

PRZYBYŁEK Paweł¹
KUCHARCZYK Wojciech²

WŁAŚCIWOŚCI WYTRZYMAŁOŚCIOWE POLIMEROWYCH KOMPOZYTÓW ABLACYJNYCH STOSOWANYCH NA OSŁONY REJESTRATORÓW LOTNICZYCH

W pracy przedstawiono program badań doświadczalnych wybranych właściwości wytrzymałościowych materiałów kompozytowych, opracowany zgodnie z procedurami określonymi dla elementów konstrukcji lotniczych. Zaprezentowano koncepcję wykorzystania polimerowych kompozytów ablacyjnych na osłony rejestratorów lotniczych. Wykonano próbki kompozytowe z osnową na bazie żywicy epoksydowej Epidian 52 sieciowanej w temperaturze pokojowej utwardzaczami: poliaminoamidowym (PAC) lub trójetylenoczteroaminą (Z-1). Właściwości ablacyjne żywicy modyfikowano glinokrzemianem warstwowym, Bentonitem Specjal Extra z 75% zawartością montmorylonitu wapniowego (MMT). Wzmocnienie hybrydowe kompozytów stanowiły tkaniny: aramidowa o gramaturze 470 g/m² oraz szklana o gramaturze 300 g/m². Składy fazowe próbek oraz liczba wykonywanych doświadczeń zostały ustalone na podstawie przyjętego planu badań doświadczalnych, tj.: ortogonalnej macierzy pełnoczynnikowej I rzędu typu 2³ z powtórzeniami. Składowymi funkcji odpowiedzi były cechy mechaniczne kompozytów: wytrzymałość na rozciąganie, wytrzymałość na zginanie.

THE STRENGTH PROPERTIES OF THE FDR'S WITH THE ABLATIVE POLYMER COMPOSITE'S LAYER

This chapter provides guidelines for the experimental characterization according to the aviation requirements. Ablative composite materials have been employed. Material specimens have been prepared. Hardeners: PAC and Z-1 have cured the epoxy resin Epidian 52. Properties of composite shave been modified by layered silicates filler – Bentonit Specjal Ekstra with 75% content of calcium montmoryllonite (MMT). Hybrid reinforcement: aramid fabric (470 g/m²) – glass fabric (300 g/m²) has been used. Researches have been realized with the use of static methods of experimental design. Experimental plan of 1st category of type 2³. Research has been done, quantitative and qualitative influence of phase type-matter on. The properties were characterized by the static tensile test: tensile strength and flexural strength.

¹Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych, Katedra Płatowca i Silnika, Dęblin, e-mail: sqcdr@wp.pl

² Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny, Instytut Budowy Maszyn, 26-600 Radom; ul. Malczewskiego 29.
tel: + 48 48 361-76-80, Fax: + 48 48 361-76-75, e-mail: wojciech.kucharczyk@pr.radom.pl

1. WSTĘP

Przepisy dotyczące standardów zabezpieczenia rejestratorów lotniczych ustanowione zostały po serii katastrof lotniczych w latach pięćdziesiątych XX wieku. Najpierw wprowadzono je w lotnictwie wojskowym, a następnie (01.08.1958) zostały przyjęte przez CAA (Civil Aviation Authority), przekształconym później w FAA (Federal Aviation Administration). Odwoływały się one do dokumentu pod nazwą Technical Standards Order (TSO C 51), który określał dokładność zapisu danych, czas próbkowania i rodzaj zapisywanych parametrów (pułap, prędkość lotu, kurs, itp.), wymagania dotyczące zdolności rejestratora do przetrwania, w przypadku kolizji z przyspieszeniem 100 jednostek przeciążenia oraz oddziaływania płomienia o temperaturze 1100 °C przez 30 minut. W początku lat sześćdziesiątych, CAB (Civil Aeronautics Board) zmodyfikował kryteria dotyczące opracowania dodatkowej ochrony rejestratorów przed skutkami uderzenia i zniszczeniem w wyniku oddziaływania intensywnego strumienia ciepłego, powstającego podczas pożaru [1]. Wymagania dotyczące jakości zabezpieczenia zapisanych danych ustanowione przez FAA, obowiązujące obecnie zostały przedstawione w tabeli 1. Normy wojskowe MIL-STD-2124A w tym zakresie pokrywają się z cywilnymi.

