

Wojciech KUCHARCZYK*, Wojciech ŻUROWSKI*

**ODPORNOŚĆ NA ZUŻYCIE ŚCIERNE
HYBRYDOWYCH LAMINATÓW
TERMOUTWARDZALNYCH
O WŁAŚCIWOŚCIACH ABLACYJNYCH**

**ABRASIVE WEAR RESISTANCE OF HYBRID
HEAT-HARDENING LAMINATES ABOUT
ABLATION PROPRIETIES**

Słowa kluczowe:

ablacja, hybrydowe laminaty termoutwardzalne, zużycie ścierne

Key-words:

ablation, heat-hardening hybrid laminates, abrasive waste

Streszczenie

W referacie przedstawiono charakterystykę, plan badań doświadczalnych, metodykę oraz wyniki przeprowadzonych badań tribologicznych, ich analizę i wnioski dla grupy termoutwardzalnych laminatów hybrydowych o właściwościach ablacyjnych.

* Politechnika Radomska, Instytut Budowy Maszyn, ul. Krasickiego 54B, 26-600 Radom

Do badań tribologicznych - wykonanych na testerze T-07 zgodnie z zaleceniami producenta (ITE w Radomiu) - przygotowano próbki hybrydowego kompozytu termo-utwardzalnego o osnowie z żywic fenolowo-formaldehydowych (Modofen 54S - ciecz, Nowolak MR - proszek), napełniaczach włóknistych (warstwy tkaniny szklanej o gramaturze 250 g/m^2 i splotach ukośnych) oraz sypkich (mieszanka Al_2O_3 i pyłu węglowego - ziarna komponentów $2 \div 5 \mu\text{m}$), cechującego się szybkością ablacji (prędkość tworzenia się żużlu szklatego pod wpływem działania płomienia acetylenowo-tlenowego o temperaturze $3000 \text{ }^\circ\text{C}$ rzędu dziesiątych części mm na sekundę).

Skład fazowy próbek oraz liczba wykonanych doświadczeń wynika z przyjętego planu doświadczenia, tj.: macierzy pełnoczynnikowej I rzędu 2^3 , gdzie 3 zmiennymi niezależnymi są: relacja wagowa napełniacza Al_2O_3 do sumy wag obu napełniaczy, ilość warstw tkaniny szklanej, łączny wagowy udział żywic fenolowo-formaldehydowych; funkcją odpowiedzi zaś – odporność na zużycie cierne kompozytu podczas tarcia o luźne ścierniwo.

Technologia wykonania próbek polega na utwardzeniu sprasowanego laminatu - składającego się z uprzednio przesyconych częścią żywicy warstw tkaniny szklanej, przedzielonych mieszaniną napełniaczy sypkich i żywicy - w temperaturze żelowania $150 \text{ }^\circ\text{C}$ w czasie 1 godziny w metalowej zamkniętej formie z zastosowaniem docisku.

W oparciu o wyniki badań określono jakościowy i ilościowy wpływ wskazanych komponentów na odporność na zużycie tribologiczne kompozytu.

WPROWADZENIE

Kompozytem hybrydowym nazywamy swoisty „system materiałowy” będący - w tym przypadku - połączeniem klasycznego laminatu polimerowego o warstwowych wzmocnieniach włóknistych z sypkimi napełniaczami proszkowymi zatopionymi we wspólnej osnowie polimerowej.

Zastosowanie kompozytów polimerowych o odpowiednim składzie fazowym daje możliwość tworzenia konstrukcji ablacyjnych niedostępnych przy użyciu klasycznych materiałów, a z powodzeniem wykorzystywanych w lotnictwie oraz kosmonautyce (powłoki ochronne korpusów komór spalania w raketach na paliwo stałe, poszycie kadłuba

promów i statków kosmicznych), czy też w przemyśle zbrojeniowym (czepce głowic, okładziny i ruszty komór spalania amunicji raketowej) [1].

