



Wojciech Żurowski

Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny, ul. Malczewskiego 22, 26-600 Radom, Poland
Corresponding author. E-mail: wojciech.zurowski@pr.radom.pl

Otrzymano (Received) 30.01.2008

ODPORNOŚĆ NA ZUŻYCIE ŚCIERNE SZKLANYCH LAMINATÓW FENOLOWO-FORMALDEHYDOWYCH Z NAPEŁNIACZAMI PROSZKOWYMI

Przedstawiono charakterystykę oraz założenia planu badań eksperymentalnych odporności na zużycie ścierne termoutwardzalnych laminatów hybrydowych o właściwościach ablacyjnych, zastosowanych na kompozyty komponentów, technologię wykonania próbek materiałowych, metodykę i wyniki badań intensywności zużycia ściernego podczas tarcia o luźne ścierniwo oraz wnioski. Określono jakościowy i ilościowy wpływ komponentów (proszek Al_2O_3 , pył węglowy, tkanina szklana - jako materiał wzmocnienia i wypełnienia oraz - jako materiał osnowy termoutwardzalnej - żywice fenolowo-formaldehydowe, rezolowe i nowolakowe) na intensywność zużywania ściernego podczas tarcia o luźne ścierniwo. Uzyskane wyniki badań poddano analizie statystycznej, która posłużyła do określenia równania funkcji obiektu badań i po przeprowadzonych doświadczeniach uzupełniających - do określenia wpływu komponentów na właściwości tribologiczne kompozytów. Stwierdzono, że większy udział żywic, w przyjętym zakresie zmienności, gwarantujący wysoki stopień przesycenia oraz duża zawartość twardego korundu są warunkami koniecznymi zwiększenia odporności na zużywanie ścierne badanej grupy laminatów fenolowo-formaldehydowych.

Słowa kluczowe: laminaty szklane, laminaty fenolowo-formaldehydowe, zużycie ścierne, napelniacze proszkowe

ABRASIVE WEAR RESISTANCE OF GLASS PHENOLIC-FORMALDEHYDE LAMINATES WITH PULVERACEOUS FILLERS

In this paper one introduced the characteristics and assumptions of the schedule of research of experimental wear resistances abrasive of heat-hardening hybrid laminates about properties ablation, used on laminates of components, the technology of the realization of samples of materials, the methodics and findings of the intensity of the abrasive waste during the friction for the loose abradant and conclusions. 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 during the friction for the loose abradant. Obtained findings were subjected to the statistical analysis which was of service to the qualification of the equalization of the function of the object of research and after passing experiences supplementary - to the qualification of the influence of components on the laminates tribological property. One ascertained that the greater participation of resins, in the accepted range of the variability, warranting high degree of the saturation and the large content of the hard corundum are necessary conditions of the enlargement of the abrasive wear resistance of the investigated group of phenolic-formaldehyde laminates.

Keywords: glass laminates, phenolic-formaldehyde laminates, abrasive waste, pulverous fillers

WPROWADZENIE

Współcześnie spośród materiałów konstrukcyjnych duże znaczenie uzyskały materiały polimerowe oraz kompozyty o osnowach polimerowych. Przyjęto, że kompozyt to makroskopowo monolityczny materiał utworzony sztucznie z co najmniej dwóch komponentów o różnych właściwościach w taki sposób, że ma on właściwości lepsze i (lub) nowe w stosunku do komponentów wziętych osobno lub wynikających z prostego sumowania tych właściwości. Jest to więc połączenie przynajmniej dwóch różnych materiałów w celu uzyskania ściśle określonych właściwości eksploatacyjnych

nowego materiału. Kompozyty pozwalają uzyskać zestaw zadanych różnorodnych właściwości. Wachlarz właściwości materiałów kompozytowych jest niemożliwy do osiągnięcia przy użyciu prostych, klasycznych materiałów. Ich zastosowanie daje możliwość tworzenia zasadniczo nowych konstrukcji niedostępnych przy wykorzystaniu klasycznych materiałów konstrukcyjnych.

