

# Doświadczalne badanie delaminacji kompozytu warstwowego według I i II schematu pęknięcia

## Experimental study of layer composite delamination under mode I and mode II

JACEK STADNICKI  
JERZY MARSZAŁEK \*

Materiały z XX SKWPWiE, Jurata 2016 r.  
DOI: 10.17814/mechanik.2016.7.189

W artykule przedstawiono sposób realizacji dwóch eksperymentów, w których rozwarstwiano płaskie próbki z kompozytu warstwowego. W pierwszym przypadku rozwój szczeliny spowodowany był przekroczeniem dopuszczalnych naprężeń normalnych w osnowie, natomiast w drugim pęknięcie następowało w wyniku przekroczenia naprężeń stycznych. Celem badań było otrzymanie charakterystyk sztywności próbek i wyznaczenie progowych wartości odkształceń, przy których kompozyt zaczyna pękać.

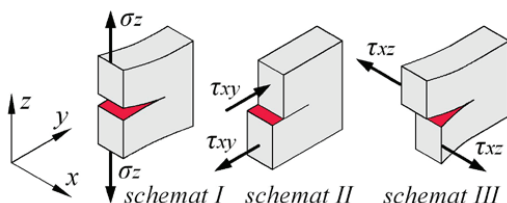
**SŁOWA KLUCZOWE:** kompozyt warstwowy, rozwieranie, ścinanie wzdlużne, eksperyment

*This article presents the method of implementing the two experiments delamination of flat samples of the composite layer. In the first case, the crack propagation was caused by exceeding the normal stress in the matrix, while in the second crack was caused by exceeding the shear stress. The aim of the study was to obtain the load–displacement response of samples and determining the critical deformation values at which the composite starts cracking*

**KEYWORDS:** layer composite, interlaminar tension, interlaminar sliding shear, experiment

Kompozyt to materiał, który powstaje w wyniku trwałego połączenia co najmniej dwóch komponentów o różnych właściwościach mechanicznych, z zachowaniem wyraźnej granicy rozdziału. Te komponenty to osnowa (matryca), która nadaje odpowiednią spójność, elastyczność i twardość, oraz komponent konstrukcyjny (wzmocnienie), zapewniający pożądane właściwości mechaniczne. Laminaty są szczególnym rodzajem materiałów kompozytowych, ponieważ ich wzmocnienie układane jest w formie warstw zespolonych osnową. Najczęściej występującym rodzajem uszkodzenia kompozytów warstwowych jest delaminacja (rozwarstwienie), czyli utrata spójności między warstwami składowymi. Ze względu na rodzaj obciążenia wyróżnia się trzy niezależne podstawowe schematy rozwarstwiania kompozytu [3]. Są to (rys. 1):

- schemat I – **rozwieranie**; w którym powierzchnie pęknięcia rozchylają się, a propagacja szczeliny następuje w kierunku prostopadłym do jej frontu w wyniku przekroczenia w osnowie dopuszczalnych naprężeń normalnych  $\sigma_z$ ,
- schemat II – **ścinanie wzdlużne**; charakteryzujące się prostopadłym do frontu szczeliny kierunkiem poślizgu powierzchni pęknięcia, przy czym szczelina rozwija się wskutek przekroczenia w osnowie dopuszczalnych naprężeń stycznych  $\tau_{xy}$ ,

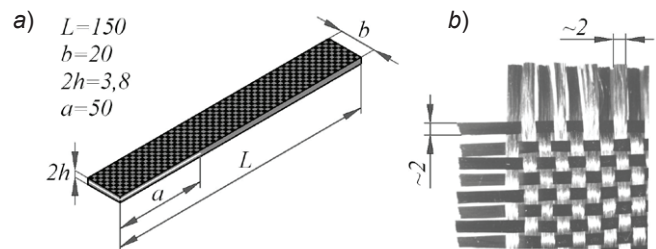


Rys. 1. Podstawowe schematy pęknięcia kompozytu warstwowego

- schemat III – **ścinanie poprzeczne**; w którym powierzchnie szczeliny przesuwają się po sobie w kierunku równoległym do frontu szczeliny, a pęknięcie związane jest z krytycznymi wartościami naprężeń stycznych  $\tau_{xz}$ .

