

**Prof. dr hab. inż. Andrzej Baier, dr inż. Sławomir Żółkiewski**

Wydział Mechaniczny Technologiczny  
Politechnika Śląska  
Akademicka 2A, 44-100 Gliwice, Polska  
E-mail: slawomir.zolkiewski@polsl.pl

## **Badania wstępne ścieralności laminatów o osnowie epoksydowej i poliestrowej do zastosowania w budowie poszycia wagonu towarowego**

**Słowa kluczowe:** *ścieranie, tarcie, kompozyty, laminaty, zużycie trybologiczne*

**Streszczenie:** Praca dotyczy badań wstępnych ścieralności laminatów o osnowie epoksydowej i poliestrowej. Eksploatacja różnego rodzaju zbiorników do zastosowań przemysłowych często wiąże się z użyciem materiałów kompozytowych narażonych na zużycie trybologiczne. Zasadne jest więc podjęcie istotnych z technicznego i technologicznego punktu widzenia badań ścieralności tych materiałów. Prezentowane w pracy wyniki badań eksperymentalnych są jedynie częścią szeroko zakrojonych badań materiałów kompozytowych mających zastosowanie w budowie burt wagonów towarowych. Przedstawiono wyniki badań laminatów, przeprowadzonych na autorskim stanowisku laboratoryjnym do porównawczego badania zużycia ściernego odzwierciedlającego warunki pracy wagonu towarowego. Zestawiono przykładowe parametry struktury geometrycznej profilu oraz ubytki masowe badanych próbek zarówno w przypadku próbek epoksydowych jak i poliestrowych oraz różnych, zastosowanych utwardzaczy.

### **1. Wprowadzenie**

Zjawisko tarcia występuje we wszystkich procesach technicznych i technologicznych, jego powszechność powoduje, że tarcie jest niezwykle ważne z inżynierskiego i naukowego punktu widzenia. W uproszczonej definicji tarcia mówi się o jego występowaniu podczas kontaktu ze sobą różnych elementów wykonanych z odmiennych lub tych samych tworzyw. Do najczęstszych rozważań tarcia można zaliczyć badania nad jego negatywnym wpływem na strukturę elementów, części maszyn i mechanizmów. Występowanie tarcia jest głównym powodem uszkodzenia części maszyn na przykład ze względu na zużycie ściernie, co w znaczącym stopniu pogarsza właściwości eksploatacyjne, a bardzo często uniemożliwia dalsze użytkowanie, istotnie obniżając niezawodność całego układu. Do niezwykle ważnych kryteriów należy zatem zaliczyć uwzględnienie zużycia trybologicznego już na etapie projektowania oraz przy doborze tworzyw o określonej odporności na zużycie ściernie, co z pewnością może przyczynić się do prawidłowej i niezawodnej pracy wytworzonych obiektów [1, 3, 7, 11, 22-27]. Objawami zużycia trybologicznego są między innymi kruszenie i pękanie tworzywa, zużycie ściernie, zmęczeniowe, chemiczne itd. Zużycie trybologiczne wynika z oddziaływania sił tarcia, poprzez co jest jednym z najbardziej powszechnych i istotnych z punktu widzenia trwałości i niezawodności konstrukcji. Do najczęściej występujących objawów zużycia trybologicznego zalicza się zużycie ściernie. Zużycie to powstaje poprzez wzajemne oddziaływanie na siebie materiałów przemieszczających się względem siebie. Objawia się to odrywaniem cząstek z warstwy wierzchniej, progresywnym ubytkiem objętości tworzywa oraz pogorszeniem stanu powierzchni [3, 7, 8, 16, 17, 24].

Badania eksperymentalne materiałów kompozytowych wciąż są nieodzowne i są ściśle związane z wyznaczaniem wielu parametrów i właściwości materiałowych. Kompozyty na bazie zbrojenia włóknem są stosowane w rozlicznych układach technicznych. W układach tych zużycie ściernie bardzo często zapoczątkowuje poważne uszkodzenia całego systemu technicznego. Do rozlicznych tego typu przykładów można zaliczyć: przenośniki taśmowe, łopatki, przekładnie, panewki, tuleje, uszczelki, łożyska, pompy ściekowe z różnego rodzaju zawieszinami i płynami zawierającymi ścierniwo, pokrycia zsuwni stosowanych z sprzęcie rolniczym, sprzęt do robót ziemnych, itp. [2, 5, 6, 9, 18, 21, 22]. W pracy [19] autorzy prezentują wyniki badań określających wzrost zużycia ściernego kompozytów na bazie aluminium wraz ze wzrostem obciążenia, wzrostem rozmiaru ścierniwa oraz zmniejszeniem odległości od mechanizmu ścierającego. Autorzy pracy [4] przedstawili wyniki badań eksperymentalnych wieloprzebiegowego ścierania dwóch elementów, badając zużycie ściernie poliestrowego kompozytu zbrojonego włóknem szklanym. Autorzy wykazali, że dominującymi mechanizmami ścierania są: mikroskrawanie, mikropęknięcie, mikrozmęczenie występujące w formie oraz na końcówkach włókien. Badania przeprowadzono przy różnych parametrach takich jak: różne obciążenia, zadane prędkości obrotowe oraz różne rozmiary cząstek ścierniwa. W ostatnich latach rozwijana jest metodologia projektowania i badania materiałów kompozytowych w aspekcie doboru pożądanych parametrów, które są decydujące w wydajności układu. W pracy [20] podjęto próbę przeanalizowania wpływu kilku wybranych parametrów (wraz z uwzględnieniem ich wzajemnego oddziaływania) na zużycie udarowe materiałów kompozytowych z włókien szklanych w osnowie epoksydowej. Metodę tę wykorzystano również do oceny parametrów związanych z wytrzymałością udarową kompozytów polimerowych [10, 12].

Celem pracy było wstępne zbadanie ścieralności wybranych próbek kompozytowych o osnowie epoksydowej i poliestrowej, poprzez porównanie ubytku masowego próbek oraz zestawienie parametrów profilu geometrycznego przed i po badaniach. Porównano wstępnie właściwości ściernie wybranych laminatów wykonanych z tkanin z włókna szklanego i węglowego, o różnym rodzaju splotu i gramaturze, a także przy zastosowaniu różnych utwardzaczy.