Tab. 1. Wymagania jakości zabezpieczenia zapisanych informacji zgodnie z D55 [2]

Wymagania zgodnie z TSO C123a (CVR), C124a (DFDR)	
Obciążenie udarowe	3 400 jednostek przeciążenia działającego przez 6,5 ms
Obciążenie statyczne	2 265 kg przez 5 minut wzdłuż każdej osi
Wpływ cieczy agresywnych	Odporność na oddziaływanie cieczy roboczych z różnych instalacji SP (paliwo, oleje itp.) przez 24 godziny
Wpływ wody	Oddziaływanie wody morskiej przez 30 dni
Odporność na przebicie	Masa 226,5 kg zrzucona z wysokości 3,048 m, penetrująca obudowę stalowym ostrzem o średnicy 6,35 mm
Ciśnienie hydrostatyczne	Ciśnienie równoważne ciśnieniu wody na głębokości około 6 000 m
Ogień wysokiej intensywności	Temperatura 1100 °C, ogień pokrywający 100% obudowy przez 30 min (60 minut z wykorzystaniem testu EUROCAE ED55)
Ogień niskiej intensywności	Temperatura 260 °C, 10 godzin (test piekarnika)

W żadnym z dokumentów TSO nie określono jednak w sposób szczegółowy procedury zapewniania powtarzalności pomiaru powyższych parametrów.

2. METODYKA BADAŃ [3]

Obudowy ochronne rejestratorów lotniczych muszą zabezpieczać moduły archiwizujące różnorodne informacje rejestrowane podczas lotu statku powietrznego oraz parametry pracy poszczególnych urządzeń. Aby ocenić ich możliwości ochrony danych w momencie

zdarzenia lotniczego, szczególnie wypadku lub katastrofy, konieczne jest przeprowadzenie szeregu sprawdzeń, badań i testów:

- dopuszczalne bezpieczne obciążenie uderowe podczas katastrofy;
- wytrzymałość na obciążenie statyczne;
- odporność na oddziaływanie cieczy agresywnych;
- odporność na przebicie;
- odporność na ciśnienie hydrostatyczne;
- oddziaływanie wysokotemperaturowego strumienia ciepłego;
- długotrwałe oddziaływanie ognia o niskiej intensywności.

Oprócz metodyki realizacji ważna jest również kolejność przeprowadzania testów. Zgodnie z dokumentami normatywnymi [4] stosowane są trzy rodzaje sekwencji poszczególnych badań stanowiące odrębne procedury. Każda zawiera wszystkie powyższe testy ułożone według określonej kolejności:

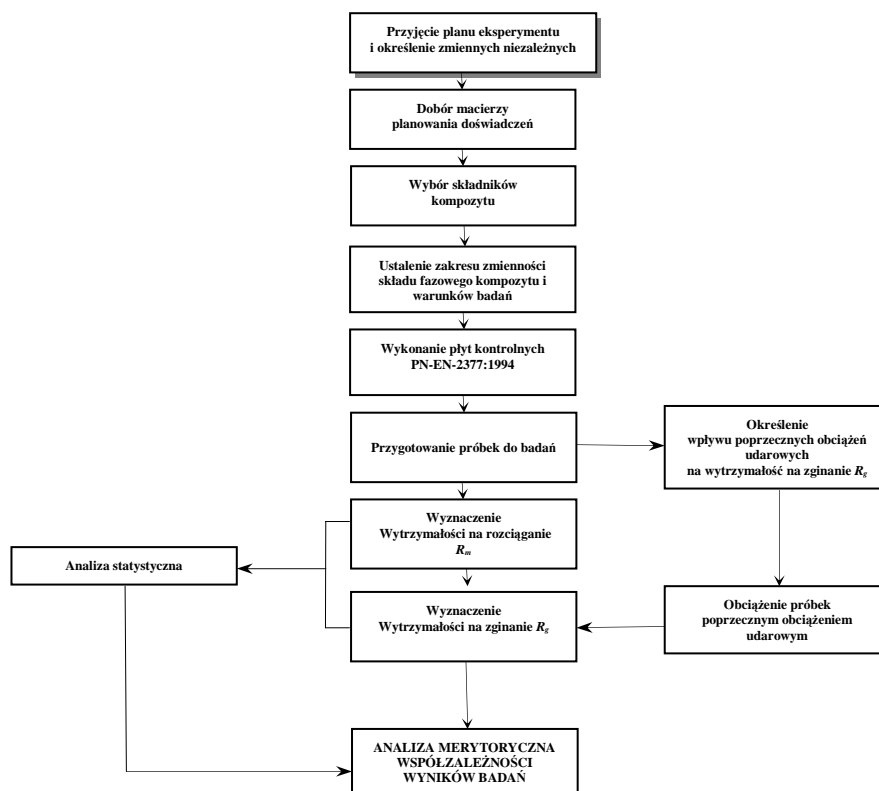
- dopuszczalne bezpieczne obciążenie uderowe, obciążenie punktowe, wytrzymałość na obciążenie statyczne, oddziaływanie wysokotemperaturowego strumienia ciepła, zanurzenie w płynach eksploatacyjnych;
- dopuszczalne bezpieczne obciążenie uderowe, obciążenie punktowe, wytrzymałość na obciążenie statyczne, oddziaływanie wysokotemperaturowego strumienia ciepłego, zanurzenie w płynach eksploatacyjnych;
- dopuszczalne bezpieczne obciążenie uderowe, obciążenie punktowe, wytrzymałość na obciążenie statyczne, zatopienie na dużej głębokości, zatopienie w słonej wodzie;
- kryterium oceny jest możliwość odzyskania informacji zgromadzonych na nośniku danych po przeprowadzeniu wszystkich testów z jednej z powyższych procedur.

