

Rafał CHATYS\*, Krzysztof PIERNIK

Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn

\* e-mail: chatys@tu.kielce.pl

## Modelowanie właściwości mechanicznych wyrobów lotniczych wytworzonych z kompozytów wzmocnionych włóknami

***Streszczenie.** W pracy omówiono i podjęto próbę szacowania właściwości mechanicznych próbek wyciętych z włóknistego materiału kompozytowego o osnowie poliestrowej (Firestop 8175-w-1). W modelu założono, że kompozyt składa się z komponentów, mających indywidualne fizykomechaniczne właściwości. Weryfikację poprawnego doboru kształtu próbki przeprowadzono metodą analizy elementów skończonych ABAQUS, wprowadzając do programu średnie wartości z próbek ciętych pod różnymi kątami względem wzmocnienia (mato tkanina szklana typu E).*

MODELING THE MECHANICAL PROPERTIES OF AIR PRODUCTS MANUFACTURED FROM FIBER-REINFORCED COMPOSITES

***Summary.** At the work they discussed and an attempt was made to estimate the mechanical properties of samples cut from a fibrous composite material with a polyester matrix (Firestop 8175-w-1). The model assumes that the composite comprises component having individual physico-mechanical properties. Verifications proper selection of the shape of the sample was performed by ABAQUS finite element analysis, a program that introduces the mean values of the samples cut at different angles to gain (the mato glass fabric of type E).*

### 1. WPROWADZENIE

Intensywny rozwój formowania włóknistych materiałów kompozytowych (WMK) stanowiący podstawę projektowania złożonych elementów konstrukcyjnych, wpływa na ich specyficzne właściwości poprzez rodzaj zastosowanych komponentów (osnowy, matrycy [1]), a także poprzez odpowiedni dobór metod, procesów i parametrów technologicznych [2]. Przy formowaniu czy wytwarzaniu nowych wieloskładnikowych materiałów [3] o strukturze warstwowej, ważna jest ich funkcjonalność i alternatywa dla tradycyjnych rozwiązań. Wyroby z WMK wytworzone tradycyjnymi metodami (jak laminowanie ręczne lub natrysk żywicy z włóknem ciętym, czy długim) posiadają defekty i wady struktury (w postaci pęcherzy powietrza, pustek wewnętrznych materiału między warstwami kompozytu). Najczęściej występują one na krawędziach gotowych ele-

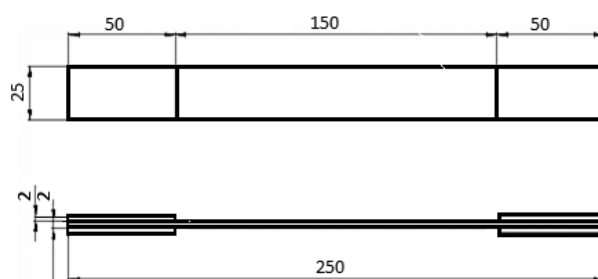
mentów w wyniku nie dotrzymania czasów utwardzania, zbyt szybkiego wylaminowania i zbyt małej porcji żywicy przewidzianej pomiędzy kolejne warstwy wzmocnień (czy rodzaj obróbek cięcia [2]). Wszystkie wady i zjawiska (powstałe w procesie technologicznym) pogarszają właściwości mechaniczne materiału, a także walory estetyczne wyrobu. Jakość jest czuła na te zjawiska i niedoskonałości struktury WMK wytworzonego w procesie formowania materiału [4]. Rozwarstwienia na brzegach próbek [5], czy efekt skali [6] są bardziej widoczne przy zniszczeniu WMK w badaniach dynamicznych. Zrozumienie tego zjawiska w materiałach warstwowych prowadzi do analizowania rozkładów naprężeń, przy uwzględnieniu roli struktury (dla dowolnego ułożenia warstw w WMK [7]). Jednym z czynników niwelowania tych defektów i zjawisk odbywa się poprzez zastępowanie tradycyjnych metod wytwarzania WMK metodami

„wytwarzania infuzyjnego pod próżnią” [8] (metodami: infuzji [9, 10], RTM [11]), czy worka próżniowego), który polega na wtlaczaniu żywicy pod ciśnieniem do wnętrza formy.

Celem pracy będzie przeprowadzenie weryfikacji przyjętego kształtu próbki w szacowaniu wytrzymałości WMK formowanego metodą worka próżniowego za pomocą analizy elementów skończonych ABAQUS.