## **2. Koncepcja stanowiska do badania ścieralności oraz metodyka badań**

Tworzywa wykorzystywane do budowy poszycia wagonów towarowych powinny charakteryzować się na tyle dużą odpornością, aby przesypujący się po nich ładunek nie spowodował zniszczenia ich powierzchni, co w konsekwencji uniemożliwiłoby dalszą eksploatację. Wymagania związane z budową i eksploatacją kolejowych pojazdów szynowych, określają normy przedmiotowe określone przez Międzynarodowy Związek Kolei (UIC), Organizację Współpracy Kolei oraz Narodowe Komitety Normalizacyjne. Dotychczas nie ustalono wytycznych dotyczących odporności na ścieranie tworzyw wykorzystywanych w konstrukcji pudła wagonu towarowego. Tworzywa te weryfikuje się ze względu na zdefiniowane wymagania wytrzymałościowe (wytrzymałość na obciążenia statyczne, wytrzymałość eksploatacyjną i zmęczeniową, a także wytrzymałość na obciążenia wywołane drganiem oraz nabieganiem).

Podczas opracowywania koncepcji stanowiska badawczego zdecydowano się na realizację autorskiego projektu, w którym uwzględniono warunki pracy poszycia wagonu towarowego podczas wielokrotnych załadunków i rozładunków. Głównym elementem proponowanej koncepcji stanowiska pomiarowego (rys. 1) jest cylindryczny zbiornik, który wprowadzany jest w ruch obrotowy za pomocą silnika elektrycznego. Prosta koncepcja

umożliwia budowę stanowiska laboratoryjnego przy niskim nakładzie kosztów, zapewniając jednocześnie łatwą obsługę i eksploatację urządzenia. Więcej informacji dotyczących układu sterowania, parametrów napędu, parametrów ścierniwa oraz stopnia wypełnienia ścierniwem w obrotowym bębnie stanowiska laboratoryjnego, a także poszczególnych parametrach jego pracy przedstawiono w opracowaniu [1].



Rys. 1. Koncepcja i realizacja budowy stanowiska laboratoryjnego do badania odporności na ścieranie

Wymiary próbki badanego materiału określono za pomocą przedziałów: długość od 170 do 190 mm, oraz szerokość od 30 do 100 mm, tak by próbka mogła być zamocowana wewnątrz obrotowego bębna w przeznaczonym do tego celu mocowaniu na drzwiczkach. Grubość próbki, która jest poddawana badaniu nie powinna w tym przypadku przekraczać 10 mm. Wybór rzeczywistych wymiarów, mieszczących się w tych wytycznych uzależniony jest od konkretnych wymagań użytkownika.

Przeprowadzenie badania polega na wstępnym określeniu liczby obrotów bębna, (w którym znajduje się materiał ścierający) pomiędzy kolejnymi pomiarami ubytku masy oraz parametrów chropowatości dotyczących badanych próbek. Szczególnie istotne w przypadku opisywanego stanowiska laboratoryjnego jest również dobranie odpowiedniej prędkości obrotowej, która umożliwi stabilną pracę urządzenia w wykonywanej serii badań. W rozważanym przypadku prędkość obrotowa wynosiła ok. 60 obr/min w stanie ustalonym.

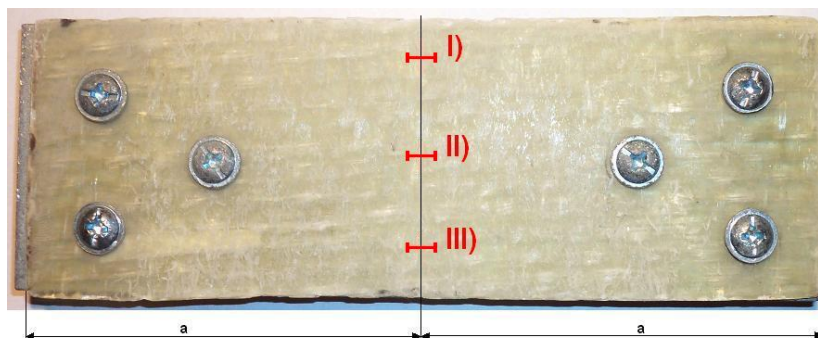
Zaprojektowane stanowisko laboratoryjne umożliwia odwzorowanie procesu ścierania się materiału użytego przy budowie wagonu kolejowego. Jednak aby przeprowadzić badania, które pozwolą na ocenę czy wybrane kompozyty nadają się do takiego zastosowania, konieczne było określenie parametrów materiałowych opisujących stopień zużycia ściernego w czasie trwania próby. Pozwoliło to zaobserwować jaki wpływ na badaną próbkę ma ścieranie przez, użyte do tego celu, luźne ścierniwo mineralne.

Pierwszym parametrem, który wykorzystano do sprawdzenia zużycia ściernego badanego materiału jest ocena wizualna badanej próbki. Przed i po wykonaniu badania stan powierzchni próbki był poddany ocenie wizualnej. Umożliwiło to określenie wpływu oddziaływania ścierniwa na próbkę. Ocena przeprowadzona w ten sposób jest jednak subiektywna i niedokładna, dlatego nie może być jedyną cechą braną pod uwagę przy porównywaniu materiałów.

Kolejnym parametrem określającym zmiany wywołane przez wykonanie pomiaru jest ubytek masowy. Próbkę ważono przed i po wykonaniu badania, co pozwoliło określić jaką stratę materiału powoduje ścierniwo w trakcie przeprowadzania pomiaru. Stanowiło to

czynnik porównawczy pomiędzy poszczególnymi laminatami poddany badaniu. Próbki ważono z dokładnością do 0,01g.

Dodatkowo, aby zaobserwować w jaki sposób ścierniwo oddziałuje na powierzchnię badanego materiału, próbki przebadano profilometrem. Pozwoliło to na ocenę profilu chropowatości, co odzwierciedla uszkodzenia wywołane działaniem ścierniwa, a także na ocenę maksymalnej głębokości do jakiej uszkodzony został badany materiał. Pomiar wykonano na profilometrze firmy Tylor – Hobson SURTRONIC 3+ w sposób przedstawiony na rysunku 2.



Rys. 2. Trzy odcinki pomiarowe odmierzane na badanej próbce

Po przeprowadzeniu pomiaru za pomocą profilometru uzyskano wykresy chropowatości, dzięki którym możliwa była ocena stanu powierzchni badanego materiału. Pomiar przeprowadzono na trzech odcinkach pomiarowych znajdujących się w środkowej części próbki (rys. 2). Każdy odcinek pomiarowy składa się z pięciu odcinków elementarnych. Odcinki elementarne (0,8mm) oraz odcinki pomiarowe (4mm) dobrano zgodnie z normą PN-ISO 4288.