„Ablacja, chłodzenie ablacyjne, w lotnictwie i astronautyce sposób chłodzenia powierzchni bardzo szybkich statków lecących w gęstych warstwach atmosfery. Polega na odparowywaniu lub sublimacji tzw. warstwy ablacyjnej tworzonej przez specjalne materiały (ablatory - np. termoodporne polimery wzmocnione włóknami nieorganicznymi, żywice epoksydowe, lit itp.). Pod wpływem strumienia gazu o znacznej prędkości i temperaturze zmienia się ona w warstwę porowatego koksu o niskiej przewodności cieplnej. (...)”[6]

W artykule przedstawiono metodykę, wyniki badań i ich analizę statystyczną odporności na zużycie cierne badanej grupy ablacyjnych hybrydowych laminatów termoutwardzalnych.

DOBÓR KOMPONENTÓW

Do wykonania termoutwardzalnego laminatu hybrydowego zastosowano:

1. Materiał osnowy: żywice fenolowo-formaldehydowe (*Modofen 54S* oraz *Nowolak MR* w stosunku wagowym 1 : 1) produkowane przez ZCh ORGANIKA-SARZYNA.

Tabela 1. Żywice stosowane na osnowę - właściwości i parametry [3]

Żywica	Postać	Parametry jakościowe		Zastosowanie
Modofen 54S (rezolowa)	ciemnożółta klarowna ciecz	Lepkość w temperaturze 25 °C [mPas]	450 ÷ 800	jako środek zwilżający na materiały cierne i ścierny: tarcze ścierny do polerowania, tarcze tnące do stali i innych materiałów
		Gęstość ρ [g/cm ³]	1,19 ÷ 1,21	
		Zawartość substancji suchej [%]	73 ÷ 80	
		pH [-]	7,5 ÷ 8,5	
Nowolak MR (z urotropina)	proszek o barwie białej do jasnożółtej	Temperatura topnienia [°C]	min. 78	lepiej przy produkcji materiałów ogniotrwałych, do materiałów ściernych i cieniowych, do wytwarzania tłoczyw, zalecany z ciekłymi żywicami rezolowymi
		Droga płynięcia, tabletki 1g, [mm]	40 ÷ 70	
		Czas żelowania w 150 °C, [s]	max. 1,30	
		Pozostałość na sicie o boku 0,056 mm, [%]	max. 5,0	

2. Wzmocnienie włókniste: tkaninę szklaną STR-022 o gramaturze 250 g/m² produkowaną przez Krośnieńskie Huty Szkła „KROSNO” SA (tabl. 2).

Tabela 2. Parametry tkaniny szklanej [4]

Krośnieńskie Huty Szkła „KROSNO” SA					
Symbol /Splot/ /Surowiec/	Gramatura [g/m ²]	Gęstość liniowa [l/dm]		Masa liniowa [g/m]	Uwagi (właściwości tkaniny)
		osnowa	wątek		
STR-022 /płócienny/ /roving, szkło E/	250	49	49	275	ortotropowe
Roving wykonany jest ze włókien szklanych o średnicy 11, 16 lub 20 μm otrzymanych z bezalkalicznego boro-glino-krzemowego szkła typu E. Wykończeniem jest chemicznie czynna preparacja winylosilanowa lub metakrylosilanowa.					

3. Napelniacze syplikie: *korund* Al_2O_3 (ALO G5-4) o ziarnach wielkości $2 \div 5 \mu m$ i mini-malnej zawartości tlenku glinu 99,5 % (95 % αAl_2O_3), produkcji węgierskiej firmy AJKA ALUMINA [5]; drobnoziarnisty *pył węglowy* o ziarnistości do $5 \mu m$ i czystości nie mniejszej niż 98 %, produkcji polskiej.