## 2. MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

W celu realizacji pracy obiektem badań był WMK formowany metodą wtlaczania żywicy (poprzez wessanie) do wnętrza formy (tj. worka próżniowego: Vacuum bagging). W skład



Rys. 1. Geometryczne wymiary eksperymentalnych próbek

– ‘P(1, 2, 3) – xx’: gdzie, ‘P’ oznacza kompozyt poliestrowy o ułożeniu  $[0/90]_S$  z bazą pomiarową  $L_{BP} = 150$  mm cięty pod kątami: 1 –  $0^\circ$ ; 2 –  $45^\circ$ ; 3 –  $90^\circ$  względem wzmocnienia z numerem próbki ‘xx’).

Tabela 1. Parametry laminatu formowanego metodą wtlaczania żywicy do wnętrza formy

Technologia	Utwardzacz, %	Czas odformowania, h	Czas żelowania, h	Dodatkowe wygrzewanie, h
Kompozyt $[0/90]_S$	Butanox M50, 4 + inicjator NCL-10, 2	24	1 (przy $T = 22-23^\circ\text{C}$ )	16 (przy $T = 30^\circ\text{C}$ )

kompozytu wchodziło wzmocnienie w postaci tkaniny szklanej o gramaturze  $600 \text{ g/m}^2$  z osnową poliestrową (Firestop@ 8170-W1). Parametry technologiczne formowanego w Zakładzie Kompozytów firmy BELLA laminatu przedstawiono w tabeli 1.

### 2.1. Przygotowanie próbek

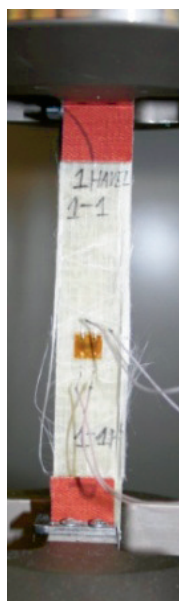
Pomiary geometrii i masy wyciętych próbek zostały wykonane na maszynie ze wspomaganie numerycznym CNC zgodnie z normą PN-EN ISO 527-5:1997. Aby w mocowaniu maszyny zniwelować wpływ koncentracji naprężeń (Rys.1) na właściwości mechaniczne kompozytu poliestrowego uchronić przed powierzchniowym zniszczeniem, na próbki naklejono nakładki (zwiększając tym samym powierzchnię równomiernego rozkładu koncentracji naprężeń w badanej próbce).

Zastosowano następujące oznaczenia próbek poddanych statycznej próbie rozciągania:

### 2.2. Metodyka. Badania statyczne

Statyczną próbę rozciągania próbek kompozytów przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej INSTRON 8501 w Katedrze Wytrzymałości Centrum Laserowych Technologii Metali PŚk w Kielcach wyposażonej w aparat pomiarowy Flex Test SE i sterownik firmy MTS. Obciążenia były mierzone przy użyciu rozet HBM 1-XY91-6/350 (Rys.2) składających się z dwóch prostokątnych czujników tensometrycznych i pojedynczych mierników HBM 1-XY91-6/350 o jednakowych długościach pomiarowych 6 mm i nominalnym oporze elektrycznym  $350 \Omega$ .

Rozety i pojedyncze ekstensometry umieszczono po przeciwnych stronach próbki. Pomiar ekstensometru, obciążenie i przemieszczenie, rejestrowano z użyciem HBM Spider 8 ze sterownikiem „Catman”. Próby wykonano z prędkością przemieszczania głowicy  $2 \text{ mm/min}$ . Naprężenie osiowe określono jako



Rys. 2. Przygotowanie próbek kompozytowych do statycznej próby rozciągania

stosunek siły do zmierzonego, średniego pola przekroju poprzecznego próbek testowych.

### 2.3. Analiza i weryfikacja otrzymanych wyników WMK z uwzględnieniem przyjętej geometrii próbki

Wyniki badań otrzymane ze statycznej próby rozciągania WMK posiadają dość znaczny rozrzut właściwości mechanicznych. Ustalono rozrzuty (Tab. 2) i średnie wartości wytrzymałości otrzymane ze statycznej próby rozciągania z 5 próbek ciętych pod różnymi kątami (np. pod kątem 45°: Tab. 3). Defekty spowodowały lokalne koncentracje naprężeń i pękanie komponentów (pobliskich włókien), aż do zniszczenia laminatu. Najwyższą średnią wytrzyma-

łość stwierdzono na poziomie 174,6 MPa dla kompozytu ciętego pod kątem 90° względem wzmocnienia.