### 3. Badania ścieralności kompozytów

W pracy przedstawiono wybrane wyniki z badań eksperymentalnych na stanowisku laboratoryjnym. Przeprowadzono pomiary na wybranych próbkach laminatowych określając porównawczo odporność na ścieranie (tablica 1).

#### 3.1. Materiał ścierający

Wybór materiału, stanowiącego ścierniwo przy wykonywaniu pomiarów, odbył się drogą doświadczalną. Jako materiał ścierający zastosowano granit. Kamienie, które miały powodować ścieranie i niszczenie powierzchni badanych próbek, powodowały również wzajemne ścieranie i zaokrąglanie ostrych krawędzi. Materiał ścierający był wymieniany po zakończeniu wszystkich cykli badań dotyczących pojedynczej próbki.

#### 3.2. Materiał badawczy

Coraz powszechniej w przemyśle stosuje się specyficzną grupę kompozytów, którą to grupę tworzą laminaty. Produkcja laminatów polega na nasycaniu wybranej tkaniny (z włóknami: szklanymi, węglowymi, amidowymi) żywicą epoksydową lub poliestrową oraz prasowaniu kolejnych warstw laminatu. Powierzchnię tych materiałów stanowi żywica, która jako pierwsza wystawiona jest na oddziaływanie wywołujące ścieranie. Pomiary próbne wykonano oceniając zróżnicowanie procesu ścierania powierzchni badanego elementu ze względu na wielkość próbki. Przeprowadzono znaczną liczbę testów, zmieniając wielkość analizowanego materiału korelując to z zaobserwowanymi wynikami ścierania.

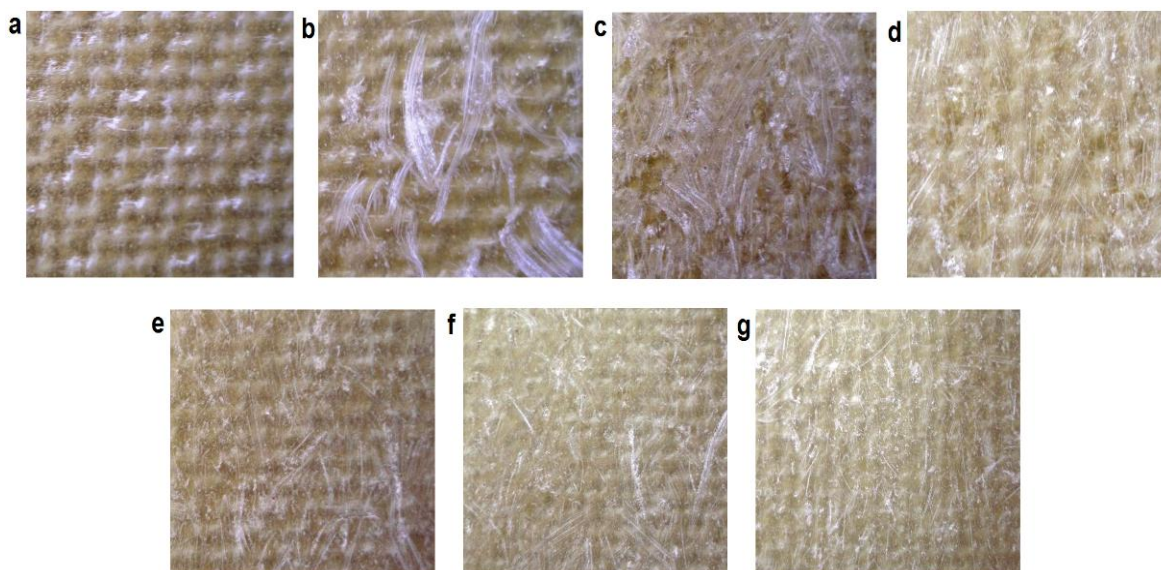
Tablica 1. Wykaz badanych laminatów

Nr próbki	Osnowa	Zbrojenie	Liczba i ułożenie warstw	Ilość żywicy z utwardzaczem na m <sup>2</sup> tkaniny, zalecana przez producenta /zastosowana	Uzyskany udział zbrojenia	Grubość próbki / masa próbki	Utwardzacz
1	Żywica epoksydowa Epidian 6	Tkanina szklana, o splocie skośnym, 450g/m <sup>2</sup>	5 (0/90/0/90/0)	330g/300g	60%	2,59mm/ 31,74g	Utwardzacz PAC w ilości ok. 80g utwardzacza na 100g żywicy
2	Żywica poliestrowa Polimal 1094 AWTP-1	Roving szklany, 400g/m <sup>2</sup>	3 (0/90/0)	350g/365g	50%	1,46mm/ 20,47g	Utwardzacz Luperox K-1 w ilości ok. 1,5%
3	Żywica poliestrowa Polimal 1094 AWTP-1	Tkanina szklana, o splocie skośnym, 450g/m <sup>2</sup>	3 (0/90/0)	350g/355g	56%	1,61mm/ 20,52g	Utwardzacz Luperox K-1 w ilości ok. 1,5%
4	Żywica epoksydowa Epidian 6	Roving szklany 400g/m <sup>2</sup>	4 (0/90/90/0)	350g/355g	54%	2,13mm/ 25,14g	Utwardzacz Luperox K-1 w ilości ok. 1,5%
5	Żywica poliestrowa Polimal 1094 AWTP-1	Roving szklany, 400g/m <sup>2</sup>	3 (0/90/0)	350g/350g	53%	1,69mm/ 19,12g	Utwardzacz PAC w ilości ok. 80g utwardzacza na 100g żywicy
6	Żywica poliestrowa Polimal 1094 AWTP-1	Tkanina szklana, o splocie skośnym, 450g/m <sup>2</sup>	4 (0/90/90/0)	350g/385g	54%	2,55mm/ 28,43g	Utwardzacz PAC w ilości ok. 80g utwardzacza na 100g żywicy
7	Żywica epoksydowa Epidian 6	Tkanina szklana, o splocie skośnym, 450g/m <sup>2</sup>	3 (0/90/0)	330g/335g	57%	1,33mm/ 20,02g	Utwardzacz Luperox K-1 w ilości ok. 1,5%
8	Żywica epoksydowa Epidian 6	Tkanina szklana powleczona aluminium, o splocie skośnym, 290g/m <sup>2</sup>	7 (0/90/0/90/0/90/0)	225g/240g	55%	2,43mm/ 31,63g	Utwardzacz PAC w ilości ok. 80g utwardzacza na 100g żywicy
9	Żywica epoksydowa Epidian 6	Tkanina węglowa, o splocie skośnym, 280g/m <sup>2</sup>	3 (0/90/0)	330g/265g	51%	1,19mm/ 13,97g	Utwardzacz Luperox K-1 w ilości ok. 1,5%

Po przeprowadzonych badaniach na zaprojektowanym stanowisku laboratoryjnym zaobserwowano brak wpływu rozmiaru próbki (długości, szerokości i grubości) na proces ścierania. Powierzchnia próbek była poddawana standardowym oddziaływaniom ściernym. Przyjęto, że do badań stosuje się próbki o szerokości 50 mm oraz długości 170 mm oraz różnych grubościach (bezpośrednio wynikających z zastosowanej tkaniny, żywicy, utwardzacza i technologii wytworzenia).

