

## ODPORNOŚĆ LAMINATU WĘGLOWO-EPOKSYDOWEGO NA ZMĘCZENIOWY ROZWÓJ ROZWARSTWIEŃ W WARUNKACH ISP

KAMILA CZAJKOWSKA, DANIEL SZELAĞ, ZBIGNIEW LORENC

Instytut Lotnictwa

PIOTR CZARNOCKI

Politechnika Warszawska

### Streszczenie

Przeprowadzone badania dotyczą odporności laminatu węglowo-epoksydowego o wzmocnieniu z jednokierunkowej z taśmy KDU1007 wykonywanego techniką „na mokro”, na propagację rozwarstwień w warunkach obciążeń cyklicznych, w warunkach I sposobu pęknięcia, dla  $R = 0.5$  i  $G_{max} = 0.9$  Gc. Z badań otrzymano następujące wyniki: wartości progowa i krytyczna współczynnika uwalniania energii wynoszą odpowiednio 0.145 i 0.275 N/mm natomiast równanie Parisa przyjmuje postać  $da/dn = 10^{6.404} G^{15.977}$ . Wyniki te są rezultatem przyjęcia do obliczeń obserwowanej długości rozwarstwienia  $a_{vis}$ . Uzupełniono je o analogiczne wyniki uzyskane przez przyjęcie do obliczeń długości rozwarstwienia wynikającej ze zmian podatności próbki. Są to  $G^th = 0.15$  N/mm,  $G^c = 0.275$  n/mm i zależność  $da/dn = 10^{7.475} G^{17.553}$ .

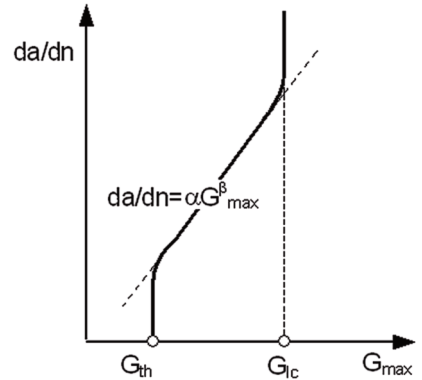
### WSTĘP

Laminaty ze wzmocnieniem z włókien węglowych w szerokim zakresie zastąpiły stopy Al w elementach struktury nośnej płatowca. Jednakże jest to wciąż stosunkowo nowy materiał i jego odporność na zmęczeniową propagację rozwarstwień jest ciągle obiektem badań wielu laboratoriów. Prowadzone w nich prace, w tym zakresie, koncentrują się głównie na laminatach uzyskiwanych z preimpregnatów metodą autoklawową. Wiele mniejszych wytwórni lotniczych stosuje wciąż mniej zaawansowane i tańsze techniki wytwarzania np. „na mokro”, uzyskując wyroby spełniające wymagania przemysłu lotniczego. W przypadku obydwu techniki wytwarzania odporność laminatów na rozwarstwienia pozostaje „piętą achillesową”, jednakże dostępne publikacje dostarczają głównie informacji dot. laminatów uzyskanych pierwszą z wymienionych metod, stąd też istnieje potrzeba rozszerzenia zakresu wzmiankowanych badań i objęcia nimi także laminatów formowanych „na mokro”.

$$da/dn = 10^{7.475} G^{17.553}$$

(1)

*Rys. 1. Jedną z możliwości scharakteryzowania odporności laminatu na zmęczeniową propagację delaminacji jest zależność Parisa uzupełniona o dwa ograniczenia: dolne- $G_{th}$  i górne- $G_{Ic}$*

