

## MODYFIKACJA PROCEDURY WYZNACZANIA ZALEŻNOŚCI PARISA-ERDOGENA DLA LAMINATU WĘGLOWO-EPOKSYDOWEGO W WARUNKACH I SPOSOBU PĘKANIA

DANIEL SZELĄG, KAMILA CZAJKOWSKA, ZBIGNIEW LORENC

Instytut Lotnictwa

PIOTR CZARNOCKI

Politechnika Warszawska

### *Streszczenie*

*W związku z brakiem ogólnie przyjętej standardowej procedury wyznaczania odporności na rozwarstwienia laminatów ze spoiwem polimerowym, w pracy do tego celu adaptowano normę ASTM E647. Dla uniknięcia konieczności bezpośredniego monitorowania rozwoju rozwarstwienia zaproponowano modyfikację wymagań tej normy, polegające na wyznaczeniu długości rozwarstwienia na podstawie zmian podatności próbki. Wyniki wskazują, iż jest to możliwe, jednak w celu podwyższenia ich wiarygodności konieczne jest wykonanie interlaboratoryjnych badań na obszernej partii próbek, wykonanych ze zróżnicowanych materiałów.*

### 1. WPROWADZENIE

Laminaty ze wzmocnieniem z włókien węglowych zastępują co raz więcej metalowych elementów struktury nośnej płatowca. Jednakże jest to wciąż stosunkowo nowy materiał i z tego powodu nie wszystkie jego istotne właściwości mechaniczne zostały zbadane w wystarczającym stopniu. Jedną z nich jest odporność na rozwarstwienia zarówno w warunkach obciążeń quasi-statycznych jak i cyklicznych. Ponieważ wymienione właściwości stanowią „piętę achillesową” laminatów, problem jest tym bardziej istotny. W szczególności w odniesieniu do odporności na rozwarstwienia w warunkach obciążeń cyklicznych pozostaje wiele do zrobienia zważywszy, iż w dalszym ciągu nie dysponujemy żadnymi ogólnie przyjętymi standardami wykonywania takich badań.

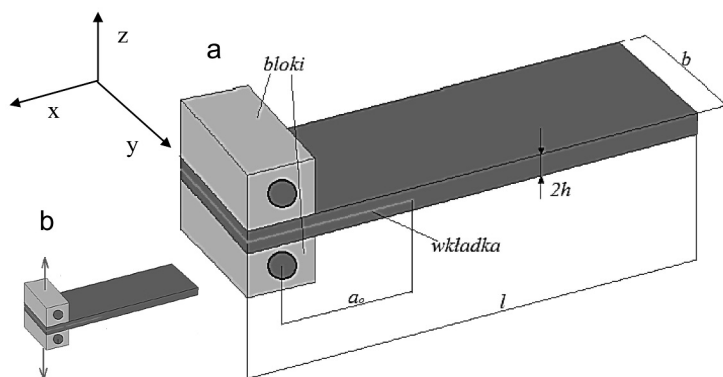
Celem badań zmęczeniowych często jest uzyskanie zależności Parisa-Erdogena (1). Wymaga to, między innymi śledzenia długości  $a$  pęknięcia w funkcji liczby cykli obciążeń  $n$ . W przypadku laminatów ze spoiwem polimerowym, z powodu nagrzewania się próbki, istnieje konieczność ograniczenia częstości obciążenia do kilkunastu Hz. Niektórzy badacze uważają, iż możliwe jest prowadzenie badań przy częstości nawet 20 Hz [1] jednak zwykle przestrzegany jest warunek

by częstość ta nie przekraczała 10 Hz [2]. To powoduje, iż próba może trwać kilkadziesiąt godzin. Śledzenie w tym czasie rozwoju rozwarstwienia wymaga obecności laboranta lub nie zawsze dostępnej, zautomatyzowanej metody zapisu zależności  $a(n)$ . Poniżej przedstawiono propozycję metodyki badań, w której zależność  $a(n)$  otrzymywana jest na podstawie zmian podatności próbkki. Uzyskane tą metodą wyniki porównano z wynikami otrzymanymi poprzez adaptację dla laminatów procedury zalecanej przez ASTM E647 [3] w odniesieniu do propagacji pęknięć zmęczeniowych w metalach.