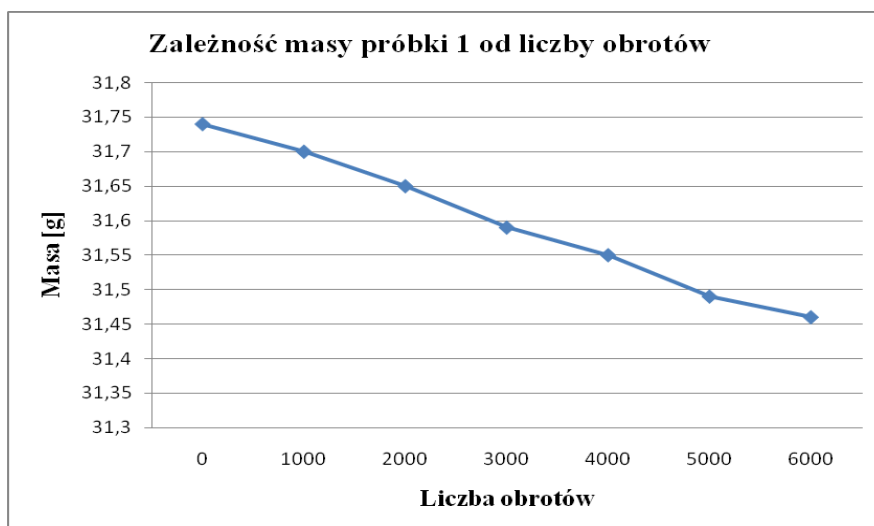
### 3.3. Przykładowe wyniki

Badania przeprowadzono na próbkach wykonanych z użyciem żywicy epoksydowej (rys. 3) oraz żywicy poliestrowej (rys. 5), stosując przy tym różnego rodzaju tkaniny, zestawienie przykładowych próbek przedstawiono w tablicy 1.



Rys. 3. Wizualna ocena stanu powierzchni przykładowego laminatu z żywicy epoksydowej i tkaniny szklanej o skośnym splocie (próbka 1): a – przed pomiarem, b – po 1000 obrotów, c – po 2000 obrotów, d – po 3000 obrotów, e – po 4000 obrotów, f – po 5000 obrotów, g – po 6000 obrotów

Pomiaru ubytku masowego na skutek ścierania dokonywano przed każdym kolejnym etapem badania, a zależność masy od liczby wykonanych obrotów bębna przedstawiono na rysunku 4. Wprawdzie ubytek masy nie jest proporcjonalny jednakże jego wartości w poszczególnych etapach badania są do siebie bardzo zbliżone.

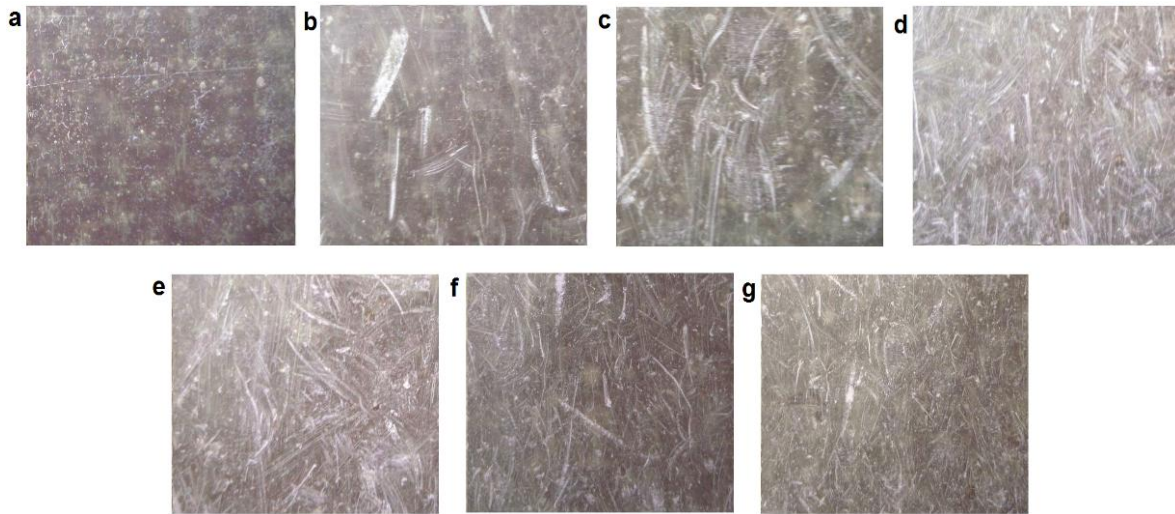


Rys. 4. Wykres zależności masy laminatu z żywicy epoksydowej i tkaniny szklanej o skośnym splocie (próbka 1) od liczby obrotów bębna stanowiska laboratoryjnego

Na rysunku 5 przedstawiono laminat wytworzony z żywicy poliestrowej oraz rovingu szklanego. Podobnie jak poprzednio (rys. 3), wykonano sześć etapów badania co tysiąc obrotów aż do sześciu tysięcy obrotów. Zmianę stanu powierzchni próbki przedstawiono na rysunku 5. W trakcie kolejnych pomiarów zaobserwowano zwiększenie liczby rys oraz ogólne pogorszenie powierzchni laminatu. Powstałe zarysowania, bruzdy i wgłębienia