Zużywanie ścierne tworzyw sztucznych wzmocnionych przebiega podobnie jak czystych polimerów, jednak z pewnymi dodatkowymi zjawiskami. Mikrowystępy nierówności powierzchni metalowej co pewien czas

zahaczają o nitkę włókna wypełniającego lub cząstkę napełniacza sypkiego, powodując ich zerwanie i wrywanie wraz z przylepionymi do nich silnie cząsteczkami żywicy polimeru - lepiszcza. Mechanizm zużycia powierzchni tworzywa wzmocnionego polega przede wszystkim na wykrawaniu, ale też na wyciskaniu bruzd zorientowanych w kierunku wektora prędkości. W tworzywach wzmocnionych bardzo słabo występuje także powierzchniowe odkształcenie plastyczne, a objawy jego są usuwane w wyniku ubytku ściernego materiału z warstwy wierzchniej. Zaznaczyć też należy, że w przypadku bardzo nikłej ilości napełniacza (nośnika) intensywność zużycia zmienia się skokowo. W pierwszej fazie pracy zużywa się ściernie czysta żywica aż do obnażenia cząstki lub włókna napełniacza. Zostają wówczas uwypuklone na powierzchni cząstki odporne na zużywanie nośnika. Jednak wzrasta wówczas znacznie wartość rzeczywistego nacisku w nielicznych punktach styku, co prowadzi do zintensyfikowania zużycia aż do momentu usunięcia cząstki obcej; rozpoczyna się wtedy znów etap umiarkowanego zużycia ściernego polimeru.

W sumie zawartość twardych cząstek i włókien w tworzywie sztucznym zwiększa intensywność zużycia ciernego całej pary. Dlatego unika się stosowania w tworzywach sztucznych, przeznaczonych na niskotarciowe elementy ślizgowe, dodatku napełniacza w postaci włókna szklanego lub elektrokorundu, a stosuje raczej napełniacze bardziej miękkie i o bardziej obłej, bezkrawędziowej budowie. W skojarzeniach ciernych natomiast, gdzie zasadnicze znaczenie ma wartość cierności pary, właśnie te wypełniacze są stosowane. Opis stanu powierzchni tworzywa sztucznego po zużyciu ściernym przedstawiono w tabeli 1.

TABELA 1. Mechanizm zużycia ściernego w wyniku tarcia [1]
TABLE 1. The mechanism of the abrasive waste as result of the friction [1]

Tworzywo		Stan powierzchni przy przeciwciele ścierającym powierzchni:		
Cecha charakterystyczna	Rodzaj	gładkiej	chropowatej	bardzo ścierniej
Sprężyste	Poliamid	Fale poprzeczne, rysy podłużne	Wyraźne fale poprzeczne i rysy podłużne	Nieznaczne fale poprzeczne, wyraźne bruzdy podłużne
	Polietylen wysokociśnieniowy	Lustrzana błyszcząca powierzchnia	Wyraźne produkty zużycia	Wyraźne produkty zużycia
Sprężysto-plastyczne	Polifluoroczeroetylen	Wyraźne produkty zużycia	Wyraźne produkty zużycia	Wyraźne produkty zużycia
Mało-plastyczne	Żywice epoksydowe	Nieznaczne fale poprzeczne, słabe rysy podłużne	Słabe fale poprzeczne, wyraźne bruzdy poprzeczne wskutek mikroskrawania	Wyraźne bruzdy podłużne, duża ilość produktów zużycia

DOBÓR KOMPONENTÓW

Praktyczna realizacja tematu niniejszej pracy objęła jakościowe i ilościowe określenie wpływu wskazanych komponentów na intensywność zużycia ściernego, w tym:

- materiału wzmocnienia i wypełnienia (trójtlenek aluminium, pył grafitowy, tkanina szklana),
- materiału osnowy termoutwardzalnej (żywice fenolowo-formaldehydowe rezolowe i nowolakowe).

Ponadto opracowano skład strukturalny kompozytu polimerowego termoutwardzalnego o żądanych właściwościach wytrzymałościowych i eksploatacyjnych.

