), (3), (4) i (7) obliczono: współczynniki regresji, wariancję, błąd wyznaczania oraz poziom istotności współczynników regresji. Wyniki obliczeń zamieszczono w tabeli 5. Czcionką **pogrubioną** oznaczono wartości  $b_i$  – co prawda mniejsze od  $b_{istot}$  – ale obciążone błędem  $s(b_i)$ , który po jego uwzględnieniu w obliczeniu współczynnika  $b_i$  pozwala oszacować sumę wartości  $b_i$  i błędu  $s(b_i)$ , jako większą niż  $b_{istot}$ , czyli jeszcze statystycznie istotną. Puste miejsca w tabelach oznaczają, że dany współczynnik jest nieistotny z punktu widzenia analizy statystycznej i został pominięty.

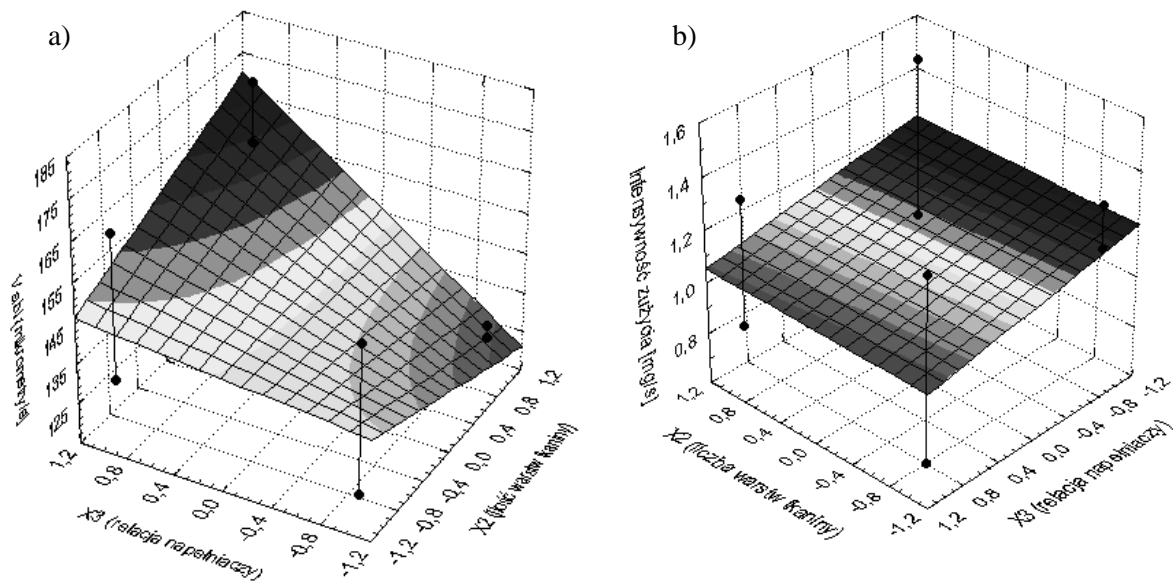
Analiza wartości współczynników  $b_i$  oraz znaków występujących przed nimi umożliwia ocenę wpływu udziałów poszczególnych zmiennych niezależnych  $x_i$  na wartość danej wyjściowej (funkcji odpowiedzi).

Tab. 5. Obliczenia statystyczne współczynników równań składowych funkcji odpowiedzi

	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{23}$	$b_{123}$	$s(\bar{y})$	$s(b_i)$	$b_{istot}$
$v_a$ [ $\mu\text{m/s}$ ]	144,5	11,4		11,5	-6,9		7,5		6,9	2,4	5,6
$I_z$ [mg/s]	1,13	-0,21		<b>-0,07</b>	<b>-0,07</b>	<b>-0,09</b>		0,13	0,11	0,04	0,1

Graficzne interpretacje zależności obu składowych funkcji odpowiedzi od dwu zmiennych fazowych  $x_i$  w całym zakresie ich zmienności i trzeciej zmiennej  $x_i$  na jej kodowym poziomie  $x_i = 0$  zaprezentowano na rysunkach 5 ÷ 7. Wykresy dla pozostałych wartości trzeciej zmiennej niezależnej, tj.  $x_i \neq 0$ , zgodnie z równaniem każdej składowej funkcji odpowiedzi, będą przyjmowały inne przebiegi.