PLAN I METODYKA BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

Skład fazowy próbek oraz liczba wykonywanych doświadczeń zostały ustalone na podstawie przyjętego planu doświadczenia (w oparciu o literaturę tematyczną), tj.: ortogo-nalnej macierzy pełnoczynnikowej I rzędu 2^3 z powtórzeniami (tabl. 3) [2].

Trzema zmiennymi niezależnymi x_i (parametrami wejściowymi), o wartościach dwu poziomów („+” górny oraz „-”, dolny) określonych według wzoru:

$$x_i = \frac{x - x_{sr}}{\Delta x_i} = \pm 1 \quad (1)$$

są udziały komponentów kompozytu:

x_1 - udział wagowy materiału osnowy (żywic) w kompozycie [%]

30 % - poziom górny „+” 24 % - poziom dolny „-”,
 $\Delta x_1 = 3 \%$ $x_{1sr} = 27 \%$;

x_2 - liczba warstw wybranej tkaniny szklanej [szt.]

12 szt. - poziom górny „+” 8 szt. - poziom dolny „-”,
 $\Delta x_2 = 2$ szt. $x_{2sr} = 10$ szt.;

x_3 - relacja wagowa napelniacza Al_2O_3 do sumy wag obu napelniaczy [%] (poziom „0” oznacza 50 % Al_2O_3 i 50 % C, poziom „+”

oznacza 80 % Al_2O_3 oraz 20 % C zaś poziom „-, - 20 % Al_2O_3 oraz 80 % C)

80 % - poziom górny „+” 20 % - poziom dolny „-“

”

$$\Delta x_3 = 30 \% \quad x_{3sr} = 50 \%;$$

a funkcją odpowiedzi (parametrem wyjściowym) jest:

\bar{y} – średnia wagowa intensywność zużywania ściernego \bar{I}_z [mg/s].

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

$$\bar{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (2)$$

Wartości współczynników regresji określa się następująco:

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

Prowadzono analizę statystyczną osiągniętych wyników celem określenia progu istotności współczynników regresji b_i i oceny ich wpływu na wartość parametru wyjściowego \bar{y} według poniższych zależności. [2]:

1. Wariancja (4) oraz błąd wyznaczenia współczynników regresji (5):

$$s(\bar{y}) = \sqrt{\frac{\sum d_j^2}{2N}} \quad (4) \quad s(b_i) = \sqrt{\frac{s^2(\bar{y})}{N}} \quad (5)$$

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).

2. Istotność współczynników regresji sprawdzono w oparciu o zależności (6) i (7):

$$\frac{b_i \cdot \sqrt{N}}{s(\bar{y})} = t_{obl.} \quad (6) \quad b_i = \frac{2,306 \cdot s(\bar{y})}{\sqrt{N}} \quad (7)$$

Stąd po przekształceniu warunków statystycznej istotności współczynników regresji przybiera postać (8):

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

gdzie: t - funkcja t -Studenta; $t_{obl} \gg t_{tabl}$ ($t_{tabl} = 2,306$ przy liczbie stopni swobody $f = 8$ i prawdopodobieństwie $P = 95\%$).

Obliczone wartości współczynników regresji w połączeniu z wartościami funkcji \bar{y} po-służyły do ustalenia parametrów x_1, x_2, x_3 dla doświadczeń uzupełniających w celu osiągnięcia obszaru prawie stacjonarnego [2], czyli obszaru w którym występuje spadek intensywności zużycia (\bar{I}_z przyjmuje wartość minimalną).