Do wykonania laminatu fenolowo-formaldehydowego zastosowano:

- Materiał osnowy: żywice *Modofen 54S* oraz *Nowolak MR* w stosunku wagowym 1:1 produkcji ZC ORGANIKA-SARZYNA (tab. 2).
- Wzmocnienie włókniste: *tkaninę szklaną STR-022* o gramaturze 250 g/m² produkcji Krośnieńskich Hut Szkła KROSNO S.A. (tab. 3).

TABELA 2. Żywice stosowane na osnowę - właściwości i parametry [2]

TABLE 2. Practical resins on the warp - properties and parameters [2]

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 ściernie: tarcze ściernie 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 utrotopina)	proszek o barwie białej do jasnożółtej	Temperatura topnienia °C	min. 78	Lepiszczce przy produkcji materiałów ogniotrwałych, do materiałów ściernych i ciernych, do wytwarzania tłoczyw, zalecany z ciekłymi żywicami rezolowymi
		Droga płynięcia, tabletki 1 g, mm	40÷70	
		Czas żelowania w 150°C, s	max 1,30	
		Pozostałość na sicie o boku 0,056 mm, %	max 5,0	

TABELA 3. Parametry tkaniny szklanej [3]
TABLE 3. Parameters of the glass-fabric [3]

Krośnieńskie Huty Szkła KROSNO S.A.					
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 z włókien szklanych o średnicy 11, 16 lub 20 μ m otrzymanych z bezalkalicznego boro-gli-no-krzemowego szkła typu E. Wykończeniem jest chemicznie czynna preparacja winylosilanova lub metakrylosilanova.					

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

PLAN I METODYKA BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Udziały poszczególnych składników próbek oraz liczba wykonywanych doświadczeń zostały ustalone na podstawie przyjętego planu doświadczenia (w oparciu o literaturę zagadnienia), tj.: ortogonalnej macierzy pełnoczynnikowej pierwszego rzędu 2^3 z powtórzeniami [5].

Trzema zmiennymi niezależnymi x_i (parametrami wejściowymi), o wartościach dwu poziomów („+” górny oraz „-” dolny) są udziały komponentów kompozycji:

- x_1 - udział wagowy materiału osnowy (żywic) w kompozycji [%]
 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 napełniacza Al_2O_3 do sumy wag obu napełniaczy [%]
 (przy czym poziom „0” oznacza 50% Al_2O_3 i 50% C, poziom górny oznacza 80% Al_2O_3 oraz 20% C, zaś poziom dolny - 20% Al_2O_3 oraz 80% C)
 $\Delta x_3 = 30\%$ $x_{3sr} = 50\%$.

Funkcją odpowiedzi (parametrem wyjściowym) jest średnia wagowa intensywność zużywania ściernego \bar{I}_z [mg/s].

Przeprowadzono analizę statystyczną osiągniętych wyników w celu określenia progu istotności współczynników regresji b_i i oceny ich wpływu na wartość parametru wyjściowego \bar{y} [5].

Obliczone wartości współczynników regresji w połączeniu z wartościami funkcji \bar{y} posłużyły do ustalenia parametrów x_1, x_2, x_3 dla doświadczeń uzupełniających w celu osiągnięcia obszaru prawie stacjonarnego [5], czyli obszaru, w którym występuje spadek intensywności zużywania (gdzie \bar{I}_z przyjmuje wartość minimalną).

OKREŚLENIE INTENSYWNOŚCI ZUŻYWANIA ŚCIERNEGO LAMINATÓW HYBRYDOWYCH

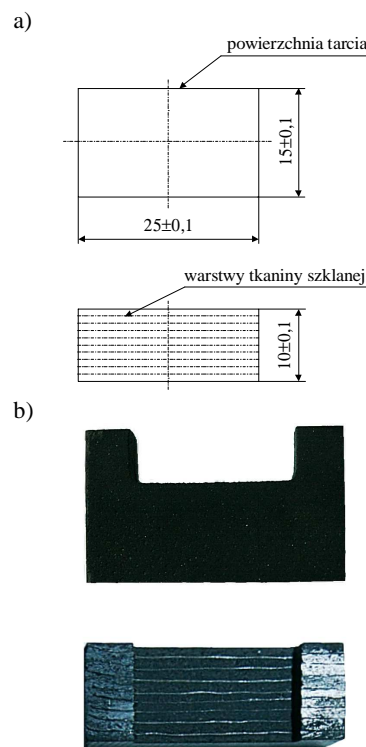
Do określenia stopnia oporności na zużywanie ściernie badanej grupy laminatów hybrydowych zastosowano zmodyfikowany tester T-07 przeznaczony do oceny oporności na zużycie materiałów i pokryć metalowych podczas tarcia o luźne ścierniwo z zachowa-

niem warunków i parametrów badań zalecanych przez producenta (tab. 4).