Rejestratory lotnicze, które spełniały normy TSO obowiązujące w czasie ich montażu na statkach powietrznych, zwykle nie spełniają już wymogów współczesnych. Wymiana rejestratora parametrów lotu na układ wyższej generacji jest kosztowna i wymaga znacznego nakładu pracy, związanego z badaniami kwalifikacyjnymi, zmianą procedur deszyfracji i analizy danych, przeszkoleniem personelu, itd. W przypadku niektórych starszych SP, których produkcja została już wstrzymana, opłacalność ekonomiczna modyfikacji systemu kontroli parametrów lotu może okazać się wątpliwa. Alternatywnym rozwiązaniem jest modyfikacja obudowy dotychczas eksploatowanych rejestratorów, poprzez wprowadzenie dodatkowej warstwy ochronnej z materiałów ablacyjnych. Inną możliwością jest opracowanie kilku standardowych osłon ochronnych, do których będą montowane dotychczas eksploatowane urządzenia rejestrujące. Do wytworzenia warstwy ochronnej postanowiono wykorzystać kompozyty o właściwościach ablacyjnych.

2.1. Badania materiałów kompozytowych

Struktura badań eksperymentalnych wymuszona jest wysokimi wymaganiami, jakie należy spełnić, aby wdrożyć opracowany: komponent, detal, element do praktycznego zastosowania w sprzęcie lotniczym nie wpływając na obniżenie bezpieczeństwa lotów. Jednakże najbardziej skomplikowany, pracochłonny i obejmujący najwięcej badań testowych jest pierwszy etap doboru składników i określenie ich wpływu na właściwości materiału kompozytowego[3]. Zgodnie z przedstawionymi wymogami kompozyty stosowane na obudowy rejestratorów lotniczych powinny oprócz właściwości ablacyjnych spełniać wysokie kryteria wytrzymałościowe.

Opracowany został program doświadczalnych badań kompozytów polimerowych (rys. 1) w celu określenia wpływu wzmocnienia hybrydowego z tkanin aramidowych w osnowie epoksydowej modyfikowanej nanonapełniaczem warstwowym na wybrane cechy wytrzymałościowe polimerowego kompozytu ablacyjnego.



Rys. 1. Program badań

Skład fazowy próbek oraz liczba wykonywanych doświadczeń ($N = 8$) zostały ustalone na podstawie przyjętego planu badań doświadczalnych, tj.: ortogonalnej macierzy pełnoczynnikowej I rzędu typu 2^3 z powtórzeniami (tab. 2) [6].

Na osnowę kompozytów wybrano żywicę epoksydową *Epidian 52*, sieciowaną w temperaturze pokojowej utwardzaczami *PAC* lub *Z-1* produkcji Z.Ch. Organika-Sarzyna S.A. w Nowej Sarzynie. Właściwości ablacyjne kompozycji żywicy modyfikowano dodając glinokrzemian warstwowy, *Bentonit Specjal Extra* z 75% zawartością montmorylonitu wapniowego MMT (Zakłady Górniczo-Metalowe *Zębiec* w Zębcu). Rozróżnienia składów fazowych poszczególnych materiałów dokonano poprzez zróżnicowanie materiału zastosowanego na wzmocnienie. Wzmocnienie hybrydowe kompozytu stanowiły tkaniny: aramidowa (kevlarowa) o gramaturze 470 g/m^2 i szklana o gramaturze 300 g/m^2 ułożone naprzemiennie i rozłożone równomiernie w kompozycje [5].

