

Henryk Dąbrowski¹

Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Wydziałowy Zakład Wytrzymałości Materiałów, ul. Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław

OCENA PRZYCZYN DEKOHEZJI WYBRANYCH LAMINATÓW WARSTWOWYCH NA PODSTAWIE KRYTERIUM STRUKTURALNEGO

Opierając się na strukturalnym kryterium wyciężenia, dokonano analizy przyczyn dekohezji laminatów warstwowych o wzmocnieniu krzyżowym [± 30], [± 45] oraz [0/90]. Ponieważ model strukturalny stosowany do analizy uwzględnia w opisie wyciężenia laminatów wytrzymałość włókien osnowy i warstwy granicznej, więc wytrzymałości tych elementów oraz ich zmiany zostały uwzględnione w rozważanych laminatach. Rozpatrzono modele laminatów, w których osnowa i warstwa graniczna wykazywały różne wartości wytrzymałości. Korzystając z modelu strukturalnego, oceniono naprężenia krytyczne powodujące wyciężenie jednego z elementów struktury. Ocenę tę przeprowadzono dla dróg obciążania zawartych w przedziale $0 \div 360^\circ$ na płaszczyźnie $\sigma_x - \sigma_y$. Przyjęto, że osiągnięcie jednego ze stanów krytycznych przez włókna, osnowę lub warstwę graniczną [1] jest równoznaczne z osiągnięciem stanu krytycznego przez laminat. Na podstawie obliczonych wartości naprężeń krytycznych sporządzono wykresy krzywych granicznych we współrzędnych $\sigma_x - \sigma_y$. Na wykresach tych zaznaczono również obszary, w których zawarte drogi obciążania powodują dekohezję danego elementu struktury. Stwierdzono, że przyczyna dekohezji zależy nie tylko od struktury laminatu, wytrzymałości jego elementów, ale także od drogi obciążania. Oceniono wpływ struktury (kierunków ułożenia warstw) oraz wytrzymałości wymienionych elementów struktury na przyczyny dekohezji badanych laminatów. Wyniki zilustrowano na wykresach.

Słowa kluczowe: laminaty, wyciężenie, dekohezja

EVALUATION OF THE CAUSES OF FRACTURE IN SELECTED PLY LAMINATES AS BASED ON A STRUCTURAL CRITERION

Phenomenological criterions, which are applied for estimation of the uniaxial strengthened layers oriented, require of strength tests of the layers. It makes difficult to use the laminates design and optimization processes of their structure elements. Additional defect of these applied criterions, which are used in method of elimination of layers is lack of information, which of them are the weakest elements and then undergo the decohesion process as the first links. It makes impossible to elaborate the method of the laminate strength properties improving the weakest element of its structure. It should be done during laminate structure design when structure elements are selected (fibres, warp and their chemical treatment). The causes of fracture were identified in cross-reinforced (± 30 , ± 45 , 0/90) ply laminates using a structural criterion. The model takes account of all the three material elements: fibres, matrix and phase interface, so strength characteristics and their changes for all the three constituents were used in the analysis. Laminates with differing strengths of the matrix and the interface were considered. The structural model yielded critical stresses for each element. The analysis involved loading paths from the $0 \div 360^\circ$ range at the $\sigma_x - \sigma_y$ plane. It was assumed that attaining a critical condition by the fibres, the matrix or the interface is equivalent to attaining the critical condition by the whole laminate. The computed critical stresses served as a basis for determining plots of limit curves in the $\sigma_x - \sigma_y$ coordinates. In the plots the areas are marked that contain those loading paths which are responsible for damaging a particular structural element. It was found therefore that fracture in laminates is affected not only by their structure and strength of individual structural elements, but also by a loading path applied. Example plots show how the ply configuration and strength of individual structural elements determine types of fracture.