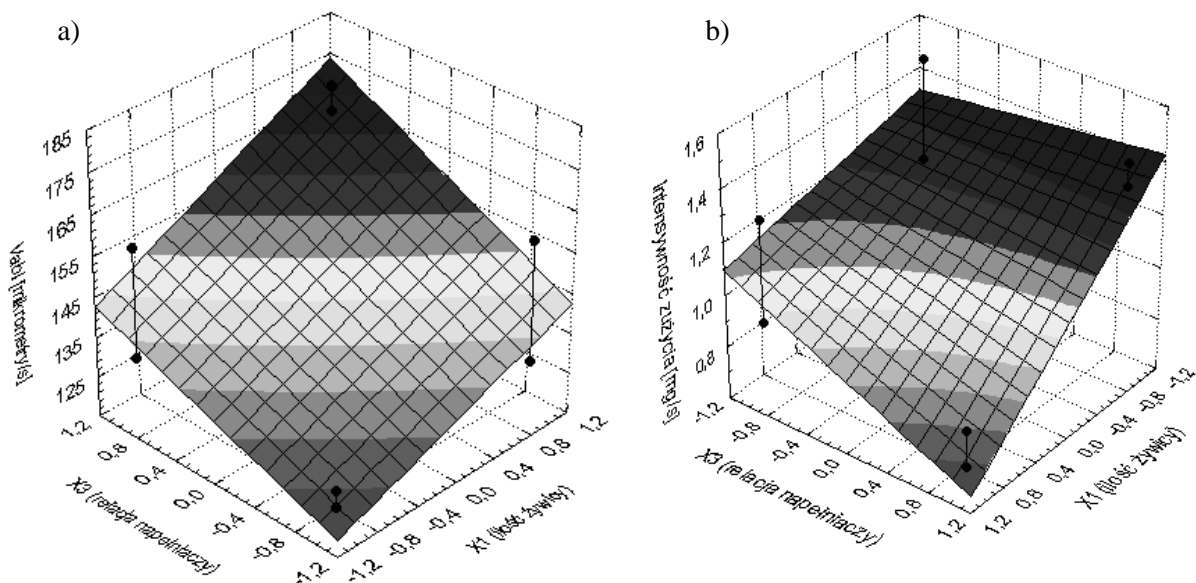
Analizując wartości i znaki współczynników regresji oraz interakcji należy stwierdzić, że dla przyjętego zakresu zmienności zmiennych niezależnych, występują poniżej zapisane zależności badanych parametrów zużycia od zmiennych kodowych, a co za tym idzie od składu fazowego kompozytu.



Rys. 5. Zależność zużywania od składu fazowego dla zmiennej  $x_1 = 0$ , (27% żywicy): a) szybkość ablacji  $v_a$ , b) intensywność zużywania  $I_z$

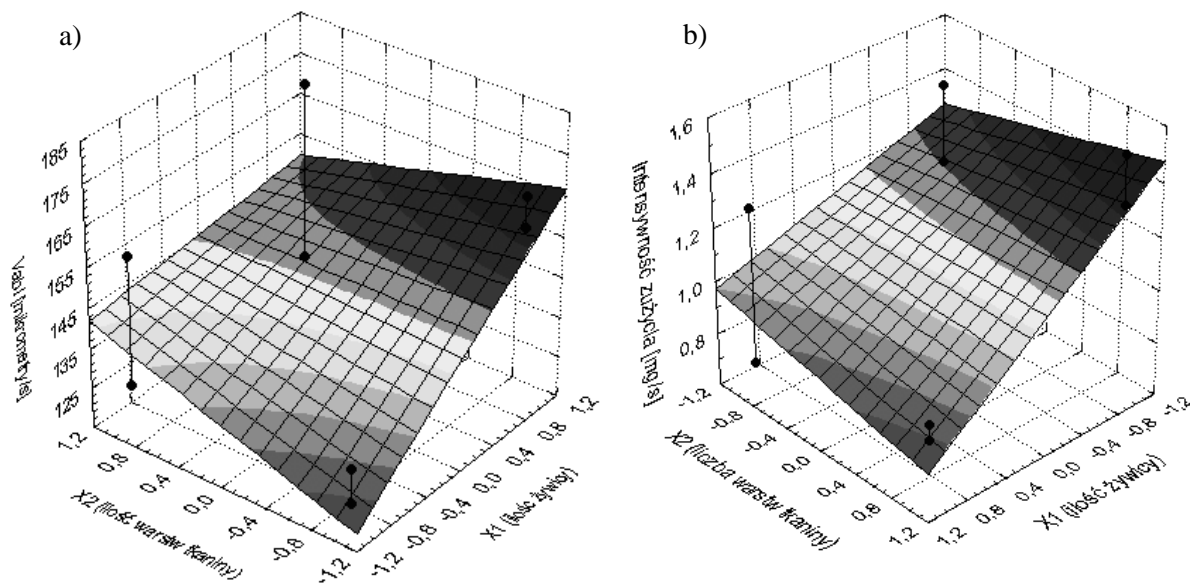
Wraz ze zwiększeniem zawartości osnowy w kompozycie znacznie maleje intensywność zużywania ściernego  $I_z$ , a średnia szybkość ablacji  $v_a$  wzrasta (odpowiednio dodatni i ujemny współczynnik  $b_1$  dla obu składowych funkcji odpowiedzi). Zawartość osnowy wywiera najbardziej istotny wpływ na wartości zużywania ściernego. Mniejsze jej udziały są równoznaczne z większą zawartością twardego i trudnościeralnego korundu.