Tab. 2. Pełnoczynnikowa macierz planowania I rzędu typu 2 z powtórzeniami [6]

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 i jednocześnie numer kompozytu, którego skład fazowy określony jest układem zmiennych x_i

Trzema zmiennymi niezależnymi x_i (parametrami wejściowymi), o wartościach dwu poziomów kodowych ± 1 (poziom górny „+” oraz poziom dolny „-”, (tab. 2) określonych według zależności (1) [8]:

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

były składniki kompozytów:

x_1 - udział masowy wzmocnienia aramidowego do sumy mas obu wzmocnień włóknistych

(tkaniny: kevlarowa + szklana) [%], 79% (+) i 38% (-); $\Delta x_1 = 20,5\%$; $x_{1(sr)} = 58,5\%$;

x_2 - udział masowy nanonapełniacza glinokrzemianowego (MMT) w kompozycie [%],

15% (+) i 3% (-); $\Delta x_2 = 6\%$; $x_{2(sr)} = 9\%$;

x_3 - rodzaj utwardzacza żywicy - utwardzacz PAC lub utwardzacz Z-I,

80 ns PAC (+) i 12 ns Z-I (-); Δx_3 i $x_{3(sr)}$ są wartościami czysto teoretycznymi.

Składowymi funkcji odpowiedzi y (parametrami wyjściowymi) były cechy mechaniczne: wytrzymałość na rozciąganie R_m [MPa], wytrzymałość na zginanie R_g [MPa]. Ponadto określono wpływ poprzecznych obciążeń udarowych na wytrzymałość na zginanie R_g [MPa]. Zgodnie z planem badań wykonano laminaty o wymiarach (350 x 250 x 10) mm, z których wycięto próbki mające posłużyć w dalszych pracach doświadczalnych do przeprowadzenia badań wytrzymałościowych.

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) na wartość wyjściową funkcji obiektu badań według równania funkcji obiektu badań:

$$\bar{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (2)$$

Wartości współczynników regresji oblicza się z relacji (3):

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

Analiza statystyczna otrzymanych wyników prowadzona jest w celu określenia progu istotności współczynników regresji b_i i oceny ich wpływu na wartość parametru wyjściowego \bar{y} według poniższych zależności. Wariancja (4) oraz błąd wyznaczenia współczynników regresji (5):

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

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

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).

Sprawdza się warunek (6), skąd po przekształceniach otrzymuje się (7) i (8):

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

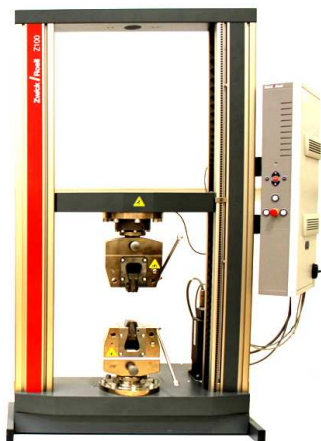
$$b_{istot} \geq b_i = \frac{2,306}{\sqrt{8}} \cdot s(\bar{y}) = 0,8153 \cdot s(\bar{y}) \quad (8)$$

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

3. BADANIA WŁAŚCIWOŚCI WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH

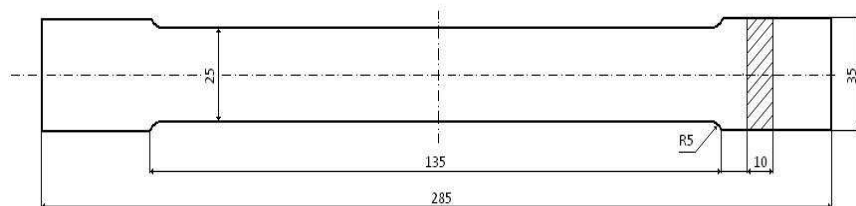
3.1. Wytrzymałość na rozciąganie

Statyczną próbę rozciągania wykonano za pomocą uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej typu *Zwick/Roell Z100* (rys. 2).



Rys. 2. Uniwersalna maszyna wytrzymałościowa Zwick/Roell Z100

W celu przeprowadzenia badań przygotowano próbki o przedstawionym wcześniej składzie fazowym. Kształt oraz pozostałe wymiary próbek zostały dobrane według zaleceń norm *PN-EN ISO 178* oraz *PNE-EN ISO 527* (rys. 3).