Keywords: nickel layers, nanocrystalline composite layers, structure, abrasion wear properties

WSTĘP

Projektowanie konstrukcji laminatowych wymaga stosowania laminatów o znanych wartościach wytrzymałości. Jest to również możliwe, jeżeli stosujemy laminat złożony z warstw o znanych, wcześniej zbadanych własnościach oraz określimy układ tych warstw w konstruowanym laminacie. W wielu przypadkach powstaje jednak potrzeba zaprojektowania materiału o optymalnych dla danych obciążeń własnościach wytrzymałościowych. Innym podejściem jest stosowanie kryterium strukturalnego, które pozwala ocenić wytę-

żenie laminatu na podstawie własności włókien, osnowy oraz warstwy granicznej. Wówczas można ponadto optymalizować wytrzymałość tych elementów do obciążeń laminatu dla przyjętej jego struktury.

Przy doborze optymalnych dla obciążeń własności wytrzymałościowych laminatów w przypadku stosowania kryterium strukturalnego należy właściwie dobrać własności składników. Bywa tak, że w pewnych przypadkach oprócz doboru włókien istnieje również moż-

¹ dr inż.

liwość doboru własności osnowy czy też preparacji włókien. Te możliwości pozwalają na optymalizację własności składników dla projektowanego laminatu pod względem wytrzymałości czy też obniżenia ceny materiału. Jak wynika z przeprowadzonej analizy, przyczyny dekohezji w złożonych stanach zależą nie tylko od wytrzymałości elementów struktury, kątów ułożenia warstw, ale także od drogi obciążania powodującej dekohezję.

Jednym z kryteriów strukturalnych opisujących wyężdzenie laminatów warstwowych jest kryterium sformułowane w [1]. Kryterium to oparte jest na rozwiązaniu podstawowej komórki kompozytu wydzielonej z warstwy jednokierunkowo wzmocnionej i obciążonej naprężeniami działającymi wzdłuż oraz normalnie do włókien, a także stycznymi, leżącymi w płaszczyźnie warstwy. Rozwiązanie pozwoliło sformułować warunki wyężdzenia włókien, osnowy oraz warstwy granicznej na podstawie znanych wartości wytrzymałości tych elementów struktury oraz naprężeń panujących w warstwie [1]. Do analizy przyjęto laminaty o strukturach $[\pm 30]$, $[\pm 45]$ oraz $[0/90]$.

PRACE DOŚWIADCZALNE

Dla wszystkich rozważanych laminatów przyjęto moduł Younga włókien szklanych $E_w = 7 \cdot 10^4$ MPa oraz współczynnik Poissona włókien $\nu_w = 0,23$. Podobnie dla osnowy: $E_o = 3 \cdot 10^3$ MPa i $\nu_o = 0,40$. Odształcenie maksymalne przy rozciąganiu włókien było równe $\varepsilon_{wr} = 2\%$ natomiast odształcenie, przy którym włókna niszczyły się w warstwach w wyniku ściskania: $\varepsilon_{wc} = 1,1\%$. Na podstawie przyjętych wartości elementów struktury oraz strukturalnego kryterium wyężdzenia¹ sporządzono wykresy krzywych granicznych. Własności elementów struktury tych laminatów podano w tabeli 1.

TABELA 1. Zestawienie wytrzymałości osnowy, warstwy granicznej oraz zawartości objętościowej włókien dla laminatów A, D i E

TABLE 1. Strength values of the matrix and the interface and the fibre volume content for laminates A, D, E

	Laminat A	Laminat D	Laminat E
R_{ro} , MPa	70	50	50
R_{to} , MPa	65	45	45
R_{rg_r} , MPa	80	80	60
R_{tg_r} , MPa	70	70	40
V_w	0,6	0,6	0,6

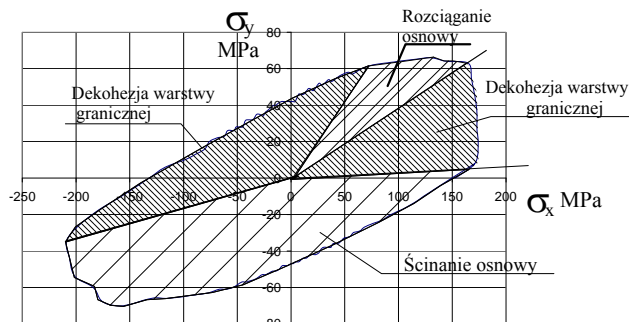
Oznaczenia:

R_{ro} , R_{to} - wytrzymałość osnowy na rozciąganie i ścinanie,

R_{rg_r} , R_{tg_r} - wytrzymałość warstwy granicznej na rozciąganie i ścinanie

Krzywe graniczne oraz przyczyny dekohezji laminatów $[\pm 30]$ A, D i E podano na rysunkach 1-3. Jak wyni-

ka z tych rysunków, przyczyny dekohezji w warstwach rozważanych laminatów są różne i zależą od drogi obciążania. Zależnie od drogi obciążania przyczyną jest dekohezja warstwy granicznej lub niszczenie osnowy w wyniku rozciągania albo ścinania. Te przyczyny występują przy różnych drogach obciążenia zależnie od wytrzymałości elementów struktury.



Rys. 1. Krzywa graniczna otrzymana wg kryterium strukturalnego dla laminatu $[\pm 30]$ A. Zaznaczono również obszary o różnych przyczynach dekohezji

Fig. 1. Limit curve produced by the structural criterion for the $[\pm 30]$ A laminate. Shaded areas represent different types of failure

Jak wynika z wykresu podanego na rysunku 1, dla dróg obciążania zawartych w przedziale $2 \div 21^\circ$ przyczyną zniszczenia laminatu jest dekohezja warstwy granicznej. W przedziale $21 \div 45^\circ$ niszczy się osnowa w wyniku rozciągania. Dla dróg obciążania zawartych w przedziale $45 \div 197^\circ$ ponownie laminat osiąga stan krytyczny w wyniku wyężdzenia warstwy granicznej. Dla dróg obciążania zawartych w przedziale $197 \div 2^\circ$ krytyczne staje się ścinanie osnowy.

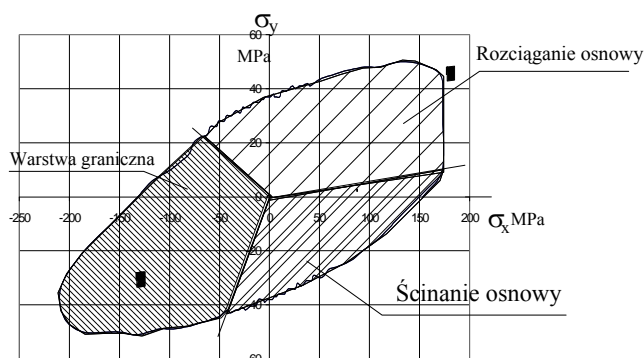
Laminat $[\pm 30]$ D (rys. 2) charakteryzuje się osłabioną osnową w porównaniu z laminatem $[\pm 30]$ A. Laminat ten wykazał większy przedział dróg obciążania, przy których jego dekohezja następowała w wyniku rozciągania osnowy ($3 \div 163^\circ$). Uległ natomiast zwiężeniu przedział dróg obciążania, w którym niszczy się osnowa w wyniku ścinania ($225 \div 0^\circ$). Sumarycznie przedział dróg obciążania, w którym następowała dekohezja osnowy w wyniku rozciągania i ścinania w przypadku laminatu D wskutek obniżenia wytrzymałości osnowy, wzrósł do 295° , podczas gdy dla laminatu $[\pm 30]$ A był równy 190° .

Analizując zmiany spowodowane obniżeniem wytrzymałości warstwy granicznej, jak to ma miejsce w laminacie $[\pm 30]$ E, rozpatrzmy wykres podany na rysunku 3 i porównajmy go z wykresem pokazanym na rysunku 2.