Tabela 3. Zestawienie danych próbek obciążonych pod kątem 45°

Obciążenia WMK ciętego pod kątem 45° względem wzmocnienia			
Oznaczenie próbki	$F_{max}$ , kN	$S_{max}$ , MPa	E, GPa
P2-21	4,25	67,41	8,73
P2-22	4,61	75,14	8,96
P2-23	4,23	76,36	9,65
P2-24	4,34	71,25	8,76
P2-25	4,35	78,17	10,21
<b>Średnia</b>	<b>4,35</b>	<b>73,67</b>	<b>9,26</b>

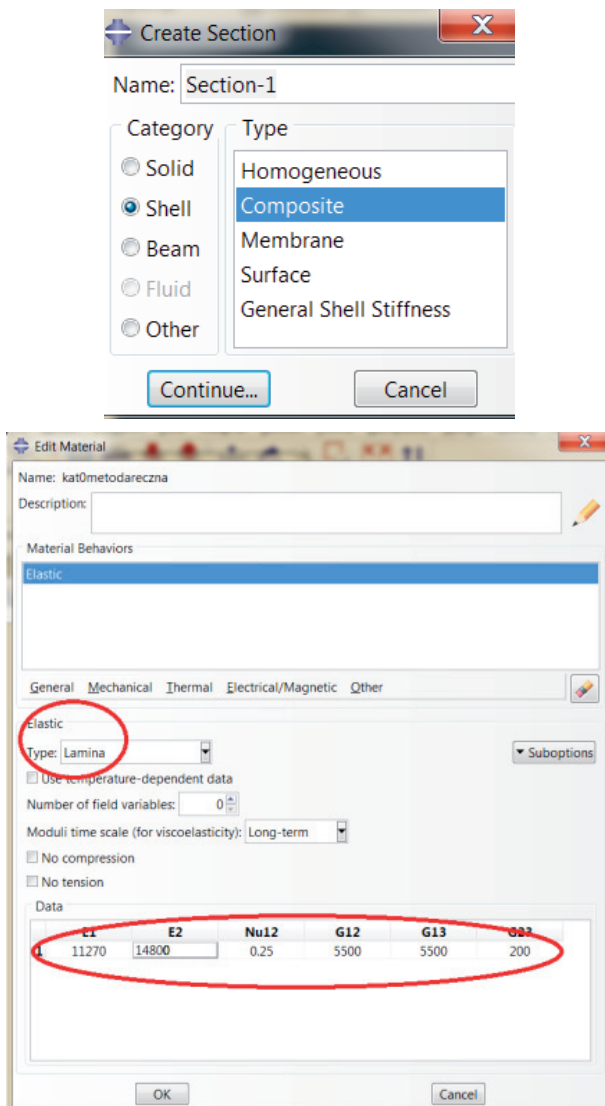
Naprężenia międzywarstwowe powstałe w WMK możemy wyznaczyć wykorzystując metodę elementów skończonych, którą można zweryfikować jedynie w przypadku porównania wartości teoretycznej z eksperymentalną. Na proces destrukcji największy wpływ mają normalne oraz styczne naprężenia ( $\tau$ ) międzywarstwowe (S), które wizualnie powodują „puchnięcie” swobodnego brzegu [12]. W ostatnich latach zrozumienie efektu brzegowego skupia się raczej na zobrazowaniu tego zjawiska niż na stworzeniu metod pozwalających uwzględnić jego wpływ na wytrzymałość złożonych materiałów, czy elementów konstrukcji.

Koncepcja MES-owska zakłada, że każda wielkość (np. przemieszczenie, naprężenie) opisana za pomocą funkcji ciągłej (pierwotnej) w danym obszarze (fragmencie ciągłym modelu fizycznego) aproksymuje się modelem

Tabela 2. Zestawienie danych próbek obciążonych pod różnymi kątami

Średnia wytrzymałość kompozytu szklanego o osnowie poliestrowej			
Rozrzut właściwości/kąt	0°	45°	90°
$S_{max}$ , MPa	117,90 – 156,40	67,41 – 78,17	160,00 – 196,70
E, GPa	10,13 – 12,23	8,73 – 10,21	12,96 – 15,81
Średnia $S_{max}$ , MPa	122,98 (131,35)*	73,67	174,60

\* średnia z 4 próbek



Rys. 3. Przykład modelowania włóknistych materiałów kompozytowych

dyskretnym. Model dyskretny złożony jest ze zbioru funkcji ciągłych określonych w skończonej liczbie podobszarów zwanych elementami skończonymi na jakie podzielono rozpatrywany obszar [13].