## 2. EKSPERYMENT

### Próbki

Proponowaną modyfikację opracowania wyników badań testowano wykorzystując próbki wycięte z płytek o wymiarach 100 x 250 mm wykonanych z laminatu węglowo-epoksydowego metodą kontaktową („na mokro”), utwardzanych podciśnieniowo. Wzmocnienie stanowiła taśma węglowa KDU 1007 a spoiwo żywica epoksydowa Ep 53 z utwardzaczem Z1. Kompozyt utwardzano przez 6h w temperaturze pokojowej a następnie dotwardzano przez 4h w temp. 60°C. Nominalny udział masowy wzmocnienia wynosił 50%. Próbkki z płyty wycinano na frezarce piłką z nasypem diamentowym, po 4 z każdej płytki, zwracając szczególną uwagę by w trakcie cięcia nie powodować delaminacji bocznych. Wstępna delaminacja wzdłużna (rys. 1), na długości 50 mm była wykonywana uzyskana na etapie formowania płytek poprzez zastosowanie wkładki dwu pasków folii aluminiowej o grubości ok. 0.02 mm z naniesionym na nie rozdzielaczem.

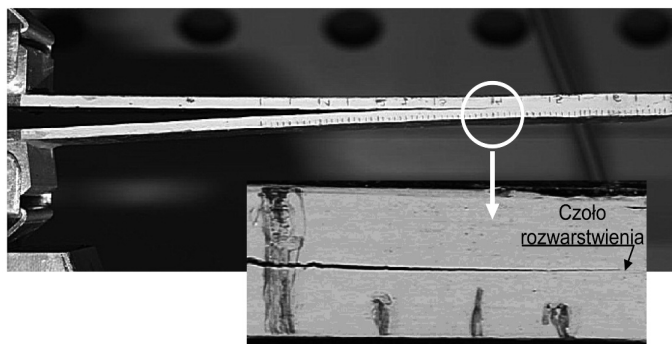


**Rys. 1. Próbkka do badań rozwoju delaminacji w warunkach I SP; a – wymiary nominalne:  $b = 25$  mm,  $a_0 = 50$  mm,  $2h = 3$  mm,  $l = 125$  mm; b – schemat obciążenia (I SP)**

By ułatwić śledzenie rozwoju rozwarstwienia bok każdej próbki został uprzednio pokryty możliwie cienką warstwą białego korektora z wodnym rozcieńczalnikiem. Po jego zaschnięciu wykreślano na jego powierzchni, prostopadle do kierunku przewidywanej propagacji rozwarstwienia linie o podziałce 1 mm (rys. 2).