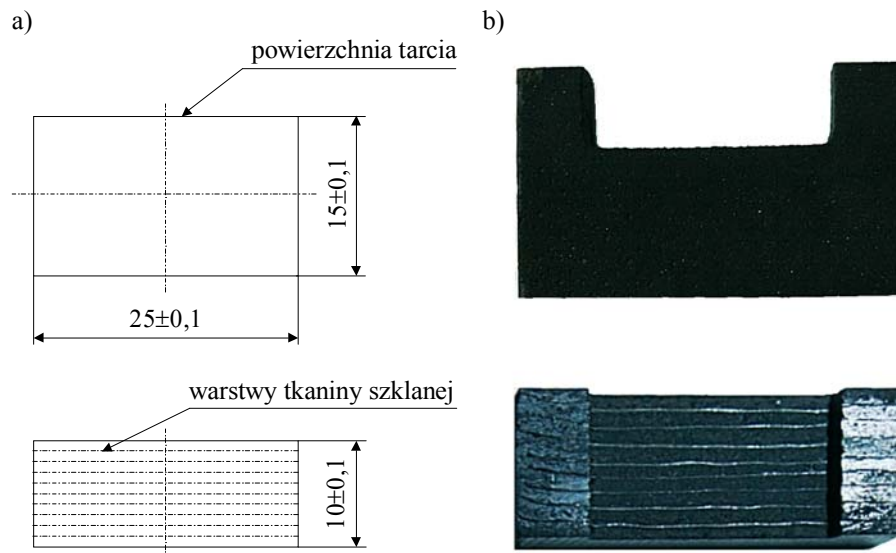
OKREŚLENIE INTENSYWNOŚĆ ZUŻYWANIA ŚCIERNEGO LAMINATÓW HYBRYDOWYCH

Do określenia stopnia odporności na zużywanie ściernie badanej grupy laminatów hybrydowych 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 (tabl. 3).

Tabela 3. Parametry i warunki badań ściernych [7]

Siła docisku próbki do przeciwróbki: $P = 44$ N	Ścierniwo: elektrokorund, nr 90 wg PN-76/M-59115
Prędkość obrotowa przeciwróbki: $n = 60$ obr/min	Czas testu: $N_b = 1000$ obr (1000 s)
Przeciwróbka: wg wymogów producenta testera [7]	Wielkość badana: intensywność zużycia I_z [mg/s]

Kształt i wymiary badanej próbki przedstawiono na rysunku 1a, a na rysunku 1b zdjęcie przykładowej próbki po przeprowadzeniu próby ściernia. Powierzchnia zużycia oraz kierunek działania siły tarcia były ustalone prostopadle do warstw tkaniny szklanej laminatu (rys. 1a).



Rys. 1. Próbkę materiałowa do badań: a) rysunek konstrukcyjny, b) próbkę po próbie ścieralności

Fig. 1. Test material specimen: a) the constructional drawing, b) sample after test abrasion

Próbki poważono przed i po próbie ścieralności z dokładnością do 1 mg. W oparciu o wykonane pomiary określono średnią wagową intensywność zużywania w każdym z 8 doświadczeń stosując wzór:

$$\bar{I}_z = \frac{\bar{\Delta m}}{N_b} = \frac{\overline{(m_1 - m_2)}}{N_b} \quad \left[\frac{mg}{s} \right] \quad (9)$$

gdzie: $\bar{\Delta m}$ - średni arytmetyczny ubytek masy próbki w poszczególnym stanie doświadczenia [mg],

m_1 - masa próbki przed próbą ścierania [mg],

m_2 - masa próbki po próbie ścierania [mg].

ANALIZA STATYSTYCZNA WYNIKÓW BADAŃ

Z wykorzystaniem wzorów (3), (4), (5) i (8) - obliczono współczynniki regresji, wariancję, błąd wyznaczenia współczynników regresji oraz ich poziom istotności. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 4, a ich graficzną interpretację pokazano na wykresie 3.