Pakiet ABAQUS (konkurencyjny do panietu LMS Santech) o budowie modułowej pozwala na dosyć swobodną konfigurację przy tworzeniu i analizowaniu modeli obliczeniowych dla elementów wykonanych z WMK (np. pakiet „CAE” definiuje geometrię, właściwości materiału – tworząc pliki wejściowe dla modułu obliczeniowego „Standard” lub „Explicit” –

w celu wizualizacji układu [14]). W pracy dzięki modułowi „Property” zostały wykonane wstępne modele próbek (Rys.1) oraz (w zakładce ABAQUSA „Edit Section”) określono liczbę warstw, grubość i kąt ułożenia (Rys.3).

W celu weryfikacji poprawnego doboru kształtu próbki przy oszacowaniu wytrzymałości WMK (poprzez analizę elementów skończonych ABAQUS), wprowadzono do programu średnie wartości z próbek ciętych pod różnymi kątami (0°, 90° i 45°). Naprężenie określono z pomocą najczęściej używanej hipotezy energetycznej von Misessa [15], która za miarę wyężenia przyjmuje energię właściwą odkształcenia postaciowego. Redukowane naprężenie (hipotezy von Misessa) dla płaskiego stanu naprężeń  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  jest (1):

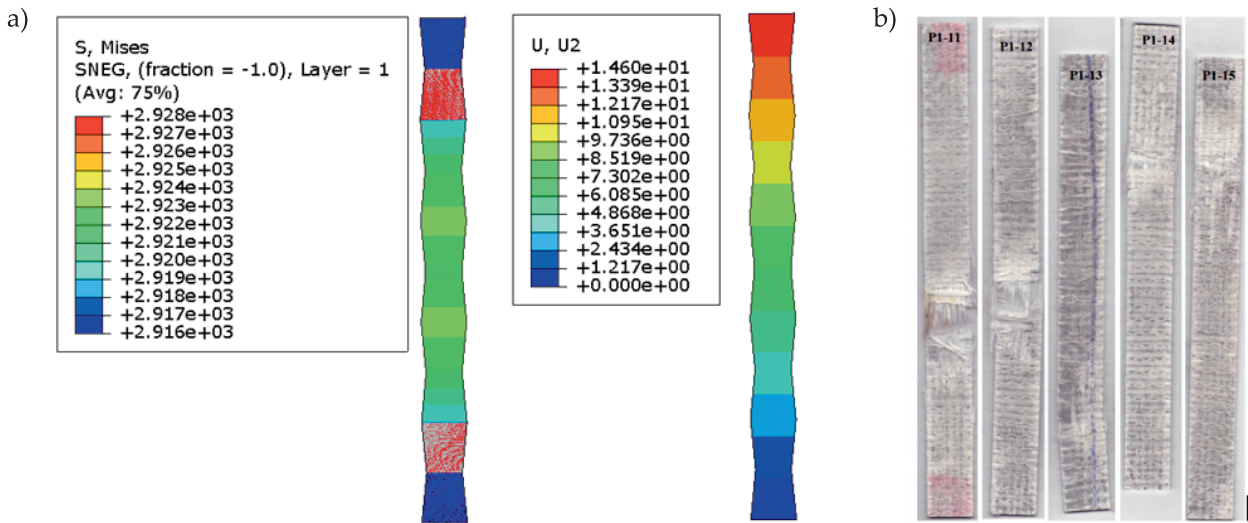
$$\sigma_{red} = \sqrt{[(\sigma_x - \sigma_y)]^2 + 3\tau^2} \quad (1)$$

a przy założeniu  $\sigma_x = \sigma, \sigma_y = 0$  i  $\tau_{xy} = \tau$ , powyższa zależność (1) przyjmuje postać (2):

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad (2)$$

Obliczenia naprężeń (rys. 4a) ujawniły pojawienie się symetrycznych naprężeń w górnej i dolnej części próbek (rys. 1) ciętych pod różnymi kątami. Obszary mocowania próbek prostokątnych z nakładkami w uchwytach maszyny, posiadały niższe wartości koncentracji naprężeń niż próbki w kształcie wiosełek (rys. 5). Wybór kształtu próbek prostokątnych z nakładkami, ciętych pod różnymi kątami (rys. 4 – na przykładzie próbki ciętej pod kątem 0°), wydaje się uzasadniony, chociaż są duże problemy technologiczne i czasowe przy klejeniu nakładek.