### Warunki badań

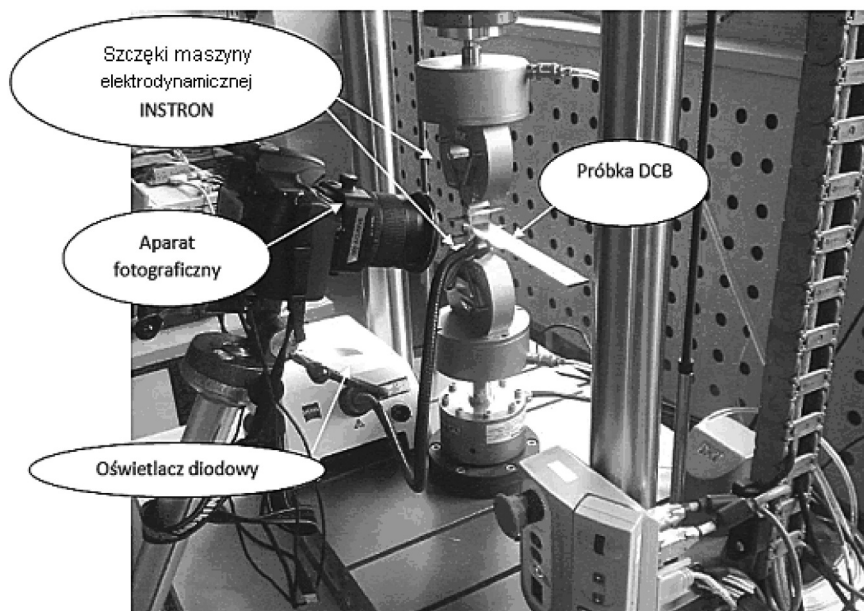
Badania zmęczeniowe przeprowadzono w temperaturze pokojowej, wykorzystując konfigurację tzw. zdwojonej belki wysięgnikowej (DCB), w warunkach kontrolowanego przemieszczenia i I SP, przy częstości zmian obciążenia  $f = 10$  Hz. Geometrię i sposób obciążenia próbek przedstawia rys. 1. Przyjęto współczynnik asymetrii cyklu  $R = 0.5$ . Maksymalna wartość przemieszczenia  $\delta_{max}$  odpowiadała  $G_{max} = 0.9G_{Ic}$ .



Rys. 2. Próbką z naniesionymi znacznikami rozwoju rozwarstwienia

### Stanowisko badawcze i rejestracja wyników

Zasadniczym elementem stanowiska badawczego była maszyna wytrzymałościowa INSTRON ElectroPuls 3000 wraz z typowym wyposażeniem, cyfrowy aparat fotograficzny wraz ze statywem, mikroskop i oświetlacze (rys. 3).



Rys. 3. Stanowisko badawcze

### Przebieg próby

W trakcie próby rejestrowano następujące wielkości: siłę  $P$ , przemieszczenie szczęk maszyny wytrzymałościowej i przyrost długości rozwarstwienia  $a$ . Ostatnia wielkość była rejestrowana fotograficznie poprzez cykliczne wykonywanie zdjęć – co 2000 cykli. Badania przerwano po wykonaniu 1000000 cykli.

### 3. PROCEDURA OPRACOWANIA WYNIKÓW

By uzyskać zależności Parisa – Erdogena (1)

$$da / dn = \alpha G^\beta \tag{1}$$

należy na podstawie zarejestrowanych danych wyznaczyć wartości współczynnika uwalniania energii  $G$  odpowiadające wybranym długościom delaminacji oraz odpowiadający mu przyrost długości delaminacji w jednym cyklu. W tym celu ASTM E647 zaleca wyznaczenie  $da/dn$  z zależności (2) (tzw. *secant method*)

$$\frac{da}{dn} \approx \frac{a_n - a_{n-k}}{k} \tag{2}$$

gdzie:

- $a_n$  – długość rozwarstwienia po  $n$  cyklach,
- $a_{n-k}$  – długość rozwarstwienia po  $n-k$  cyklach,
- $k$  – przyrost liczby cykli zmęzeniowych

lub procedurę polegającą na aproksymacji dyskretnej zależności  $a(n)$  wielomianem drugiego stopnia, zróżniczkowaniem go i wyznaczeniem wartości  $da/dn$  dla wartości  $n$  znajdującej się w połowie przedziału objętego aproksymacją (tzw. *incremental polynomial method*). W procedurze tej zalecane jest przyjmowanie przedziałów zawierających po 7 par wartości  $a$  oraz  $n$ . Wartość  $G$  odpowiadająca danej wartości  $da/dn$  wyznaczana jest dla długości delaminacji  $a_{n+k/2}$ . W przypadku postępowania zgodnego z ASTM E647 wartości  $a$  pochodzą z odczytów natomiast w proponowanej przez autorów modyfikacji wartości  $a$  są wyznaczane na podstawie zmian podatności próbki z zależności