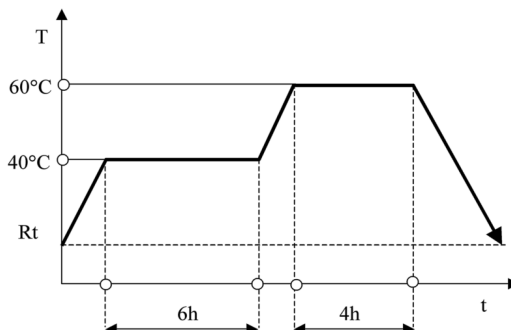


Jednym ze sposobów opisu odporności laminatów na zmęczeniową propagację rozwarstwień może być zależność Parisa o postaci (1), wiążąca prędkość propagacji rozwarstwienia  $da/dn$  z wartościami współczynnika uwalniania energii  $G_{max}$ , uzupełniona o dwie wartości graniczne: wartość progową  $G_{th}$  informująca o wartości współczynnika uwalniania energii poniżej której propagacja nie występuje oraz o wartość  $G_c$ , będącą wartością krytyczną współczynnika uwalniania energii (rys. 1), przekroczenie której prowadzi do niestabilnego rozwoju rozwarstwienia.

## 1. BADANIA

### Material

Badania dotyczyły laminatu węglowo-epoksydowego ze wzmocnieniem z jednokierunkowej taśmy węglowej KDU 1007 i spoiwem z żywicy epoksydowej EP53, utwardzanej Z1. Nominalny masowy udział wzmocnienia wynosił 50%. Laminat był utwardzany według cyklu cieplnego jak na rysunku 2, z zastosowaniem podciśnienia wynikającego z odessania powietrza spod polietylenowego okopertowania do wartości 03 atm, odczytywanej na dołączonym manometrze i utrzymywanej przez pierwszy okres utwardzania.

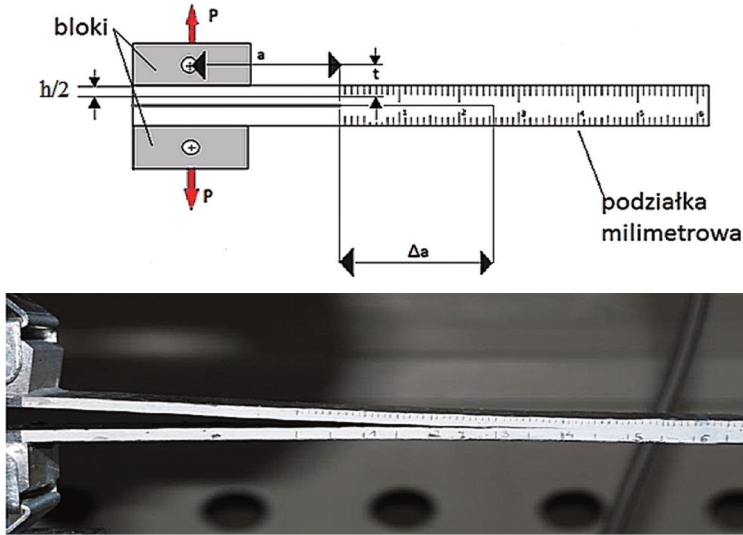


*Rys. 2. Cykl cieplny procesu utwardzania*

### Próbki

Próbki o wymiarach 125 x 25 mm wycinano z płyty o nominalnej grubości 3mm, na frezarce przy użyciu piły o nasypie diamentowym, zwracając szczególną uwagę, by w trakcie cięcia nie

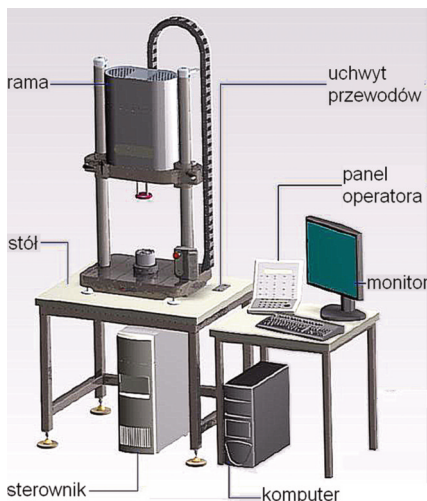
powodować delaminacji bocznych. Wstępna delaminacja wzdłużna (rys. 3), o nominalnej długości 50 mm była wykonywana na etapie formowania płytek, poprzez wstawienie w połowie grubości płyty wkładki z dwu pasków folii aluminiowej o grubości około 0.02 mm z naniesionym na nie rozdzielaczem silikonowym. Po wycięciu próbek doklejane były do nich metalowe uchwyty w postaci bloczków z otworami o osiach prostopadłych do osi wzdłużnej próbki. Do klejenia powierzchnie próbek przygotowano poprzez wstępne odtuszczenie detergentem i szorstkowanie papierem ściernym.