### Obiekt badań

Długość próbek przeznaczonych do badania odporności kompozytu na pęknięcie według I schematu pęknięcia powinna wynosić co najmniej  $L = 125$  mm, szerokość zawierać się w przedziale  $b = 20 \div 25$  mm, a grubość między  $2h = 3 \div 5$  mm [1]. Podobne wymiary próbek stosuje się dla II schematu – z tą różnicą, że ich długość nie powinna być mniejsza od 120 mm. Do zrealizowania eksperymentów zastosowano próbki o jednakowych wymiarach  $L \times b \times 2h$  (rys. 2a). Każdą z nich wykonano z 16 warstw tkaniny o splocie płóciennym tasiemek z włókna węglowego (rys. 2b) i żywicy epoksydowej Biresin CR122.

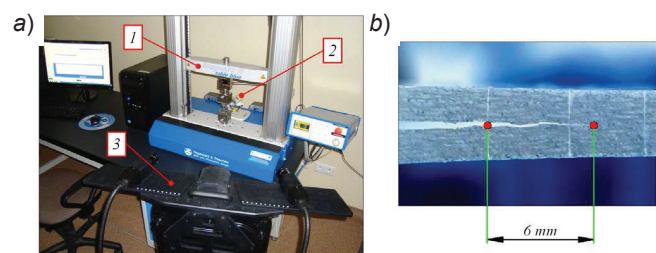


Rys. 2. Badane próbki kompozytu warstwowego: a) wymiary próbek, mm, b) orientacyjne wymiary tkaniny o splocie płóciennym, mm

Podczas laminowania, między środkowymi warstwami tkaniny (tj. między 8. i 9. warstwą) umieszczono cienką folię. W ten sposób zainicjowano w każdej próbce szczelinę – wstępne rozwarstwienie o długości  $a = 50$  mm (rys. 4 i 6).

### Stanowisko pomiarowe

Głównym wyposażeniem stanowiska pomiarowego (rys. 3a) była uniwersalna maszyna wytrzymałościowa Inspekt Table Blue 5 z komputerem i oprogramowaniem LabMaster. Do obserwacji i rejestracji propagacji pęknięcia zastosowano mikroskop cyfrowy o rozdzielczości 5 megapikseli i zakresie



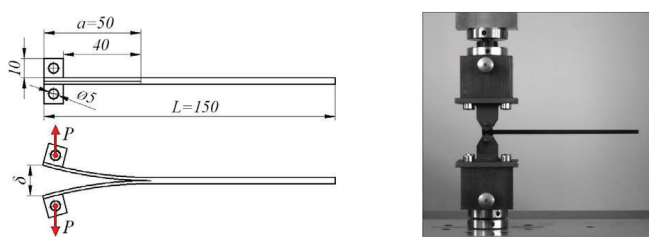
Rys. 3. Stanowisko pomiarowe: a) 1 – maszyna wytrzymałościowa, 2 – mikroskop cyfrowy, 3 – skaner optyczny, b) przykładowe zdjęcie mikroskopowe pęknięcia

\* Prof. dr hab. inż. Jacek Stadnicki (jstadnicki@ath.bielsko.pl); mgr inż. Jerzy Marszałek (jmarszalek@ath.bielsko.pl) – ATH w Bielsku-Białej

powiększenia 20÷300×. Przykładowe zdjęcie mikroskopowe bocznej powierzchni próbki z pęknięciem pokazano na rys. 3b. Dodatkowo kształt próbek po odkształceniu mierzono bezdotykowym skanerem optycznym EviXscan 3D Loupe+.