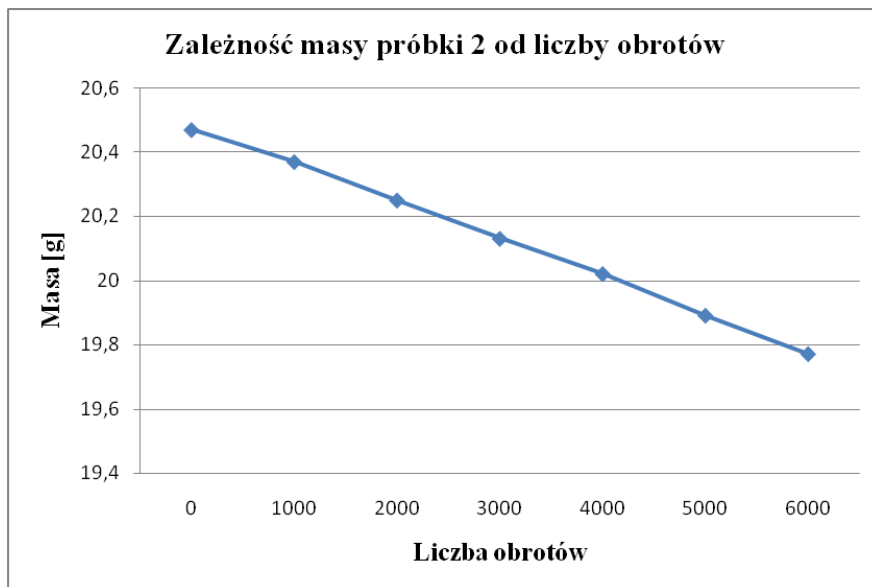


rozłożone są na powierzchni laminatu w sposób losowy, co wynika z braku ukierunkowanego charakteru ścierania, a jednocześnie jest dość wiernym odwzorowaniem rzeczywistego zużywania się tworzywa w wagonach towarowych.



Rys. 5. Stan powierzchni laminatu z żywicy poliestrowej i rovingu szklanego (próbka 2): a – przed pomiarem, b – po 1000 obrotów, c – po 2000 obrotów, d – po 3000 obrotów, e – po 4000 obrotów, f – po 5000 obrotów, g – po 6000 obrotów

Zależność masy od liczby obrotów bębna urządzenia w trakcie pomiaru próbki 2 (tablica 1) przedstawiono na rysunku 6. Ubytek masy zachowuje również w tym przypadku swój liniowy charakter.



Rys. 6. Wykres zależności ubytku masowego laminatu z żywicy poliestrowej i rovingu szklanego (próbka 2) od liczby obrotów bębna stanowiska laboratoryjnego

W tablicy 2 przedstawiono parametry struktury geometrycznej powierzchni badanej próbki z włókna szklanego w osnowie żywicy epoksydowej (próbka 1).

Tablica 2. Parametry struktury geometrycznej powierzchni próbki z włókna szklanego ( $450\text{g/m}^2$ ) w osnowie żywicy epoksydowej (próbka 1) w pierwszym odcinku pomiarowym przed badaniami

Wartości pomiarów – próbka epoksydowa z włókna szklanego					
	I pomiar	II pomiar	III pomiar	śr. wynik	
$R_p$	2,21	2,29	2,24	2,25	Wysokość najwyższego wzniesienia profilu
$R_v$	1,17	1,22	1,15	1,18	Głębokość najniższego wgłębienia profilu
$R_z$	3,38	3,51	3,39	3,43	Największa wysokość profilu
$R_c$	2,07	1,71	1,70	1,83	Średnia wysokość elementów profilu
$R_t$	9,16	5,96	6,05	7,06	Całkowita wysokość profilu
$R_a$	0,52	0,48	0,43	0,48	Średnia arytmetyczna rzędnych profilu
$R_q$	0,68	0,65	0,64	0,66	Średnia kwadratowa rzędnych profilu

W praktyce najpopularniejszym parametrem chropowatości jest średnia arytmetyczna rzędnych profilu ( $R_a$ ). Parametr ten uniemożliwia jednak uzyskanie precyzyjnych informacji o strukturze geometrycznej powierzchni oraz o rozkładzie rzędnych profilu. W związku z tym pomiary uzupełniono o następujące parametry struktury geometrycznej: największa wysokość profilu ( $R_z$ ), średnia wysokość elementów profilu ( $R_c$ ), całkowita wysokość profilu ( $R_t$ ) oraz kwadratową średnią rzędnych profilu ( $R_q$ ), na której wartość istotny wpływ mają pojedyncze wysokie wzniesienia i duże wgłębienia profilu. Największa wysokość profilu ( $R_z$ ) chropowatości jest sumą wysokości najwyższego wzniesienia profilu ( $R_p$ ) oraz głębokości najniższego wgłębienia profilu ( $R_v$ ). W większości przypadków, duże znaczenie eksploatacyjne mają również kurtoza ( $R_{ku}$ ) i skośność profilu ( $R_{sk}$ ), które nie charakteryzują jedynie wysokości wzniesień i głębokości wgłębień, ale przede wszystkim ich kształt.

W tablicy 3 przedstawiono parametry struktury geometrycznej powierzchni próbki z włókna szklanego o gramaturze  $450\text{g/m}^2$  w osnowie żywicy poliestrowej (próbka 3).

Tablica 3. Parametry struktury geometrycznej powierzchni próbki z włókna szklanego ( $450\text{g/m}^2$ ) w osnowie żywicy poliestrowej (próbka 3) w pierwszym odcinku pomiarowym przed badaniami

Wartości pomiarów – próbka poliestrowa z włókna szklanego				
	I pomiar	II pomiar	III pomiar	śr. wynik
$R_p$	1,46	1,62	1,56	1,55
$R_v$	1,08	1,09	1,13	1,10
$R_z$	2,54	2,71	2,68	2,65
$R_c$	1,16	1,18	1,07	1,14
$R_t$	3,70	3,50	3,35	3,52
$R_a$	0,35	0,34	0,33	0,34
$R_q$	0,46	0,47	0,46	0,46

W tablicach 2 i 3 przedstawiono wyniki z pomiarów profilometrem wybranego odcinka na powierzchni próbek kompozytowych w osnowie epoksydowej i próbek w osnowie poliestrowej. Zestawiania wyników dokonano po wykonaniu trzech pomiarów, w każdym, z ustalonych trzech odcinków na powierzchni trzech badanych próbek (tego samego typu). Średnie arytmetyczne tych wyników przedstawiono w tablicy 4, porównując wyniki pomiarów dokonanych przed i po badaniu ścieralności.