*Rys. 3. Próbka typu DCB wykorzystana do badań propagacji rozwarstwienia w warunkach I sposobu pękania; a- sposób naniesienia podziałki ułatwiającej wizualną rejestrację przyrostu rozwarstwienia; b- próbka z naklejonymi, zamocowana w szczękach maszyny wytrzymałościowej*

### Program i sposób przeprowadzenia badań

Jak wspomniano, w celu scharakteryzowania odporności laminatu na zmęczeniową propagację rozwarstwień dla przyjętej wartości współczynnika asymetrii cyklu  $R$  wymagana jest znajomość wartości  $G_c$ , zależności Parisa oraz wartości  $G_{th}$ .



*Rys. 4. Stanowisko pomiarowe*

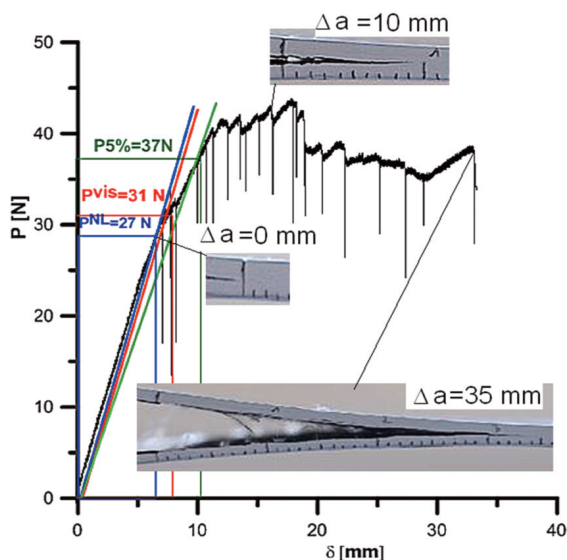
W tym celu, kierując się zaleceniami normy ASTM D 5528-01 [1] wykonano badania 5 próbek w warunkach obciążeń quasi-statycznych wyznaczając wartości  $G_{Ic}$ . Następnie, w celu wyznaczenia zależności Parisa przeprowadzono badania 8 próbek przy częstotliwości 10 Hz, dla wartości współczynnika asymetrii cyklu przy  $R = 0.5$  i  $G_{max} = 0.9 G_c$ . Wartości  $G_{th}$  przyjmowano jako wartość współczynnika uwalniania energii przy którym wartość  $da/dn$  była mniejsza niż  $10^{-7}$  mm/cykl lub przyrost rozwarstwienia nie był obserwowany. Badanie prowadzono w temperaturze pokojowej, wykorzystując konfigurację tzw. zdwojonej belki wysięgnikowej (DCB). Wszystkie próby przeprowadzono przy pomocy maszyny wytrzymałościowej INSTRON ElectroPuls 3000 (rys. 4). Przyrost rozwarstwienia był rejestrowany metodą fotograficzną. Jako wartości przemieszczenia, ze względu na małą sztywność próbki w porównaniu ze sztywnością układu obciążającego maszyny, przyjęto przemieszczenia szczęk mocujących próbkę. Wartości siły były rejestrowane z wykorzystaniem głowicy dynamometrycznej o zakresie do 1 kN.