Należy stwierdzić, że obniżenie wytrzymałości warstwy granicznej ogólnie obniżyło naprężenia stanu krytycznego, szczególnie dla dróg obciążenia bliskich kierunkowi 0° . Nastąpiło również rozszerzenie przedziału dróg obciążania, w którym następuje dekohezja

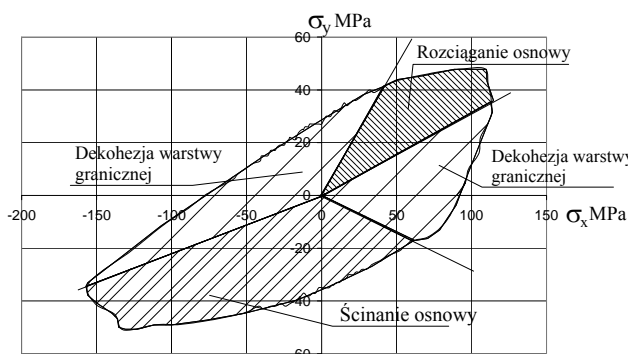
¹ Obliczenia wykonano na podstawie algorytmu podanego w [2].

kompozytu w wyniku wyężenia warstwy granicznej. Są tu dwa przedziały, w których następuje wyężenie warstwy granicznej ($106 \div 17^\circ$) oraz ($45 \div 193^\circ$). Tak więc w wyniku osłabienia warstwy granicznej sumaryczny przedział dekohezji laminatu w wyniku wyężenia warstwy granicznej wynosi około 270° . Należy zauważyć, że w przypadku laminatu $[\pm 30] D$ przedział ten był równy około 65° . Również nastąpiła zmiana przedziału dróg obciążania, w którym uległa wyężeniu osnowa. Laminat $[\pm 30] E$ ulegał dekohezji w wyniku wyężenia osnowy w przedziale 88° , natomiast laminat $[\pm 30] D$ w przedziale 295° .



Rys. 2. Krzywa graniczna otrzymana wg kryterium strukturalnego dla laminatu $[\pm 30] D$. Zaznaczono również obszary o różnych przyczynach dekohezji

Fig. 2. Limit curve produced by the structural criterion for the $[\pm 30] D$ laminate. Shaded areas represent different types of failure



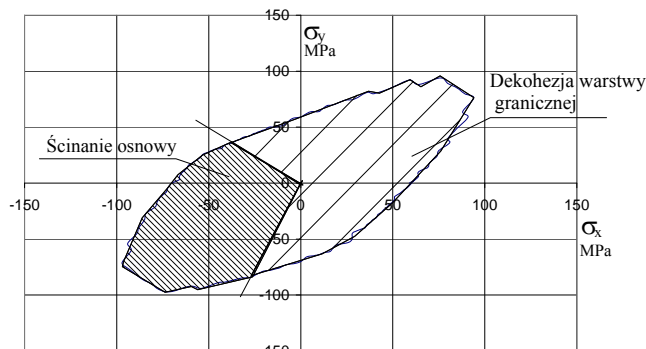
Rys. 3. Krzywa graniczna otrzymana wg kryterium strukturalnego dla laminatu $[\pm 30] E$. Zaznaczono również obszary o różnych przyczynach dekohezji

Fig. 3. Limit curve produced by the structural criterion for the $[\pm 30] E$ laminate. Shaded areas represent different types of failure

Jak wynika z poprzednich rozważań, laminat D wykazał większy obszar zniszczenia w wyniku rozciągania osnowy w porównaniu z laminatem A, którego osnowa miała większą wytrzymałość na rozciąganie i ścinanie. Z kolei zmniejszenie wytrzymałości warstwy granicznej zwiększyło przedział dróg obciążania, przy których następuje niszczenie tej warstwy w wyniku niszczenia warstwy granicznej i zmniejszenie przedzia-