TABELA 4. Parametry i warunki badań ściernych [6]
 TABLE 4. Parameters and conditions of abrasive research [6]

Siła docisku próbki do przeciwpróbki: $P = 44$ N	Ścierniwo: elektrokorund, nr 90 wg PN-76/M-59115
Prędkość obrotowa przeciwpróbki: $n = 60$ obr/min	Czas testu: $N_b = 400$ obr (400 s); 1000 obr (1000 s)
Przeciwpróbka: wg wymogów producenta testera [6]	Wielkość badana: intensywność zużywania I_z , mg/s

Materiał na próbki uformowano bezciśnieniowo z wykorzystaniem stalowej formy, przy czym temperatura utwardzenia wynosiła $150^\circ C$, a czas utwardzania 1 h. Po wyjęciu z formy materiał był rozcinany na próbki. Kształt i wymiary badanej próbki przedstawiono na rysunku 1a, a na rysunku 1b zdjęcie przykładowej próbki po przeprowadzeniu próby ściernia. Powierzchnia zużywania oraz kierunek działania siły tarcia były ustalone prostopadle do warstw tkaniny szklanej laminatu (rys. 1a).



Rys. 1. Próbką materiałowa do badań: a) rysunek konstrukcyjny, b) próbka po próbie ścierności

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

Próbki ważono przed i po próbie ścierności z dokładnością do 1 mg. W oparciu o wykonane pomiary określono średnią wagową intensywność zużywania w każdym z 8 doświadczeń.

W tabeli 5 zaprezentowano wartości wszystkich obliczonych masowych intensywności zużycia ściernego

I_z [mg/s] podczas tarcia o luźne ścierniwo próbek materiałowych na tle ich gęstości właściwej ρ_{jk} [g/cm³]. Przedstawiono także średnią arytmetyczną wartość intensywności zużycia ściernego \bar{I}_z [mg/s] dla każdej pary pojedynczego doświadczenia w trzech seriach prób.

Realizując analizę statystyczną, obliczono współczynniki regresji, wariancję, błąd wyznaczenia współczynników regresji oraz ich poziom istotności. Graficzną interpretację wyników obliczeń pokazano na rysunku 2.

W wyniku przeprowadzonych rozważań otrzymano równanie funkcji odpowiedzi w postaci:

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

TABELA 5. Gęstość właściwa i intensywność zużycia ściernego badanych kompozytów
TABLE 5. The proper thickness and intensity of abrasive waste of investigated laminates