## 2. WYNIKI BADAŃ

### Wyniki badań w warunkach obciążeń quasi-statycznych

Wartości krytyczne współczynnika uwalniania energii wyznaczono zgodnie z normą ASTM D 5528-01, według 3 kryteriów:

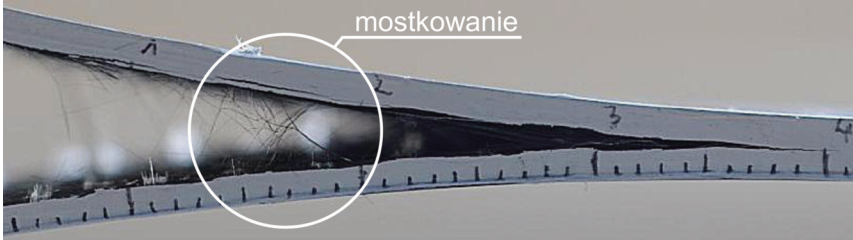
- „początku” nieliniowości wykresu  $P(\delta)$  - oznaczając symbolem  $G_{IcNL}$ ,
- pięcioprocentowego wzrostu podatności próbki – oznaczając symbolem  $G_{Ic5\%}$  i
- obserwowalnemu początkowi przyrostu długości rozwarstwiane, oznaczając symbolem  $G_{Icvis}$ .



Rys. 5. Przykładowe wyniki rejestracji obciążenia  $P$ , w funkcji przemieszczenia punktów przyłożenia obciążenia  $\delta$  oraz obrazy rejestracji długości rozwarstwienia  $a$

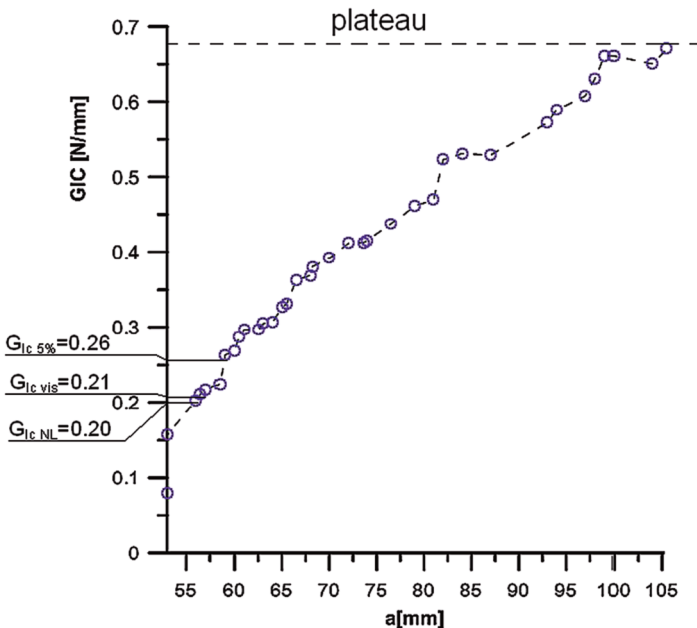
Na rysunku 5 przykładowo przedstawiono wykres  $P(\delta)$  z zaznaczonymi charakterystycznymi punktami odpowiadającym początkowi nieliniowości wykresu ( $P_{NL}$ ), obserwowalnemu przyrostowi rozwarstwienia ( $P_{vis}$ ) i pięcioprocentowemu wzrostowi podatności próbki ( $P_{5\%}$ ). Linie pionowe są znacznikami każdorazowego przyrostu rozwarstwienia o  $a = 0.5$  mm, uzyskiwanymi przez naciśnięcie głowicy pomiarowej w momencie wykonywania zdjęcia. Zdjęcie takie

pokazane jest na rysunku 6. Widać, iż odczyt rozwoju rozwarstwienia z dokładnością do 0.5 mm nie sprawia trudności. Zdjęcia zamieszczone wokół wykresu (rys. 5) przedstawiają obraz rozwarstwienia tuż przed inicjacją propagacji ( $\Delta a = 0$ ) oraz dla przyrostu  $\Delta a = 10$  mm i  $\Delta a = 30$  mm.



**Rys. 6. Nowopowstałe powierzchnie rozwarstwienia nie są całkowicie odseparowane. Zdjęcie pokazuje, że fotograficzna metoda rejestracji przemieszczania się czoła rozwarstwienia jest możliwa z dokładnością co najmniej do 0.5 mm**

W trakcie rozwoju rozwarstwienia w warunkach obciążenia quasi-statycznego pojawia się tzw. mostkowanie (rys. 6), tj. niekompletna separacja przeciwległych powierzchni spowodowana nieprzerwaniem części włókien wzmocnienia. Mostkowanie powoduje wzrost oporu propagacji rozwarstwienia, charakteryzowanym tzw. krzywą  $R$  (rys. 7). Po przekroczeniu pewnej wartości  $a$  krzywa  $R$  osiąga plateau.