Tablica 4. Zestawienie uśrednionych parametrów struktury geometrycznej powierzchni próbek epoksydowych (próbka 1) oraz poliestrowych (próbka 3) przed badaniami i po pierwszym etapie badań

Oznaczenie parametru	Wartości pomiarów – próbka epoksydowa z włókna szklanego				Wartości pomiarów – próbka poliestrowa z włókna szklanego				Porównanie wyników			
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
	Przed badaniami	Po pierwszym etapie badań	Różnica B-A	Różnica procentowa A/C	Przed badaniami	Po pierwszym etapie badań	Różnica F-E	Różnica procentowa E/G	Różnica  A-E	Różnica procentowa (I/A)/(I/E)	Różnica  B-F	Różnica procentowa (K/B)/(K/F)
$R_p$	1,68	4,92	3,24	193	1,67	5,37	3,7	222	0,01	1/1	0,45	9/8
$R_v$	0,9	8,42	7,52	836	1,16	7,55	6,39	551	0,26	29/22	0,87	10/12
$R_z$	2,57	13,33	10,76	419	2,83	12,92	10,09	357	0,26	10/9	0,41	3/3
$R_c$	1,3	6,43	5,13	395	1,25	6,8	5,55	444	0,05	4/4	0,37	6/5
$R_t$	4,27	20,67	16,4	384	3,71	25,96	22,25	600	0,56	13/15	5,29	26/20
$R_a$	0,34	1,93	1,59	468	0,42	1,99	1,57	374	0,08	24/19	0,06	3/3
$R_q$	0,47	2,62	2,15	457	0,54	2,61	2,07	383	0,07	15/13	0,01	0/0

Przed przystąpieniem do badań, wytworzono próbki wykonane w osnowie żywicy epoksydowej i żywicy poliestrowej o zbliżonych wartościach parametrów struktury geometrycznej. Zauważono, że próbki o osnowie poliestrowej, pomimo bardzo zbliżonej wartości najwyższego wzniesienia profilu ( $R_p$ ) posiadały zdecydowanie głębsze najniższe wgłębienia profilu, co jest związane z technologią wytworzenia i własnościami żywicy osnowy. Porównując wartości parametrów chropowatości zamieszczone w tablicy 4 można zaobserwować większą chropowatość próbek kompozytowych w osnowie poliestrowej i to zarówno przed jak i po wykonaniu testów.

Po przeprowadzeniu pierwszego etapu badań, nastąpiło pogorszenie stanu powierzchni zarówno próbki o osnowie epoksydowej jak i o osnowie poliestrowej. Można zaobserwować duże pogorszenie stanu powierzchni próbek kompozytowych o osnowie epoksydowej, co potwierdza w tym przypadku ok. 400 procentowy wzrost wartości parametrów chropowatości ( $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_z$ ,  $R_c$ ,  $R_t$ ). Podobne pogorszenie powierzchni można zauważyć w przypadku próbek kompozytowych o osnowie poliestrowej, przy czym od schematu odbiega zmiana parametru ( $R_v$ ) i całkowita wysokość profilu ( $R_t$ ). Na uwagę zasługuje, zdecydowane zwiększenie głębokości najniższych punktów profilu ( $R_v$ ) w przypadku próbki epoksydowej, o wiele większe niż w przypadku próbki poliestrowej. Można również to powiązać z licznymi wykruszeniami i zarysowaniami, które wystąpiły na powierzchni próbki. Z kolei w próbce poliestrowej nieco bardziej niż w próbce epoksydowej wzrosła wysokość najwyższego punktu profilu ( $R_p$ ).

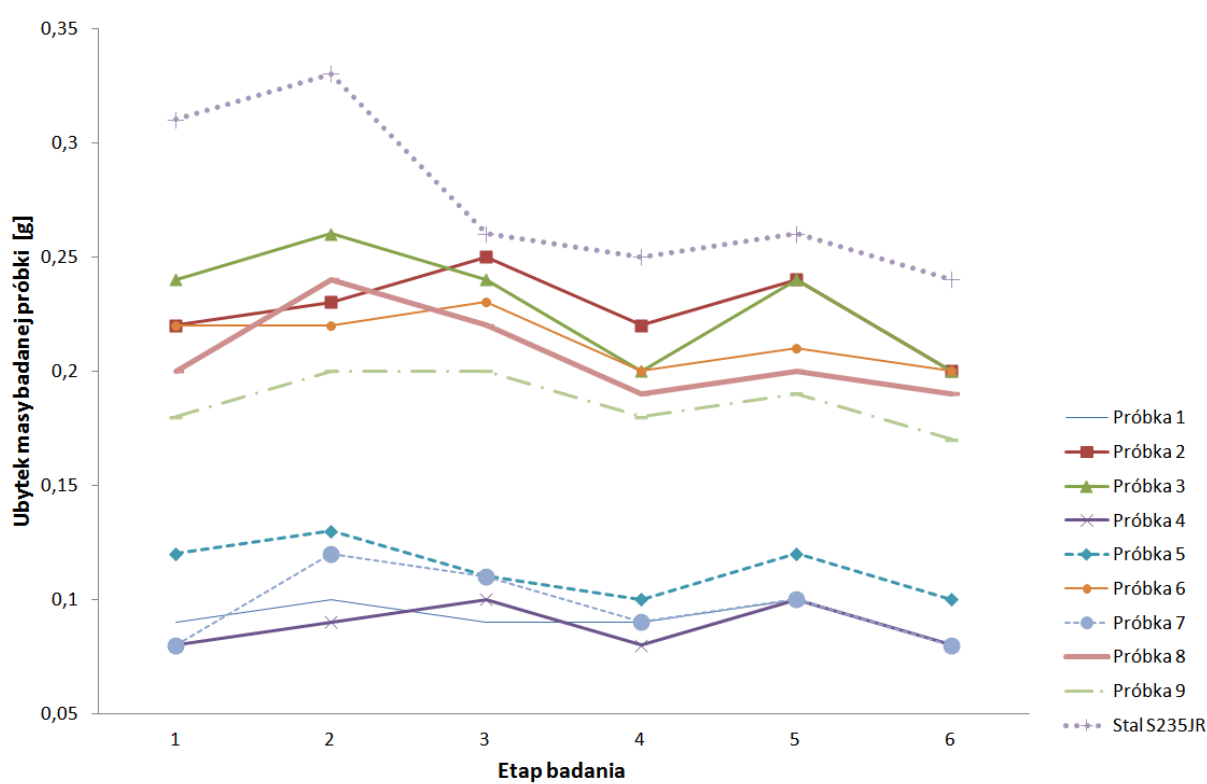
Pomimo, że wartości średnie (arytmetyczna  $R_a$  i kwadratowa  $R_q$ ) rzędnych profilu zdecydowanie bardziej pogorszyły się w przypadku próbki kompozytowej w osnowie epoksydowej to całkowita wysokość profilu próbek ( $R_t$ ) w procentowym ujęciu zwiększyła się bardziej w przypadku próbki poliestrowej. Zarejestrowana wartość głębokości najniższego wgłębienia profilu ( $R_v$ ) potwierdza wyraźne pogorszenie się parametrów chropowatości próbki wykonanej w osnowie żywicy epoksydowej.