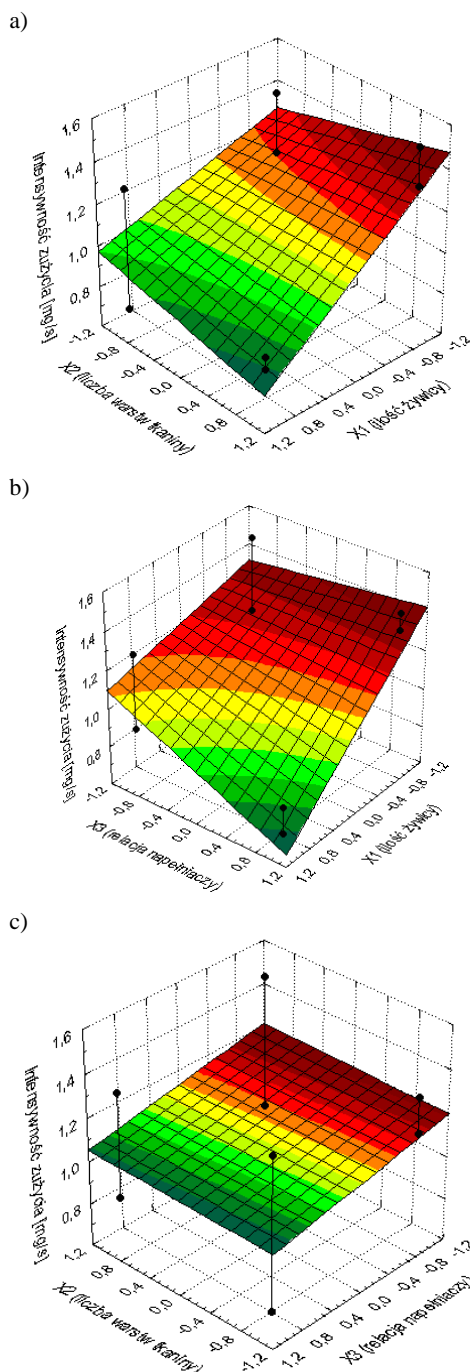
Nr doświadczenia <i>j</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	
Gęstość próbki ρ_{jk} , g/cm ³									
ρ_{jk}	1*	1,16	1,10	1,19	1,19	1,57	1,53	1,62	1,57
	2*	1,10	1,10	1,19	1,22	1,61	1,51	1,71	1,56
Masowa intensywność zużycia ściernego I_z , mg/s									
I_z (1000 s)	1*	1,026	1,33	1,815	0,957	1,651	0,583	1,115	0,822
	2*	1,192	1,224	1,18	0,81	1,152	0,8	1,513	0,832
\bar{I}_z (1000 s)		1,109	1,277	1,498	0,884	1,402	0,692	1,314	0,827
I_z (400 s)	1*	2,02	1,5	2,04	1,295	1,69	0,737	1,516	0,837
	2*	1,98	1,45	2,01	1,255	1,61	0,713	1,484	0,813
\bar{I}_z (400 s)		2,000	1,475	2,025	1,275	1,650	0,725	1,500	0,825
I_z (400 s (-18°C))	1*	2,025	1,425	1,625	1,275	1,15	0,45	0,85	0,5
	2*	2,075	1,375	2,05	1,025	1,625	0,575	1,325	0,625
\bar{I}_z (400 s (-18°C))		2,050	1,400	1,838	1,150	1,388	0,513	1,088	0,563

* numery 1 i 2 oznaczają kolejną próbę *j*-tego doświadczenia

Na rysunku 3 przedstawiono zestawienie średnich masowych intensywności zużycia ściernego dla wszystkich doświadczeń (każdego badanego składu fazowego kompozytu) z uwzględnieniem warunków prowadzenia prób ścierania.

Można zauważyć, że dla wszystkich składów fazowych próbek wraz z upływem czasu trwania próby ścierania intensywność zużycia kompozytu maleje. Wynikać to może z uprzedniego zużywania się miękkiej żywicy, by dopiero w dalszej części procesu wystąpiło tarcie o twardsze cząstki napełniacza lub włókna szklanego stabilizującego intensywność zużywania (szczególnie w przypadku, gdy napełniaczem w przewodzie jest korund). Może to być także efekt docierania powierzchni

próbki, który uwidoczni się dopiero w trakcie 1000 s próby zużywania.

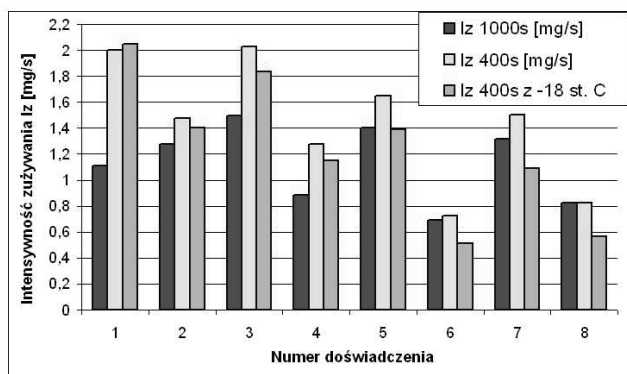


Rys. 2. Zależność intensywności zużywania ściernego I_z od wartości zmiennych kodowych: a) $x_3 = 0$ (50% C i 50% Al_2O_3), b) $x_2 = 0$ (10 warstw tkaniny), c) $x_1 = 0$ (27% żywicy)