Materiał na nakładki powinien mieć mniejszą sztywność od materiału badanego. Rodzaje „próbek” stosowanych w badaniach mogą być bardzo różnorodne. Autorzy tej pracy skłaniają się do stosowania „próbek” przygotowanych starannie w warunkach kontrolowanych, a nie w zwykłych warunkach produkcji przemysłowej. W ten sposób można kontrolować występujące procesy (pęknięcia w przewidzianej części badanej próbki pod obciążeniem porównywalnym z obciążeniem w warunkach



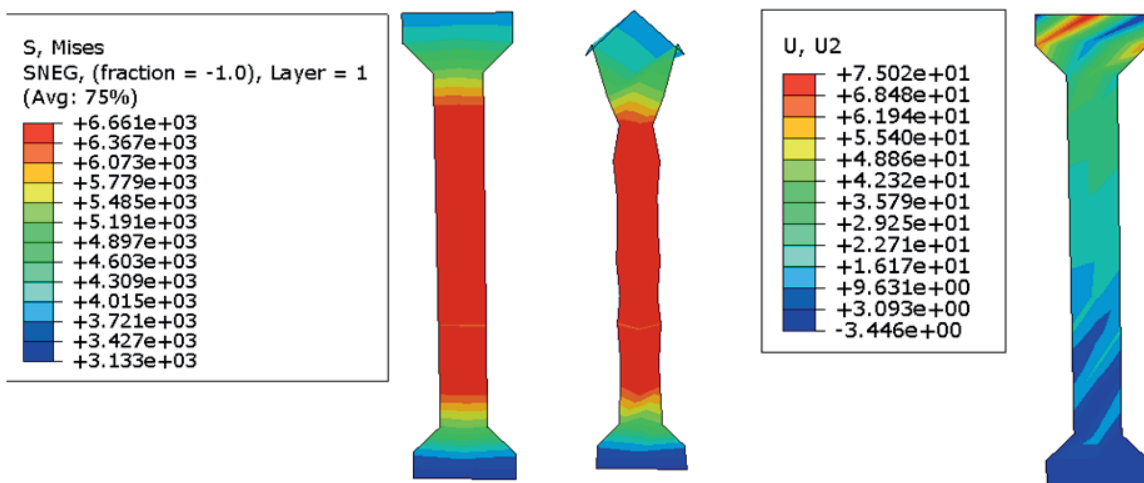
Rys. 4. Wyniki analizy naprężeń – model próbek prostokątnych ciętych pod kątem  $0^\circ$  (wg normy ISO 527-5:1997), zgodnie z hipotezą wyężeniową von Misessa (a) i próbki rzeczywiste (b)

eksploatacji) i zjawiska (efekt skali), co ułatwia interpretację otrzymanych wyników z danej próbki. W przypadku formowania włóknistego materiału kompozytowego przeznaczonego na próbki, należy zapewnić odpowiednią zawartość włókien oraz przestrzegać technologii wytwarzania, która powinna być taka sama jaką stosowano w produkcji materiału. Defekty w strukturze znacząco wpływają na jakość przygotowanych próbek, a tym samym na otrzymane wyniki.

W tabeli 4 średnia wytrzymałość WMK (123 MPa) otrzymana z 5 próbek ciętych pod

Tabela 4. Zestawienie właściwości mechanicznych próbek ciętych pod kątem  $0^\circ$

Obciążenia WMK ciętego pod kątem $0^\circ$ względem wzmocnienia			
Oznaczenie próbki	$F_{max}$ , kN	$\sigma_{max}$ , MPa	E, GPa
metodą ręczną			
P1-11	8,25	154,60	12,20
P1-12	7,80	123,50	11,20
P1-13	5,20	89,30	10,10
P1-14	8,10	129,40	11,80
P1-15	7,20	117,90	11,40
Średnia	7.31	122.98	11,34



Rys. 5. Modelowanie koncentracji naprężeń próbek w kształcie wiosełek ciętych pod kątem  $0^\circ$  (wg normy PN-EN ISO 527-4:1997) zgodnie z hipotezą wyężeniową von Misessa

kątem  $0^\circ$  utrudnia interpretację otrzymanych wyników z danej partii próbek. Jedna z próbek (P1-13: tabela 4) została odrzucona w wyniku niespełnienia przyjętych wymagań. Co spowodowało zwiększenie średniej wytrzymałości (dla danej partii próbek ciętych pod kątem  $0^\circ$ ) o 5% (do poziomu 131,35 MPa: Tab. 1).