**Rys. 7. Przykładowa zależność  $G_{Ic}(a)$**

Odpowiadająca jej wartość  $G_c$  określana jest mianem wartości propagacyjnej, w odróżnieniu od trzech poprzednio wymienionych, określanych mianem wartości inicjacyjnych.

Zestawienie otrzymanych wartości inicjacyjnych współczynnika uwalniania energii przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości krytyczne inicjacyjne współczynnika uwalniania energii			
Lp.	$G_{Ic NL}$ N/mm	$G_{Ic vis}$ N/mm	$G_{Ic 5\%}$ N/mm
1	0.20	0.21	0.26
2	0.19	0.24	0.23
3	0.21	0.23	0.23
4	0.20	0.22	0.23
5	0.28	0.30	0.36
6	0.27	0.28	0.32
średnia	0.275	0.29	0.34

### Wyniki badań w warunkach obciążeń cyklicznych

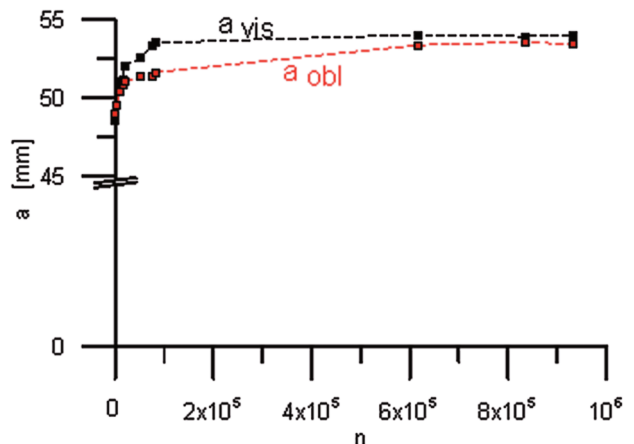
Wyniki badań w warunkach obciążeń cyklicznych opracowano korzystając z dwu wartości  $a$ : określonych na podstawie obserwacji i oznaczonych  $a_{vis}$  kierując się, z braku innej, sugestiami zawartymi w normie ASTM E647, (odnoszącej się do propagacji pęknięć zmęczeniowych w metalach) [2] oraz na podstawie zmian podatności próbki, oznaczonych  $a_{obl}$ , wykorzystując zależność (2)

$$a = \sqrt{\frac{\delta B E_{11} h^3}{8P}} \quad (2)$$

gdzie:

- $\delta$  – wzajemne przemieszczeni punktów przyłożenia obciążenia  $P$
- $E_{11}$  – moduł Younga w kierunku wzdłużnym próbki
- $h$  – pół grubości próbki
- $B$  – szerokość próbki

Przykładowo, wartości obu wielkości  $a_{vis}$  i  $a_{obl}$  otrzymane na podstawie badań jednej z próbek pokazano na rysunku 8. Łatwo stwierdzić, iż maksymalna różnica między odpowiadającymi sobie wartościami, podobnie jak dla pozostałych próbek nie przekracza 4%.

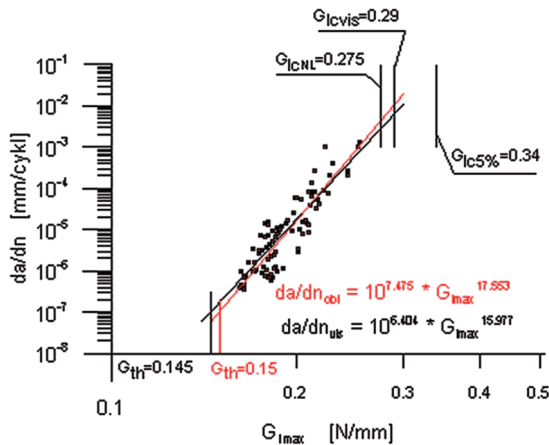


Rys. 8. Zależność długości rozwarstwienia od liczby cykli zmian obciążenia.  $a_{vis}$ -wyniki z obserwacji;  $a_{obl}$  - wyniki obliczeniowe na podstawie zmian podatności