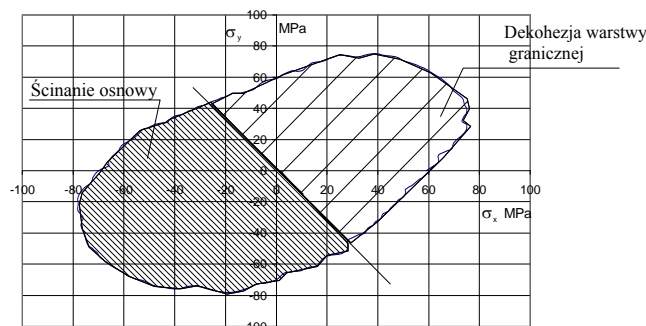
łu, w którym następuje niszczenie laminatu w wyniku rozciągania osnowy.

Laminat $[\pm 45]$. Z rysunku 4 wynika, że laminat $[\pm 45] A$ niszczy się w wyniku wyężenia warstwy granicznej w przedziale ($252 \div 135^\circ$). Pozostałe drogi obciążania powodują dekohezję laminatu w wyniku ścinania osnowy (przedział dróg obciążania $135 \div 252^\circ$). Obniżenie wytrzymałości osnowy ($[\pm 45] D$) spowodowało więc zwiększenie przedziału dróg obciążania, w którym następowało wyężenie osnowy w wyniku ścinania ($117 \div 180^\circ$).



Rys. 4. Krzywa graniczna otrzymana wg kryterium strukturalnego dla laminatu $[\pm 45] A$. Zaznaczono również obszary o różnych przyczynach dekohezji

Fig. 4. Limit curve produced by the structural criterion for the $[\pm 45] A$ laminate. Shaded areas represent different types of failure



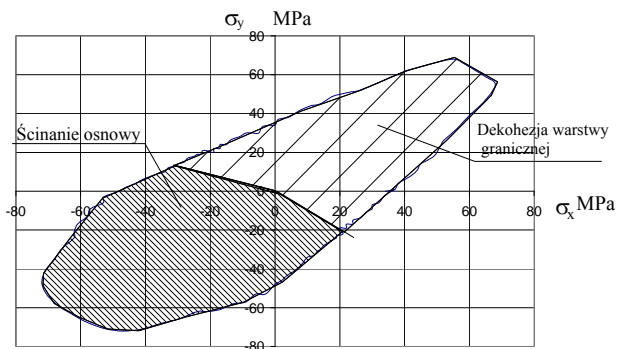
Rys. 5. Krzywa graniczna otrzymana wg kryterium strukturalnego dla laminatu $[\pm 45] D$. Zaznaczono również obszary o różnych przyczynach dekohezji

Fig. 5. Limit curve produced by the structural criterion for the $[\pm 45] D$ laminate. Shaded areas represent different types of failure

Obniżenie wytrzymałości warstwy granicznej ($[\pm 45] E$) zwiększyło przedział, w którym nastąpiło jej wyężenie do 211° oraz zmniejszenie przedziału dekohezji laminatu w wyniku ścinania osnowy do 150° .

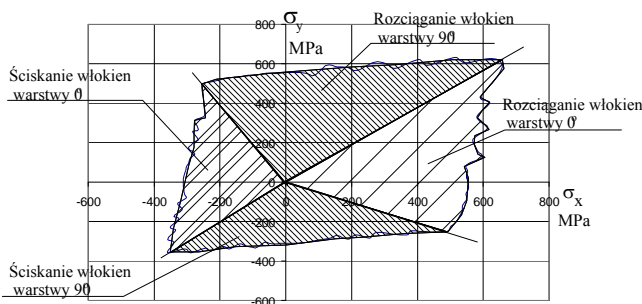
Porównując wyniki analizy przeprowadzonej dla laminatów $[\pm 45]$ i o takich parametrach struktury, jak laminaty $[\pm 30]$, stwierdzimy, że niszczą się one jedynie w wyniku dwóch przyczyn. Przyczynami tymi są dekohezja warstwy granicznej oraz ścinanie osnowy. Nie występuje tu przyczyna, która miała miejsce w laminatach $[\pm 30]$, a mianowicie niszczenie osnowy w wyniku

rozciągania (rys. rys. 1-3). Drogi obciążania, przy których niszczy się warstwa graniczna, zależą tu również od wytrzymałości osnowy i warstwy granicznej.