### 3. WNIOSKI

W wyniku analizy stwierdzono, że:

- starannie przygotowane „próbki” ułatwiają interpretację otrzymanych wyników;
- jakość przygotowanych próbek pozwala kontrolować występujące procesy (pęknięcia w przewidzianej części badanej próbki) i zjawiska (efekt skali, rozwarstwienia);
- obszary mocowania próbek prostokątnych z nakładkami w uchwytach maszyny, dla formowanego WMK metodą worka próżniowego posiadały niższe wartości koncentracji naprężeń niż próbki w kształcie wiosełek;
- zasadnicza różnica pomiędzy wartościami mechanicznymi otrzymanymi z weryfikacji wpływu kształtu próbek ciętych pod różnymi kątami względem wzmocnienia metodą elementów skończonych (ABAQUS), a wartościami otrzymanymi z eksperymentu spowodowana jest prawdopodobnie tym, że program ABAQUS nie uwzględnia błędów technologicznych (zbyt mała ilość żywicy, śladowe pozostałości powietrza) i zjawisk na brzegu próbki.

### Bibliografia:

- [1] Gnatowski A.: Wpływ rodzaju napełniacza na właściwości wybranych mieszanin polimerowych, *Kwartalnik Kompozyty* nr 2, (2005) 63-68.
- [2] Chatys R.: Mechanical Properties of Polymer Composites Produced by Resin Injection Molding for Applications Under Increased Demands for Quality and Repeatability, *Journal of "Ultrasound"*, 64:2 (2009) 35-38.
- [3] Guigon M., Jinkin M. K.: The interface and inter-phase in carbon fibre-reinforced composites. *Journal "Composite"*, Vol.25, (1994).
- [4] Chatys R.: Modeling of Mechanical Properties with the Increasing Demands in The Range of Qualities and Repeatability of Polymers Composites Elements, Monograph „Polymers and Constructional Composites”, Gliwice (2008) 36-47.
- [5] Spilker R.L., Chau S.C.: Edge effects in symmetric composite laminates: importance of satisfying the traction-free-degree condition, *J. of Composite Mate.*, 14:1 (1980) 2-20
- [6] Curtin W.A.: Dimensionality and Size Effects on the Strength of Fiber-Reinforced Composites, *Composites Science and Technology*, vol. 60 (2000) 543-551.
- [7] Полёв В.А., Перов Ю.Ю.: Экспериментальные методы оценки кромочного эффекта, *Механика композит. материалов*. N.2 (1989) 318-331.
- [8] Królikowski W.: Polimerowe kompozyty konstrukcyjne, PWN, Warszawa (2012).
- [9] Chatys R.: Analiza statystyczna parametrów wytrzymałościowych w procesie zniszczenia kompozytów włóknistych z wykorzystaniem procesu Markowa, Kielce (2013).
- [10] Harper A. R.: Zalety procesu formowania kompozytów z ciekłej żywicy w zamkniętych formach, *JEC Composites*, VIII-IX (2003).
- [11] Chatys R.: Modeling of Strength Parameters of a Fiber Composite Using the Markov Chains Theory, *Przetwórstwo tworzyw*, 147:3, (2012) 169-173.
- [12] Кроссман Ф.В.: Анализ разрушения слоистых композитов у свободного края, *Разрушение композитных материалов*, *Механика комп. матери.* N.2 (1979) 280-290.
- [13] Rusiński E., Czmochocki J., Smolnicki T.: Zaawansowana metoda elementów skończonych w konstrukcjach nośnych. Oficyna Wyd. PW, Wrocław (2000).
- [14] Ochelski S.: Metody doświadczalne mechaniki kompozytów konstrukcyjnych, WNT Warszawa (2004).
- [15] Żuchowski R.: Wytrzymałość Materiałów, Oficyna Wyd. PW, Wrocław (1996).