W tablicy 5 przedstawiono wartości masy testowanych próbek, dokonanych po 6 kolejnych etapach badania. W każdym etapie badania bęben stanowiska laboratoryjnego wykonywał 2000 obrotów.

Tablica 5. Masa próbek zważonych po kolejnych etapach badania

Etap badania /liczba obrotów bębna	Numer próbki								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Masa próbki [g]								
0	31,74	20,47	20,52	25,14	19,12	28,43	20,02	31,63	13,97
1/2000	31,65	20,25	20,28	25,06	19	28,21	19,94	31,43	13,79
2/4000	31,55	20,02	20,02	24,97	18,87	27,99	19,82	31,19	13,59
3/6000	31,46	19,77	19,78	24,87	18,76	27,76	19,71	30,97	13,39
4/8000	31,37	19,55	19,58	24,79	18,66	27,56	19,62	30,78	13,21
5/10000	31,27	19,31	19,34	24,69	18,54	27,35	19,52	30,58	13,02
6/12000	31,19	19,11	19,14	24,61	18,44	27,15	19,44	30,39	12,85
Procentowy ubytek masy próbki [%]	1,73%	6,64%	6,73%	2,11%	3,56%	4,50%	2,90%	3,92%	8,02%

Na rysunku 7 zestawiono wykresy ubytków masowych poszczególnych próbek po sześciu kolejnych etapach badania. Ze względu na charakter procesu ścierania występujący w przyjętej koncepcji stanowiska laboratoryjnego, odnotowane w poszczególnych etapach badania, ubytki masowe nie są takie same, jednakże wykazują dużą zbieżność. Umożliwia to porównanie poszczególnych wyników i ocenę zużycia ściernego w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, występujących w rozważanych obiektach.



Rys. 7. Zestawienie wykresów ubytku masowego badanych próbek

Porównując ubytek masowy próbek okazało się, że kompozyty wykonane w osnowie żywicy epoksydowej wykazują procentowo mniejszy ubytek masowy niż kompozyty w osnowie żywicy poliestrowej. Takie same rezultaty i wnioski uzyskano w pracy [13],

również porównując próbki wykonane z włókna szklanego w osnowie żywicy epoksydowej oraz żywicy poliestrowej, jednakże za pomocą innej metody badawczej, biorąc pod uwagę zmienne obciążenie, prędkość obrotową i odległość rolki ścierającej. Z kolei kompozyty wykonane z tkanin o wyższej gramaturze po przeprowadzeniu kolejnych etapów badań mają większy ubytek masowy niż kompozyty wykonane z tkanin o niższej gramaturze. Sytuacja taka wystąpiła zarówno w przypadku osnowy poliestrowej jak i epoksydowej oraz bez względu na to, jakiego utwardzacza użyto. Wyniki dotyczące badania ścieralności kompozytów, zgodne z prezentowanymi w niniejszej pracy, uzyskano również w pracach [4, 13-15]. Zdecydowanie najgorszą odporność na ścieranie uzyskano w przypadku próbki z włókna węglowego o najmniejszej gramaturze spośród wszystkich testowanych tkanin (próbka 9). Dodatkowo można również zauważyć wpływ na ścieralność kompozytu zastosowanego utwardzacza. W przypadku wykonywania kompozytów w osnowie z żywicy epoksydowej lepiej sprawdził się utwardzacz PAC z Organika Sarzyna, wykazując również lepszą odporność na ścieranie. Z kolei w przypadku kompozytów w osnowie z żywicy poliestrowej rekomendowany był utwardzacz Luperox K1 produkowany przez Arkema Inc, jednakże nie miało to pozytywnego wpływu na właściwości ścierne.

W grupie przebadanych próbek, kompozyt wykonany z tkaniny z włókna szklanego 450 g/m<sup>2</sup> w osnowie żywicy epoksydowej charakteryzował się największą odpornością na ścieranie, wykazując najmniejszy ubytek masowy zarówno procentowo jak i pod względem wartości.

#### **4. Uwagi końcowe**

W pracy określono wstępnie właściwości ścierne badanych laminatów. Dzięki przeprowadzonym badaniom umożliwiono ocenę zużycia ściernego grupy kompozytów oraz określenie potencjalnej grupy zastosowań technicznych. W badaniach zastosowano metodę okresowego sprawdzania stanu powierzchni oraz ubytku masowego po wykonaniu określonej liczby obrotów bębna na stanowisku laboratoryjnym. W przypadku testowania pojedynczej próbki, w różnych etapach badania, uzyskiwane były porównywalne wyniki, utrata masy laminatów oscylowała wokół podobnej wartości zachowując swój zbliżony do liniowego charakter.

Badania wykazały, że większą odpornością na zużycie ściernie charakteryzują się laminaty wytworzone z wykorzystaniem żywicy epoksydowej niż te, do których uzyskania wykorzystano żywicę poliestrową. W wyniku ścierania, warstwa wierzchnia laminatów składających się z żywicy epoksydowej miała płytsze zarysowania, a cała próbka miała niższy ubytek masowy. Dalsze pomiary wykazały, że odporność na zużycie ściernie rozpatrywanej grupy kompozytów różniła się w poszczególnych przypadkach tkanin o różnej gramaturze. Materiały składające się z tkaniny o większej gramaturze charakteryzowały się mniejszą wartością ubytku masowego próbek, a także mniejszą głębokością zarysowań. Analiza profilu powierzchni badanych kompozytów, po poddaniu ich działaniu luźnego ścierniwa mineralnego, pozwoliła zaobserwować powstałe zniszczenia, występowanie wykruszeń na powierzchni laminatów oraz lepsze parametry profilu w przypadku laminatów o osnowie epoksydowej.

W pierwszej fazie pomiaru, kiedy materiał jest gładki, na jego powierzchni powstają zarysowania, które w trakcie dalszego ścierania zwiększają swoją szerokość, ale w wyniku skrawania warstwy wierzchniej zmniejsza się ich głębokość.