Rys. 3. Kształt i wymiary próbek do statycznej próby rozciągania

Tab. 3. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie R_m

Lp.	Skład fazowy				Wytrzymałość R_m [MPa]
	Liczba warstw tkaniny kevlarowej [szt.]	Liczba warstw tkaniny szklanej [szt.]	Masowa zawartość MMT [%]	Rodzaj utwardzacza	
1.	10	4	15	PAC	180,5
2.			3	Z-1	240
3.			15	Z-1	241
4.			3	PAC	213,5
5.	4	10	15	PAC	154,5
6.			3	Z-1	339
7.			15	Z-1	282
8.			3	PAC	195

Tab. 4. Wytrzymałość R_m - współczynniki regresji: b_1, b_2, b_3 oraz interakcji: $b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$

Lp.	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$
1.	180,5	180,5	180,5	180,5	180,5	180,5	180,5	180,5
2.	240	240	-240	-240	-240	-240	240	240
3.	241	241	241	-241	241	-241	-241	-241
4.	213,5	213,5	-213,5	213,5	-213,5	213,5	-213,5	-213,5
5.	154,5	-154,5	154,5	154,5	-154,5	-154,5	154,5	-154,5
6.	339	-339	-339	-339	339	339	339	-339
7.	282,5	-282,5	282,5	-282,5	-282,5	282,5	-282,5	282,5
8.	195	-195	-195	195	195	-195	-195	195
Wspł. b_i	230,75	-12,00	-16,13	-44,88	8,13	23,13	-2,25	-6,25

Funkcja obiektu badań zapisana została wyrażeniem:

$$\bar{y} = 230,75 - 12x_1 - 16,13x_2 - 44,88x_3 + 8,13x_1x_2 + 23,13x_1x_3 - 2,25x_2x_3 - 6,25x_1x_2x_3 \quad (9)$$

Wariancja oraz błąd wyznaczania współczynników regresji wyniosły:

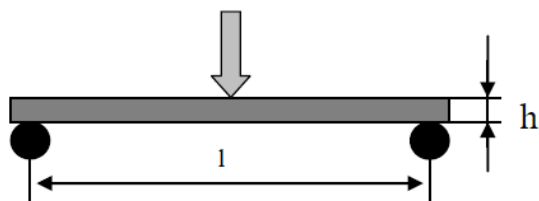
$$s(\bar{y}) = 17,32 \quad \text{oraz} \quad s(b_i) = 6,13$$

Próg istotności współczynników regresji i oceny ich wpływu na wartość parametru wyjściowego \bar{y} :

$$b_{istot} \geq b_i = 14,12$$

3.2. Wytrzymałość na zginanie

Badanie na ścinanie międzywarstwowe zrealizowano metodą trójpunktowego zginania krótkich belek (rys. 4) zgodnie z ASTM D2344-89 oraz ISO 1413(97). Badanie przeprowadzono z wykorzystaniem uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej ZWICK/ROELL Z100 (rys. 2). Długość próbki wynosi $l = 4h + 16$ mm. Próba ta jest prosta i nie wymaga złożonych urządzeń, więc często jest stosowana do szybkiej jakościowej oceny odporności kompozytów na ścinanie międzywarstwowe [7].



Rys. 4. Schemat badania wytrzymałości na zginanie

Tab. 5. Średnia wartość wytrzymałości na zginanie w zależności od składu fazowego

Lp.	Skład fazowy				Wytrzymałość R_g [MPa]
	Liczba warstw tkaniny kevlarowej [szt.]	Liczba warstw tkaniny szklanej [szt.]	Masowa zawartość MMT [%]	Rodzaj utwardzacza	
9.	10	4	15	PAC	203
10.			3	Z-1	184
11.			15	Z-1	160
12.			3	PAC	194
13.	4	10	15	PAC	246
14.			3	Z-1	323,5
15.			15	Z-1	304,5
16.			3	PAC	321

Tab. 6. Wytrzymałość R_g – współczynniki regresji: b_1, b_2, b_3 oraz interakcji: $b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$

Lp.	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$
1.	203	203	203	203	203	203	203	203
2.	184	184	-184	-184	-184	-184	184	184
3.	160	160	160	-160	160	-160	-160	-160
4.	194	194	-194	194	-194	194	-194	-194
5.	246	-246	246	246	-246	-246	246	-246
6.	323,5	-323,5	-323,5	-323,5	323,5	323,5	323,5	-323,5
7.	304,5	-304,5	304,5	-304,5	-304,5	304,5	-304,5	304,5
8.	321	-321	-321	321	321	-321	-321	321
Wspł. b_i	242,00	-56,75	-13,63	-1,00	9,88	14,25	-2,88	11,13