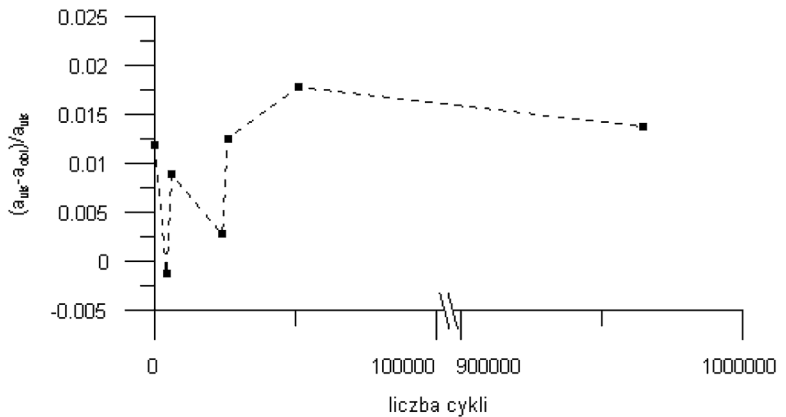
$$a = \sqrt{\frac{\delta B E_{11} h^3}{8P}} \tag{3}$$

gdzie:

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

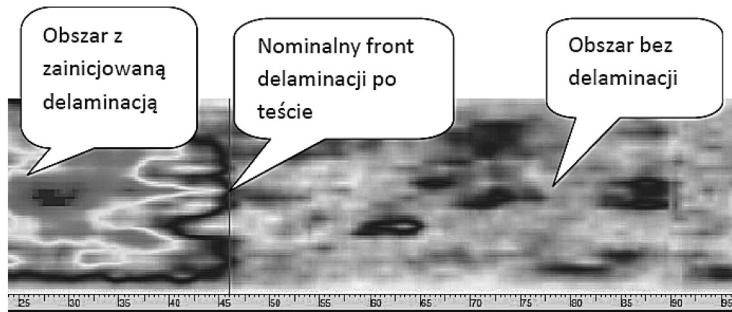
### 4. WYNIKI I DYSKUSJA

**Rys. 4. Względna różnica między obserwowaną długością rozwarstwienia i wyznaczoną na podstawie podatności**

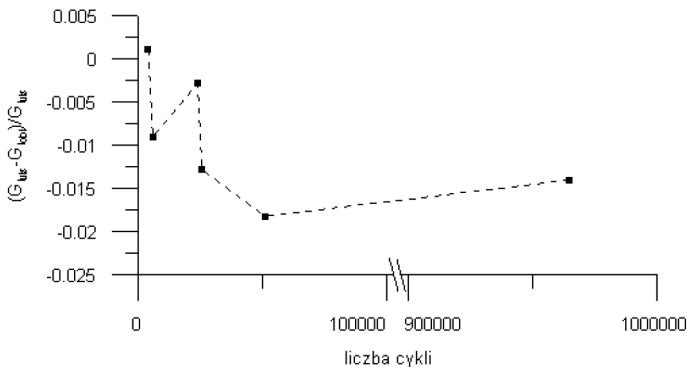


Zasadniczym parametrem, mogącym decydować o przydatności proponowanej modyfikacji metody zalecanej przez ASTM E647 jest różnica względna między zaobserwowaną i obliczoną długością rozwarstwienia. Dla zakresu przeprowadzonych badań różnice te nie przekraczały 2%, rys. 4. Trudno jest stwierdzić, która z zastosowanych metod daje „prawdziwe” i czy któreś z nich są „prawdziwe”, gdyż wymagałoby to dysponowania metodą umożliwiającą obserwację czoła pęknięcia na całej jego długości w wybranych przedziałach liczby cykli obciążeń. W przypadku wartości  $a_{vis}$  obserwowanych błąd metodyczny pomiaru może być spowodowany tym, iż czoło rozwarstwienia nie pozostaje proste i prostopadłe do krawędzi bocznych próbki, co jest w zakładane. W przypadku wyznaczania długości rozwarstwienia  $a_{obl}$  na podstawie podatności próbki należy pamiętać, iż zależność (3) została wyprowadzona przy założeniu małych ugięć, płaskości przekrojów poprzecznych oraz, iż każde z ramion jest utwierdzone ( $u_x = u_y = u_z = 0$ ) w jednym przekroju, który jest prostopadły do osi próbki. Ostatnie z założeń może być zweryfikowane z pewną dawką prawdopodobieństwa poprzez badania defektoskopowe metodą ultradźwiękową. Ich wyniki, rys. 5, sugerują istnienie odstępstwa od wspomnianego założenia, jednak pomiary dokonywane tą metodą nie są wystarczająco precyzyjne.