Poddanie badaniom próbki stalowej pozwoliło określić jak intensywnie ścierana jest powierzchnia laminatów. Okazało się, że materiały te cechują się dosyć dużą odpornością i są w większym stopniu trwałe przy oddziaływaniu na nie materiałem ścierającym. Próbka

stalowa szybciej ulegała niszczeniu, co odzwierciedlał ubytek masowy, a na jej powierzchni pojawiały się dużo głębsze zarysowania [1].

Analizując uzyskane wyniki pomiarów można stwierdzić, że biorąc pod uwagę parametr odporności na zużycie ściernie (ubytek masowy), rozpatrywane laminaty nadają się do wykorzystania ich w konstrukcji pudła wagonu towarowego. Przy doborze komponentów, z których wytworzony będzie laminat, należy mieć na uwadze fakt, że najbardziej do tego celu nadają się tkaniny o wysokiej gramaturze, a także lepiej sprawdza się żywica epoksydowa niż poliestrowa. Odpowiedni dobór tych elementów pozwoli uzyskać laminat, który będzie cechował się odpornością na zużycie ściernie, umożliwiającą budowę trwałej konstrukcji wagonu towarowego. Istotną sprawą była również technologia wytworzenia badanych kompozytów, którą dobrano ze względu na ogólną dostępność oraz ekonomiczność. Zastosowanie metody kontaktowej było powodem niejednorodności struktury i występowaniem porowatości. Wykorzystana metoda badawcza ma jedynie charakter orientacyjny i porównawczy w dziedzinie przetestowanych próbek, co jednak jest wystarczające na wstępnym etapie badań, w rozważanej potencjalnej aplikacji. Osobnym zagadnieniem pozostaje udarowe działanie ścierniwa mogące powodować wykruszanie się materiału w miejscach gdzie występują pęcherzyki. Dodatkowo należałoby uwzględnić przy tym właściwą skalę i energię uderzenia. W celu określenia możliwości zastosowania badanych kompozytów do budowy poszycia węglarki, należy oczywiście dodatkowo przeprowadzić szereg kompleksowych badań wytrzymałościowych.

## Literatura

1. Baier A., Zolkiewski S. Badanie zużycia ściernego materiałów kompozytowych. Wrocław: ZN Wyższej Szkoły Oficerskiej Wojsk Lądowych im. gen. T. Kościuszki, Rocznik XLIII, Styczeń – Marzec 2011, 1 (159): 21-36.
2. Bijwe J., Rekha Rattan, Fahim M. Abrasive wear performance of carbon fabric reinforced polyetherimide composites: Influence of content and orientation of fabric. Tribol. Int. 2007, 40: 844-854.
3. Capanidis D. Selected aspects of the methodology of tribological investigations of polymer materials. Archives of Civil and Mechanical Engineering 2007, VII, 4: 39-55.
4. El-Tayeb N. S. M., Yousif B. F. Evaluation of glass fiber reinforced polyester composite for multi-pass abrasive wear applications. Wear 2007, 262: 1140-1151.
5. Friedrich K. Friction and wear of polymer composites. Composite materials series 1. Amsterdam: Elsevier, 1986.
6. Gahr K. H. Z. Microstructure and wear of materials. Tribology series 10. Amsterdam: Elsevier, 1987.
7. Gierek A. Zużycie tribologiczne. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2005.
8. Hebda M., Wachal A. Trybologia. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1980.
9. Koziol S., Rusinski E., Jamroziak K. Critical to Quality Factors of Engineering Design Process of Armoured Vehicles. Solid State Phenomena 2010, 165: 280-284.

10. Mahapatra S. S., Patnaik A., Satapathy A. Taguchi method applied to parametric appraisal of erosion behavior of GF-reinforced polyester composites. *Wear* 2008, 265: 214-222.
11. Nawrocki J., Ryncarz A., Węglarczyk J. *Teoria i praktyka rozdrabniania*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 1989.
12. Patnaik A., Satapathy A., Mahapatra SS, Dash R. R. Erosive wear assessment of glass reinforced polyester–flyash composites using Taguchi method. *Int. Polym. Process* 2008, 23 (2): 1-8.
13. Pihtili H. An experimental investigation of wear of glass fibre–epoxy resin and glass fibre–polyester resin composite materials. *European Polymer Journal* 2009, 45: 149-154.
14. Pihtili H., Tosun N. Effect of load and speed on the wear behaviour of woven glass fabrics and aramid fibre-reinforced composites. *Wear* 2002, 252: 979-984.
15. Pihtili H., Tosun N. Investigation of the wear behaviour of a glassfibre-reinforced composite and polyester resin. *Composites Science and Technology* 2002, 62: 367-370.
16. Reis P. N. B., Ferreira J. A. M., Antunes F. V. Effect of Interlayer Delamination on Mechanical Behavior of Carbon/Epoxy Laminates. *Journal of Composite Materials* 2009, 43, 22: 2609-2621.
17. Reis P. N. B., Ferreira J. A. M., Antunes F. Effect of adherend's rigidity on the shear strength of single lap adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 2011, 31, 4: 193-201.
18. Rusinski E., Koziol S., Jamroziak K. Quality Assurance Method for the Design and Manufacturing Process of Armoured Vehicles. *Eksplatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2009, 3: 70-77.
19. Sahin Y., Ozdin, K. A model for the abrasive wear behaviour of aluminium based composites. *Materials and Design* 2008, 29: 728-733.
20. Sandhyarani B., Satapathy A. Tribo-performance analysis of red mud filled glass-epoxy composites using Taguchi experimental design. *Materials and Design* 2009, 30: 2841-2853.
21. Stachowiak G. W, Batchelor A. W. *Engineering tribology*. Amsterdam: Elsevier, 1993.
22. Thorp J. M. Abrasive wear of some commercial polymers. *Tribol. Int.* 1982; 15: 89-135.
23. Wieleba W. The Mechanism of Tribological Wear of Thermoplastic Materials. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2007, VII, 4: 185-199.

24. You-Bai X. On the tribology design. Tribol. Int. 1999, 32: 351-358.
25. Zolkiewski S. Selection and impact of parameters in designing of composite materials. 13th World Congress in Mechanism and Machine Science, Guanajuato, México, 19-25 June, 2011, A23\_555: 1-10.
26. Zolkiewski S. Testing composite materials connected in bolt joints. Journal of Vibroengineering 2011, 13, 4: 817-822.
27. Zolkiewski S. Experimental and numerical testing of the epoxide resin based composite sandwich panel made from the woven glass roving laminate and the steel plate. XVIII международную научно - техническую конференцию “Машиностроение и техносфера XXI века”. XVIII International Conference of Machine-Building and Technosphere of the XXI Century. Doneck 2011, 4: 245-248.