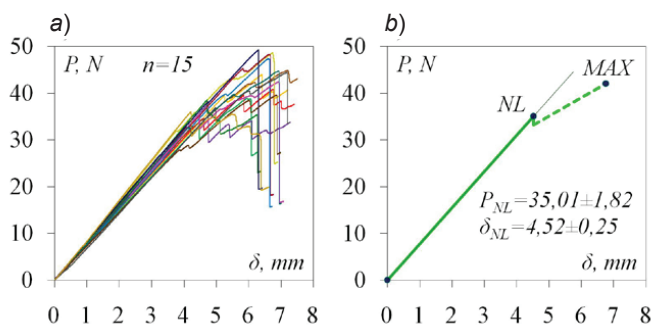
### I schemat obciążenia – rozwieranie kompozytu

Pierwszy schemat pęknięcia służy do wyznaczania odporności osnowy kompozytu warstwowego na delaminację pod działaniem naprężeń normalnych. Do jego realizacji stosuje się próbki w kształcie belki, obciążone jak na rys. 4, a metoda badań określana jest skrótem DCB (*Double Cantilever Beam test*). Badanie jest dokładnie opisane w normie ASTM D5528, ujęte jest również w literaturze, np. [1]. Do próbek przyklejono stalowe kostki z przelotowymi otworami, do których wprowadzono sworznie łączące z uchwytami maszyny wytrzymałościowej. Podczas eksperymentu ustawiono prędkość trawersy równą 0,5 mm/min. Wielkością zadawaną było rozwarcie próbki  $\delta$ , a mierzoną wartość siły  $P$  (rys. 4).



Rys. 4. Schemat próby rozwierania kompozytu oraz fotografia stanowiska

Badania przeprowadzono dla 15 próbek kompozytu. Dla każdej z nich otrzymano wykres sztywności  $P(\delta)$  (rys. 5a), a następnie sporządzono uśredniony wykres dla wszystkich próbek (rys. 5b). Początkowa część wykresu jest liniowa, ponieważ w próbce – pomimo wstępnie zainicjowanego pęknięcia – nie następuje jego dalszy rozwój. Po przekroczeniu siły  $P_{NL}$ , co odpowiada na charakterystyce punktowi *NL* (*non-linear point*), rozpoczyna się pęknięcie. Na wykresie podano dla tego punktu wartości siły  $P_{NL}$  oraz rozwarcia  $\delta_{NL}$  wraz z przedziałami ufności dla poziomu istotności 0,05, otrzymane dla testu t-Studenta.



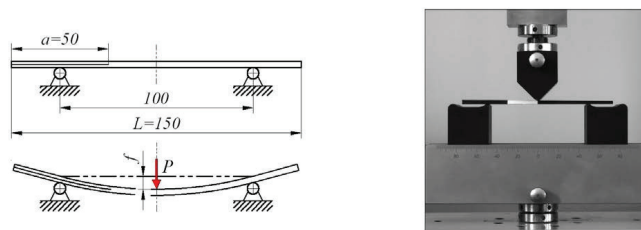
Rys. 5. Wykresy sztywności: a) dla kolejnych próbek, b) uśredniony dla wszystkich próbek

W punkcie *MAX* (*maximum load point*) obciążenie osiąga wartość krytyczną  $P_{MAX}$ , po przekroczeniu której następuje lawinowy przyrost pęknięcia. Uśredniona charakterystyka sztywności między punktami *NL* i *MAX* została zlinearyzowana, ponieważ rozwarstwienie w tym przedziale przebiegało w różny sposób (rys. 5a).