Funkcja obiektu badań zapisana została wyrażeniem:

$$\bar{y} = 242 - 56,75x_1 - 13,63x_2 - x_3 + 9,88x_1x_2 + 14,25x_1x_3 - 2,88x_2x_3 + 11,13x_1x_2x_3 \quad (10)$$

Wariancja oraz błąd wyznaczania współczynników regresji wyniosły:

$$s(\bar{y}) = 4,79 \quad \text{oraz} \quad s(b_i) = 1,69$$

Próg istotności współczynników regresji i oceny ich wpływu na wartość parametru wyjściowego \bar{y} :

$$b_{istot} \geq b_i = 3,90$$

W przypadku analizy statystycznej wyników badań dodatni znak przy wartości udziału współczynnika regresji b_i informuje o wzroście wartości funkcji odpowiedzi wraz ze wzrostem wartości zmiennej niezależnej x_i i jednoczesnym zachowaniu pozostałych dwu zmiennych x_j na poziomie dolnym ($x_j = -1$). Znak ujemny oznacza spadek wartości funkcji odpowiedzi wraz ze wzrostem wartości zmiennej x_i .

4. WNIOSKI

1. Kompozyt o składzie: 4 warstwy tkaniny aramidowej, 10 warstw tkaniny szklanej, 3% montmorylonitu, w osnowie z żywicy epoksydowej *Epidian 52* usieciowanej trójetylenoczteroaminą *Z-1*, posiada najwyższą wytrzymałość na rozciąganie $R_m = 390$ MPa oraz najwyższą wytrzymałość na zginanie $R_g = 323,5$ MPa.
2. Najniższą wytrzymałość na rozciąganie $R_m = 154,5$ MPa posiada kompozyt o składzie: 4 warstwy tkaniny aramidowej, 10 warstw tkaniny szklanej, 5% montmorylonitu MMT, w osnowie z żywicy epoksydowej *Epidian 52* usieciowanej utwardzaczem poliaminoamidowym *PAC*.
3. Najniższą wytrzymałość na zginanie, $R_g = 160$ MPa, posiada kompozyt o składzie: 10 warstw tkaniny aramidowej, 4 warstwy tkaniny szklanej, 15% montmorylonitu MMT, w osnowie żywicy epoksydowej *Epidian 52* usieciowanej trójetylenoczteroaminą *Z-1*.
4. Utwardzacz poliaminoamidowy *PAC* znacząco obniża wytrzymałość na rozciąganie ($b_3 = -44,88$ dla progu istotności $b_{istot} = 14,12$), natomiast w połączeniu z włóknem aramidowym wpływa na zwiększenie wytrzymałości ($b_{13} = 23,13$). Zawartość montmorylonitu MMT powoduje spadek wytrzymałości na rozciąganie ($b_2 = -16,13$).
5. Zwiększenie udziału włókien aramidowych bardzo znacznie obniża wytrzymałości na zginanie ($b_1 = -56,75$). Można efekt ten ograniczyć używając utwardzacza poliaminoamidowego *PAC*, który w interakcji z włóknem aramidowym podwyższa wytrzymałość na zginanie. Duża zawartość montmorylonitu MMT zmniejsza wytrzymałość R_g , ale w interakcji z utwardzaczem *PAC* powoduje zwiększenie tego parametru wytrzymałościowego.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Przybyłek P., Opara T.A.: *Obudowy ochronne rejestratorów parametrów lotu*. Journal of Aeronautics Integra, 1/2010(7).
- [2] Polak Z., Rypulak A.: *Awionika przyrządy i systemy pokładowe*. WSOSP, Dęblin 2002.

-
- [3] *MIL-HDBK-17-1F*, Fort Washington, Materials Sciences Corporation, 2002.
 - [4] *Minimum operational performance specification for crash protected airborne recorder systems*. ED 112, EUROCAE 2003.
 - [5] Przybyłek P., Kucharczyk W.: *Możliwości zastosowania kompozytów ablacyjnych na osłony rejestratorów lotniczych*. Logistyka 6/2010.
 - [6] Polański Z.: *Planowanie doświadczeń w technice*. Warszawa, PWN 1984.
 - [7] Ochelski S.: *Metody doświadczalne mechaniki kompozytów konstrukcyjnych*. Warszawa 2004, WNT.