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), c) $x_1 = 0$ (27% resins)

Próbki składowane w temperaturze $-18^\circ C$ charakteryzują się mniejszą intensywnością zużywania niż przechowywane w standardowych warunkach laboratoryjnych - jest to szczególnie widoczne w przypadku większej zawartości wagowej korundu w stosunku do pyłu grafitowego. Zależność ta może być spowodowana zu-

zywaniem ściernym w zakresie temperatury charakterystycznej - gdy występuje stabilizacja zużywania - przy najmniej w początkowym okresie trwania próby, aż do wystąpienia wzrostu temperatury powierzchni trącej.



Rys. 3. Intensywności zużycia ściernego dla poszczególnych stanów doświadczenia oraz różnych parametrów badań

Fig. 3. The intensity of abrasive waste for each conditions of the experience and different parameters of research

Dla przyjętego zakresu zmienności zmiennych niezależnych, analizując otrzymane wyniki doświadczeń oraz obliczenia, możemy zauważyć, że:

- im większa zawartość żywic w kompozycie, tym intensywność zużywania mniejsza;
- wraz ze wzrostem zawartości Al_2O_3 (spadkiem zawartości węgla) intensywność zużywania zmniejsza się;
- w przyjętym zakresie zmiennej x_2 nie ma znaczenia liczba warstw tkaniny szklanej, choć wraz z jednoczesnym zwiększeniem x_2 i x_1 obserwujemy poprawę odporności na ścieranie;
- wraz z równoczesnym zwiększeniem wszystkich trzech zmiennych w sposób istotny spada odporność na zużywanie ściernie kompozytu. Zależność tę wyjaśnić można mniejszym udziałem procentowym Al_2O_3 (wpływającym korzystnie na odporność ścierną) w próbkach z większą liczbą warstw tkaniny szklanej.

WNIOSKI

1. Większy udział żywic, w przyjętym zakresie zmienności, gwarantujący wysoki stopień przesylenia, oraz

duża zawartość twardego korundu są warunkami koniecznymi zwiększenia odporności na zużywanie ściernie badanej grupy laminatów fenolowo-formaldehadowych.

2. W przyjętym zakresie zmiennych niezależnych największą odporność na zużywanie ściernie kompozytu uzyskamy przy maksimum zawartości Al_2O_3 i jednoczesnym minimum zawartości węgla, stosując jak największe nasycenie żywicami z 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.
4. Jednoczesne zwiększenie liczby warstw tkaniny szklanej i zawartości korundu kosztem zawartości grafitu, przy zachowaniu zerowego poziomu żywic, jest praktycznie nieistotne z punktu widzenia polepszenia właściwości tribologicznych.
5. Zastosowanie wszystkich zmiennych x_i na górnych poziomach powoduje znaczny spadek odporności na zużycie ściernie, szczególnie dla długiego czasu tarcia.
6. Niska temperatura w styku tarciovym ogranicza proces zużywania ściernego. Jest to szczególnie widoczne w przypadku dużej zawartości korundu.

LITERATURA

- [1] Janecki J., Zużycie części samochodowych wykonanych z tworzyw sztucznych, WKiŁ, Warszawa 1982.
- [2] Materiały marketingowe ZCh ORGANIKA-SARZYNA w Nowej Sarzynie 2000.
- [3] Materiały marketingowe Krośnieńskich Hut Szkła KROSNO S.A. 2000.
- [4] Materiały marketingowe firmy AJKA ALUMINA Co. Ltd. 2000.
- [5] Polański Z., Planowanie doświadczeń w technice, PWN, Warszawa 1984.
- [6] Tester do badania ścieralności T-07, Instrukcja obsługi. ITE w Radomiu, Radom 1995.
- [7] Wojtkun F., Sołncew Ju.P., Materiały specjalnego przeznaczenia, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2001.
- [8] Kucharczyk W., Żurowski W., Odporność na zużycie ściernie hybrydowych laminatów termoutwardzalnych o właściwościach ablacyjnych, Tribologia 2003, 4(190), 279-288.