### II schemat obciążenia – ścinanie wzdłużne kompozytu

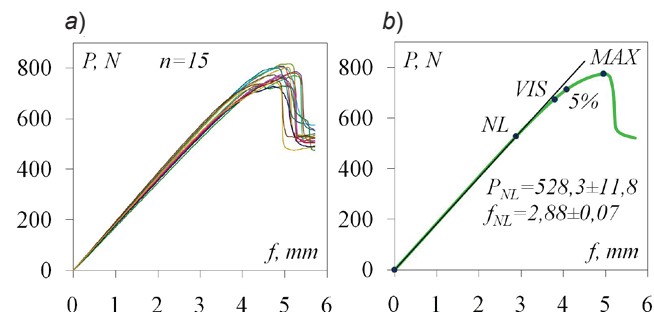
Drugi eksperyment polegał na przeprowadzeniu zginania trójpunktowego (rys. 6). Podczas takiej próby w warstwie obciążonej występują tylko naprężenia ścinające. Metoda określana jest w skrócie ENF (*End-notched Flexure test*), a sposób prowadzenia badań opisuje norma ASTM D790 i jest

również podana w literaturze, np. [1]. Prędkość przemieszczania trawersy podczas badań ustawiono na 0,5 mm/min. Podczas prób zginania zadawane było ugięcie  $f$ , a wielkością mierzoną była siła  $P$  (rys. 6).



Rys. 6. Schemat próby zginania kompozytu oraz fotografia stanowiska

Pomiary zrealizowano dla 15 próbek kompozytu. Dla każdej z nich otrzymano wykres sztywności (rys. 7a) i podobnie jak wcześniej wyznaczono uśrednioną charakterystykę (rys. 7b). Na wykresie wyróżniono cztery punkty, które oznaczono zgodnie z literaturą [2]. Punkt *NL* to moment, w którym wykres przechodzi z liniowego w nieliniowy. Dalej charakterystyka łagodnie odchyła się od liniowej, aż do momentu, w którym obciążenie osiąga wartość krytyczną, co odpowiada punktowi *MAX*. Po przekroczeniu siły krytycznej  $P_{MAX}$  obserwuje się lawinowy przyrost pęknięcia. Punkt *VIS* (*visual observation point*) odpowiada chwili, w której można wizualnie zauważyć postępujące rozwarstwienie na bocznej powierzchni próbki. Punkt 5% to miejsce przecięcia wykresu sztywności z przedłużoną i odchyloną o 5% liniową częścią tego wykresu. Siła  $P_{5\%}$  odpowiadająca temu punktowi wykorzystywana jest do weryfikacji poprawności zrealizowanych badań doświadczalnych. Badanie jest poprawne, jeżeli  $P_{MAX}/P_{5\%} < 1,1$ . Na wykresie podano progowe wartości siły  $P_{NL}$  oraz ugięcia  $f_{NL}$ , przy których próbka zaczyna się rozwarstwiać, wraz z przedziałami ufności dla poziomu istotności 0,05, otrzymane dla testu t-Studenta.



Rys. 7. Wykresy sztywności: a) dla kolejnych próbek, b) uśredniony dla wszystkich próbek

### Wnioski i perspektywa dalszych badań

Głównym celem badań było otrzymanie charakterystyk sztywności płaskich próbek kompozytu dla dwóch schematów pęknięcia, a zwłaszcza uchwycenie progowych wartości odkształceń, przy których rozpoczyna się proces delaminacji. Otrzymane wyniki zostaną wykorzystane do modelowania procesu pęknięcia kompozytu za pomocą metody elementów skończonych. Posłużą również do walidacji modeli numerycznych kompozytu.

### LITERATURA

- Adams D.F., Carlsson L.A., Pipes R.B. „*Experimental characterization of advanced composite materials – fourth edition*”. CRC Press – Taylor & Francis Group, Boca Raton 2014.
- Moore D.R., Pavan A., Williams J.G. „*Fracture mechanics testing methods for polymers adhesives and composites*”. ESIS Publication 28, Elsevier 2001.
- Wnuk M.P.: „*Podstawy mechaniki pęknięcia*”. Wydawnictwo Naukowe Akapit, Kraków 2008.