Tabela 4. Średnia wagowa intensywność zużywania \bar{I}_z i obliczenia statystyczne wyników badań

Nr	Pełnoczynnikowa macierz planowania I rzędu 2^3								\bar{I}_z [mg/s]
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	
1	+	-	-	-	+	+	+	-	1,109
2	+	+	-	-	-	-	+	+	1,277
3	+	-	+	-	-	+	-	+	1,498
4	+	+	+	-	+	-	-	-	0,884
5	+	-	-	+	+	-	-	+	1,402
6	+	+	-	+	-	+	-	-	0,692
7	+	-	+	+	-	-	+	-	1,314
8	+	+	+	+	+	+	+	+	0,827
b_i	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}	
	1,125	-0,205	0,005	-0,067	-0,070	-0,094	0,007	0,126	
Wyniki obliczeń statystycznych według (4), (5) i (8) [mg/s]					$s(\bar{y})$	$s(b_i)$	b_{istot}		
					0,112	0,042	0,098		

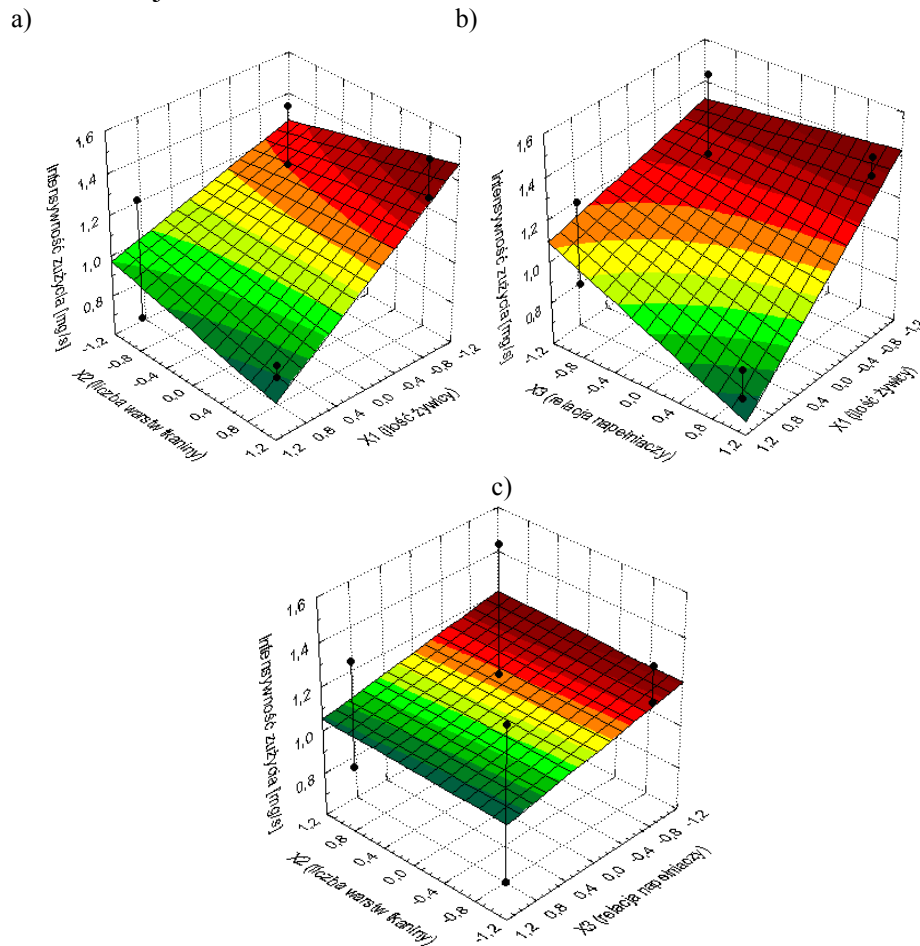
W tabeli 4 podkreślono współczynniki istotne (oraz będące na granicy istotności, tzn. te dla których błąd wyznaczenia współczynnika pozwala oszacować wartość współczynnika na poziomie istotności). Równanie funkcji odpowiedzi przyjmie zatem postać (10):

$$\bar{y} = 1,125 - 0,205x_1 - 0,067x_3 - 0,07x_1x_2 - 0,094x_1x_3 + 0,126 x_1x_2x_3 \quad (10)$$