Wykresy na rysunku 9 reprezentują, w sposób kompleksowy, wyniki otrzymane po zbadaniu wszystkich próbek. Zależność Parisa otrzymana na podstawie obliczeniowej długości rozwarstwienia to:  $da/dn = 10^{7.475} G^{17.553}$  oraz dla obserwowanej to  $da/dn = 10^{6.404} G^{15.977}$ .

Odpowiadające wartości progowe, na podstawie opisanej wcześniej procedury, zostały przyjęte odpowiednio jako 0.15 i 0.145 N/mm. Na wykresie pokazano także trzy wartości krytyczne współczynnika uwalniania energii, ograniczające „od góry” zależności Parisa.

Porównanie odporności na rozwarstwianie badanego laminatu z odpornością na rozwarstwianie laminatów otrzymanych z preimpregnatów węglowych za pomocą metody autoklawowej jest trudne, gdyż dostępne autorom dane literaturowe odnoszą się do badań przeprowadzanych w innych warunkach np. dla wartości  $R = 0.9$ , ponadto dotyczą zwykle pojedynczych próbek i brak jest wartości  $G_{Ic}$  i  $G_{th}$ . Ogólnie można stwierdzić, iż prędkości propagacji rozwarstwienia w zależności od maksymalnej wartości współczynnika uwalniania energii przyjętych w testach zawierają się w przedziale ( $da/dn = 10^{-6}$  mm/cykl- $G_{I_{max}} = 100$  N/mm), ( $da/dn = 10^{-3}$ ,  $G_{I_{max}} = 180$  N/mm) dla typowych żywic epoksydowych [3] natomiast dla żywic o podwyższonej odporności na pękanie w przedziale ( $da/dn = 10^{-6}$  mm/cykl- $G_{I_{max}} = 100$  N/mm), ( $da/dn = 10^{-3}$ ,  $G_{I_{max}} = 300$  N/mm) [4].



Rys. 9. Wykresy Parisa dla różnych metod określania długości rozwarstwienia obl. – na podstawie zmian podatności, vis. – obserwacji długości rozwarstwienia

## BIBLIOGRAFIA

- [1] ASTM D 5528-01 „Standard test method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix composites
- [2] ASTM E647-08 „Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates”]
- [3] Bruner A.J, Murphy, Pinter G., „Development of a standardized procedure for the characterization of interlaminar delamination propagation in advanced composites under fatigue mode I loading conditions”, Engineering Fracture Mechanics, 76, 2009, s.2678-2889
- [4] Hojo M. i inni, „Mode I delamination fatigue properties of interlayer-toughened CF/epoxy laminates”, Composites Science and technology 66, 2006, s.665-67.

KAMILA CZAJKOWSKA, DANIEL SZELAĞ, ZBIGNIEW LORENC, PIOTR CZARNOCKI

RESISTANCE OF CARBON-EPOXY LAMINATE AGAINST MODE  
I CYCLIC DELAMINATION

*Abstract*

*Carbon-epoxy laminate reinforced with KDU1007 UD carbon fabric was tested to determine the laminate resistance against Mode I delamination due to cyclic loading. The laminate was made with the use of hand wet lay-up method. The tests were carried out under displacement controlled conditions for  $R = 0.5$  and  $G_{max} = 0.9 G_{Ic}$ . The following results were obtained:  $G_{th} = 145$  N/mm,  $G_{Ic} = 0.275$  N/mm, and Paris law of the form  $da/dn = 10^{6.404} G^{15.977}$  for visual assessment of the delamination extension, and  $G_{th} = 0.15$  N/mm,  $G_c = 0.275$  N/mm and Paris law of the form  $da/dn = 10^{7.475} G^{17.553}$  for compliance changes based assessment of delamination extension.*