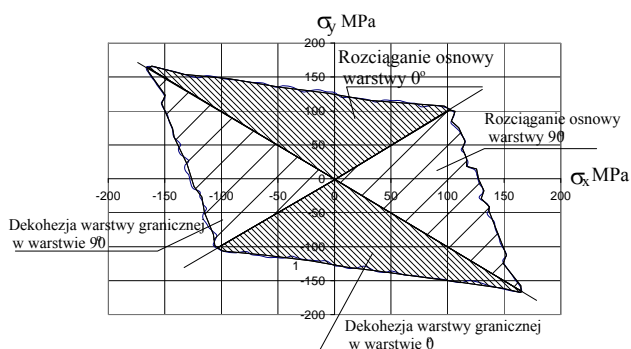
Rys. 6. Krzywa graniczna otrzymana wg kryterium strukturalnego dla laminatu $[\pm 45]$ E. Zaznaczono również obszary o różnych przyczynach dekohezji

Fig. 6. Limit curve produced by the structural criterion for the $[\pm 45]$ E laminate. Shaded areas represent different types of failure



Rys. 7. Krzywa graniczna otrzymana wg kryterium strukturalnego dla laminatu $[0/90]$ przy dekohezji włókien. Zaznaczono również obszary różnych przyczyn dekohezji włókien

Fig. 7. Limit curve produced by the structural criterion for the $[0/90]$ laminate fibre fracture involved. Shaded areas represent different types of failure



Rys. 8. Krzywa graniczna laminatu $[0/90]$ A z podanymi przyczynami dekohezji warstw dla różnych dróg obciążania

Fig. 8. Limit curve for the $[0/90]$ A laminate. Shaded areas represent different types of interface failure for various loading paths

Laminat $[0/90]$. W przypadku laminatu $[0/90]$ dekohezja występuje w różnych warstwach, a jej przyczy-

nami są jedynie rozciąganie osnowy i dekohezja warstwy granicznej. Procesy te przebiegają w warstwach przy różnych kierunkach dróg obciążania (rys. 8).

Na rysunku 7 podano krzywą graniczną dla laminatu $[0/90]$, gdy dekohezja zachodzi jedynie w wyniku rozciągania lub ściskania włókien dla każdej warstwy przy innych kierunkach dróg obciążania.

WNIOSKI

1. Korzystając z kryterium strukturalnego, można dokonać analizy przyczyn dekohezji laminatów warstwowych wzmocnionych krzyżowo. Jest to istotne przy optymalizacji własności wytrzymałościowych elementów struktury.
2. Na podstawie kryterium strukturalnego możliwa jest ocena zmian obszarów dekohezji ograniczonych krzywą graniczną, spowodowanych zmianami własności wytrzymałościowych elementów struktury.
3. Przyczyna dekohezji zależy od struktury laminatu, wytrzymałości włókien, osnowy oraz warstwy granicznej.
4. Jak wynika z zastosowanego modelu, laminaty o strukturze $[\pm 30]$ zależnie od drogi obciążania ulegają dekohezji w wyniku rozciągania lub ścinania osnowy albo dekohezji warstwy granicznej.
5. Laminaty $[\pm 45]$ ulegają dekohezji jedynie w wyniku ścinania osnowy lub wyteżenia warstwy granicznej.
6. Zmiana wytrzymałości elementów struktury powoduje zmianę obszarów dróg obciążania, przy których elementy te ulegają dekohezji.

LITERATURA

- [1] Skudra A.M., Bulaws F.J., Proczność' armowanych plastikow, Chimija, Moskwa 1982.
- [2] Dąbrowski H., Wytrzymałość polimerowych kompozytów włóknistych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002.

Recenzent
Andrzej P. Wilczyński