**Rys. 5. Amplitudowy c-scan próbki D po teście zmęczeniowym. Wyniki sugerują, iż czoło rozwarstwienia nie przebiega w jednym przekroju prostopadłym do osi próbki**

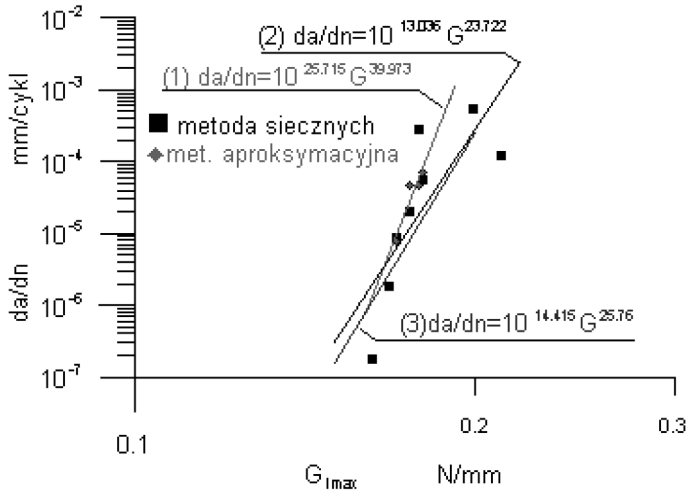


Pomijając problem spełnienia dwu pierwszych ze wspomnianych założeń, maksymalny błąd popełniany przy stosowaniu zależności (3) mógłby być oszacowany metodą różniczki zupełnej. Występuje on w przypadku szczególnie niekorzystnego zbiegu okoliczności, mało prawdopodobnym, przy sumowaniu się wszystkich błędów względnych wielkości występujących w zależności (3). Możliwość wnioskowania co do stosowalności równania (3) daje porównane długości początkowej rozwarstwienia, która jest stosunkowo łatwo mierzalna po zakończeniu próby z analogiczna wartością obliczeniową. W analizowanym przypadku różnica ta wynosiła około 1.2%.



**Rys. 6. Względna różnica między wartościami  $G_1$  wyznaczonymi na podstawie zaobserwowanej wartości  $a$  ( $G_{vis}$ ) i wartości  $a$  wyznaczonej na podstawie podatności ( $G_{obl}$ )**

Bezpośrednią konsekwencją różnic między  $a_{vis}$  i  $a_{obl}$  są rozbieżności między maksymalnymi wartościami  $G_{Ivis}$  i  $G_{Iobl}$  wyznaczanymi dla kolejnych liczb cykli obciążenia, z wykorzystaniem odpowiednio  $a_{vis}$  i  $a_{obl}$ . Jak należało się spodziewać, różnice te także nie przekraczają 2% (rys. 6).