Zmiana wyłącznie ilości warstw tkaniny szklanej (zmiana udziału zawartości wzmocnienia szklanego) nie wywiera istotnego wpływu na żaden z badanych parametrów zużywania (nieistotne wartości  $b_2$ ). Jednak wraz z jednoczesnym zwiększeniem udziału wzmocnienia szklanego ( $x_2$ ) i zawartości osnowy ( $x_1$ ), czyli wraz ze zmniejszeniem ilości napelniaczy sypkich, obserwujemy znaczny spadek wartości szybkości ablacji oraz minimalną poprawę odporności na ścieranie kompozytu (ujemne  $b_{12}$ ).



Rys. 6. Zależność zużywania od składu fazowego dla zmiennej  $x_2 = 0$ , (10 warstw tkaniny): a) szybkość ablacji  $v_a$ , b) intensywność zużywania  $I_z$





Rys. 7. Zależność zużywania od składu fazowego dla zmiennej  $x_3 = 0$ , (50% C i 50%  $Al_2O_3$ ): a) szybkość ablacji  $v_a$ , b) intensywność zużywania  $I_z$

Wraz ze wzrostem zawartości  $Al_2O_3$  (spadkiem zawartości pyłu węglowego C) intensywność zużywania  $I_z$  nieznacznie zmniejsza się (ujemne  $b_3$  oraz  $b_{13}$ ), ale szybkość ablacji  $v_a$  znacznie rośnie (dodatnie  $b_3$ ).

Zwiększenie liczby warstw tkaniny szklanej ( $x_2$ ) w połączeniu ze wzrostem zawartości  $Al_2O_3$  (spadek zawartości C –  $x_3$ ), powoduje wzrost ablacyjnego zużycia materiału ( $b_{23}$ ).

Intensywność zużycia ściernego wzrasta wraz z równoczesnym zwiększeniem udziałów osnowy i wzmocnienia włóknistego, pomimo większej ilości trudnościeralnego korundu niż proszku węgla w warunkach obniżonej zawartości napełniaczy proszkowych ( $b_{123}$ ).

## 6. Wnioski

1. Kompozyty o składach fazowych zapewniających mniejszą intensywność zużywania ściernego  $I_z$  charakteryzują się większą szybkością ablacji  $v_a$ .
2. Intensywność zużywania ściernego maleje, gdy wzrasta albo udział osnowy, albo w mieszaninie napełniaczy proszkowych dominuje korund  $Al_2O_3$ . Wysoka zawartość żywicy, gwarantując odpowiednie przesylenia i utwardzenie kompozytu prawdopodobnie utrudnia wyrywanie podczas ścierania ziaren napełniaczy, a duża zawartość twardego i trudnościeralnego korundu zwiększa odporność na ścieranie materiału.
3. Odwrotną zależność obserwuje się dla szybkości ablacji  $v_a$ , która maleje albo ze zmniejszeniem wyłącznie udziału osnowy, a co za tym idzie, dla stałej zawartości wzmocnienia włóknistego, ze zwiększeniem udziału napełniaczy proszkowych danego rodzaju, albo z większą ilością w mieszaninie proszków pyłu węglowego C. Mniejsza zawartość węgla pirolitycznego (głównego składnika termoizolacyjnej warstwy ablacyjnej) powstałego w procesach rozkładu osnowy rekompensowana jest większymi udziałami pyłu węglowego zarówno w ramach wyższej zawartości proszków, jak i w stosunku do korundu.
4. Niską szybkość ablacji  $v_a$  można także osiągnąć zmniejszając zawartość napełniaczy proszkowych z zachowaniem minimalnych udziałów korundu  $Al_2O_3$  i maksymalnych pyłu węglowego C oraz zwiększając przy tym jednocześnie udział osnowy i wzmocnienia szklanego.
5. W przyjętym zakresie zmiennych niezależnych największą odporność na zużywanie ściernie kompozytu uzyskać można przy maksimum zawartości korundu  $Al_2O_3$  (minimum pyłu węglowego C), stosując jak największe nasycenie żywicami z jednoczesnym zachowaniem poziomu zerowego liczby warstw tkaniny szklanej.