Dla przyjętego zakresu zmienności zmiennych niezależnych, analizując wartości i znaki współczynników regresji - możemy zauważyć, że:

- im większa zawartość żywic w kompozycie, tym intensywność zużywania mniejsza (ujemna wartość współczynnika b_1);
- wraz ze wzrostem zawartości Al_2O_3 (spadkiem zawartości węgla) intensywność zużywania zmniejsza się (ujemne b_3 oraz b_{13});
- w przyjętym zakresie zmiennej x_2 nie ma znaczenia liczba warstw tkaniny szklanej (nieistotne b_2), choć wraz z jednoczesnym zwiększeniem x_2 i x_1 obserwujemy poprawę odporności na ścieranie (ujemne b_{12});

- wartość i znak współczynnika korelacji b_{123} informuje, że wraz z równoczesnym zwiększeniem wszystkich trzech zmiennych w sposób istotny spada odporność na zużywanie ściernie kompozytu. Szczególnie zastanawiające jest to w zestawieniu ze znakiem współczynnika b_{13} i nieistotnym z punktu widzenia statystycznego współczynnikiem b_2 . Zależność tę wyjaśnić można mniejszym udziałem procentowym Al_2O_3 (wpływającym korzystnie na odporność ścierną) w próbkach z większą liczbą warstw tkaniny szklanej.



Rys. 2. Zależność intensywności zużywania ściernego I_z od wartości zmiennych kodowych: a) $x_3 = 0$, (50 % C i 50 % Al_2O_3), b) $x_2 = 0$ (10 warstw tkaniny), $x_1 = 0$ (27 % żywicy)

Fig. 2. Dependence of intensity of abrasive waste I_z ad valorem the code variables: a) $x_3 = 0$ (50 % C, and 50 % Al_2O_3), b) $x_2 = 0$ (10 layers of fabric), $x_1 = 0$ (27 % resins)

WNIOSKI

1. Większy udział żywic – gwarantując wysoki stopień przesylenia i utwardzenia oraz duża zawartość twardego korundu są warunkiem koniecznym zwiększenia odporności na zużywanie ściernie badanej grupy laminatów hybrydowych.
2. W przyjętym zakresie zmiennych niezależnych największą odporność na zużywanie ściernie kompozytu uzyskamy przy maksimum zawartości Al_2O_3 (minimum węgla) stosując jak największe nasycenie żywicami z jednoczesnym zachowaniem poziomu zerowego liczby warstw tkaniny szklanej.
3. Próby zwiększenia cech wytrzymałościowych poprzez stosowanie większej liczby warstw tkaniny szklanej, obniżając udział procentowy ceramiki w kompozycie spowodują spadek odporności na zużycie ściernie.

LITERATURA

1. Wojtkun F., Sołncew Ju.P.: Materiały specjalnego przeznaczenia. Wyd. Politechniki Radomskiej. 2001. Radom.
2. Polański Z.: Planowanie doświadczeń w technice. PWN. 1984. Warszawa.
3. Materiały marketingowe ZCh ORGANIKA-SARZYNA w Nowej Sarzynie. 2000.
4. Materiały marketingowe Krośnieńskich Hut Szkła „KROSNO” SA. 2000.
5. Materiały marketingowe firmy AJKA ALUMINA Co. Ltd. 2000.
6. Popularna Encyklopedia Powszechna. 1999. Wyd. FOGRA.
7. Tester do badania ścierności T-07. Instrukcja obsługi. ITE w Radomiu. 1995. Radom.

Recenzent:
Janusz JANECKI

Summary

The abrasive wear resistance searching plan of heat-hardening hybrid laminates about ablation properties, methods and results of research as well as theirs analysis and conclusions are presented.

It is qualified the qualitative and quantitative influence of components (Al_2O_3 and C powder, glass fabric - as material of filler and amplification as well as - as material of heat-hardening matrix – phenol formaldehyde resins) onto intensity of abrasive waste of laminate.