**Rys. 7. Równania Parisa uzyskane w wyniku stosowania procedury zalecanej przez ASTM E647. Wyniki uzyskane dzięki metodzie aproksymacyjnej przedstawiono oznaczeniem  $\blacklozenge$  (równanie 1), natomiast wyniki uzyskane metodą siecznych oznaczono  $\blacksquare$  (równanie 2 i 3 – równanie 2 na podstawie  $a_{vis}$ , równanie 3 na podstawie  $a_{obl}$ )**

W analizowanym przypadku pomiarów metoda siecznych umożliwia uzyskanie 8 punktów, oznaczonych na wykresie  $\blacksquare$ , natomiast metoda aproksymacyjna, z powodu wymagań procedury obliczeniowej, dostarcza jedynie 4 punktów, oznaczonych na wykresie  $\blacklozenge$ , mogących posłużyć do uzyskania zależności Parisa (rys. 7). Równania 1 i 2 uzyskano na podstawie obserwowanej długości rozwarstwienia  $a_{vis}$  odpowiednio, metodą siecznych i aproksymacyjną. Równanie 3 zostało natomiast uzyskane metodą siecznych na podstawie obliczeniowej długości rozwarstwienia  $a_{obl}$ , wynikającej ze zmian podatności. Zdaniem autorów, z powodu większej liczby dostępnych punktów, mogących posłużyć sporządzeniu wykresu Parisa oraz mniejszej liczbie pośrednich operacji rachunkowych, lepiej jest przeprowadzić porównanie wyników uzyskanych na podstawie obserwacji przyrostu długości rozwarstwienia i obliczeniowej na podstawie zmian podatności koncentrując uwagę na równanie 2 i 3. Z wykresów wynika, że różnice między nimi nie są znaczące. Na podstawie studiów literaturowych np. [4, 5, 6] można stwierdzić, iż mieszczą się w typowym obszarze rozrzutu wyników.

Podsumowując, można stwierdzić, iż proponowana modyfikacja procedury zalecanej przez ASTM E647 polegająca na zastąpieniu obserwacji rozwoju rozwarstwienia poprzez określenie go na podstawie zmian podatności próbki daje obiecujące rezultaty. Należy jednak zwrócić uwagę, iż przedstawione wyniki dotyczą jedynie jednej próby i wymagają potwierdzenia poprzez prace badawcze obejmujące statystycznie istotną liczbę próbek.

*Pracę wykonano w ramach projektu POIG „Opracowanie technologii badań odporności na uszkodzenia lotniczych i kosmicznych kompozytowych struktur nośnych – TEBUK” realizowanego w ramach Priorytetu 1, Działania 1.1, Poddziałania 1.1.2.*

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Martin R. H.: *Accelerated Characterization of Delamination for High Cycle Application*, 4<sup>th</sup> European Conference on Composites: Testing and Standardisation, 31<sup>st</sup> August-2<sup>nd</sup> September 1998, Lisbon, Portugals, s. 105-114.
- [2] Bruner A. J., Murphy, Pinter G.,: *Development of a standarized 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.
- [3] ASTM E647-08: *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*.
- [4] Peng L. i inni: *Mode I delamination growth of multidirectional composite laminates under fatigue loading*, Journal of Composite Materials, 45, 2010, s. 1077-1089.
- [5] Arguelles A. i inni: *Fatigue delamination, Initiation, and Growth, under Model and II of Fracture in a Carbon\_Fiber Epoxy Composites*, Polymer Composites, 2010, s. 700-706.
- [6] Hojo M. i inni: *Mode I delamination fatigue properties of interlayer-toughened CF/epoxy laminates*, Composites Science and Technology, 66, 2006, s. 665-675.

DANIEL SZELAĞ, KAMILA CZAJKOWSKA, ZBIGNIEW LORENC, PIOTR CZARNOCKI

MODIFIED METHOD FOR DETERMINATION OF PARIS-ERDOGEN  
RELATIONSHIP FOR MODE I CYCLIC DELAMINATION  
OF CARBON-EPOXY LAMINATE

*Abstract*

*Designed for metals ASTM E647 standard test procedure was adapted for determination of Paris-Erdogen relationship for carbon-epoxy laminate. To eliminate the need for continuous monitoring of delamination growth during the test the new procedure was applied that takes advantage of compliance changes resulting from delamination growth. The test results indicate that such a procedure is promising one however additional interlaboratory test should be carried out with the use of larger number of specitens made of various laminates to enhance reliability of the procedure.*