## Literatura

1. Bahramian A R, Kokabi M. Ablation mechanism of polymer layered silicate nanocomposite heat shield. *Journal of Hazardous Materials* 2009; 166: 445-454.
2. Bielajew N M. Wytrzymałość materiałów. Warszawa: Wydawnictwo MON, 1954.
3. Dimitrienko Yu I. Thermal stresses in ablative composite thin-walled structures under intensive heat flows. *International Journal of Engineering Science* 1997; 35/1: 15-31.
4. Feng-Er Yu. Study on the ablation materials of modified polyurethane/polysiloxane. Doctoral dissertation. Guangzhou: National Sun Yat-sen University. Materials Science and Engineering Department, 2004.
5. Haack A. Latest achievements and perspectives in tunnel safety. 30<sup>nd</sup> ITA - World Tunnel Congress. Singapore: May 22<sup>th</sup> -27<sup>th</sup> 2004.
6. Jackowski A. Numeryczne rozwiązanie głównego problemu ablacji. *Biuletyn WAT* 1986; 6(460): 11-21.
7. Jackowski A. Ablacja ścianki płaskiej w warunkach erozyjnego unoszenia warstwy ablacyjnej. *Biuletyn WAT* 1986; 6(460): 23-33.
8. Kucharczyk W. Kształtowanie ablacyjnych właściwości termoochronnych kompozytów polimerowych napełniaczami proszkowymi. Rozprawa doktorska. Radom: Politechnika Radomska, 2007.
9. Kucharczyk W, Żurowski W. Odporność na zużycie ściernie hybrydowych laminatów termoutwardzalnych o właściwościach ablacyjnych. *Tribologia* 2003; 4(190): 277-286.
10. Leszek W. Badania empiryczne. Wybrane zagadnienia metodyczne. Radom: Wydawnictwo ITE w Radomiu, 1997.
11. Lin W-S. Steady ablation on the surface of a two-layer composite. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2005; 48: 5504-5519.
12. NIST NCSTAR 1, Federal Building and Fire Safety Investigation of The World Trade Center Disaster. Final report on the Collapse of the World Trade Center. U.S. Washington: Government Printing Office, September 2005.
13. Ono K, Otsuka T. Fire design requirement for various tunnels. 32<sup>nd</sup> ITA - World Tunnel Congress. Seoul: April 25<sup>th</sup> 2006.
14. Patton R D, Pittman Jr C U, Wang L, Hill J R, Day A. Ablation, mechanical and thermal conductivity properties of vapour grown carbon fiber-phenolic matrix composites. *Composites Part A* 2002; 33: 243-251.
15. Polański Z. Planowanie doświadczeń w technice. Warszawa: PWN, 1984.

16. Jurga J, Jurkowski B, Sterzyński T i inni. Nowe kierunki modyfikacji i zastosowań tworzyw sztucznych. Kucharczyk W. Termoochronne właściwości ablacyjne szklanych laminatów fenolowo-formaldehydowych. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2004; 45-49.
17. 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.
18. Tester do badania ścieralności T-07. Instrukcja obsługi. Radom: ITE w Radomiu, 1995.
19. Wilkinson T. The World Trade Center and 9/11. The discussion of some engineering design issues. National Conference "Safe Buildings for This Century". Sydney: Australian Institute of Building Surveyors, 2002.
20. Willam K, Rhee I, Shing B. Interface damage model for thermomechanical degradation of heterogeneous materials. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 2004; 193: 3327-3350.
21. Wojtkun F, Sołncew Ju P. Materiały specjalnego przeznaczenia. Radom: Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, 2001.
22. Żurowski W. Tribologiczne badania termoutwardzalnych kompozytów proszkowych do zastosowań ciernych. *Przemysł Chemiczny* 2010; 12(89): 1678-1681.