

Mateusz Koziol¹, Izabella Hyla²

Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, Katedra Technologii Stopów Metali i Kompozytów
ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice

BADANIE PRZEBIEGU ZNISZCZENIA ZSZYWANYCH KOMPOZYTÓW POLIMER-WŁÓKNO SZKLANE PRZY ZGINANIU ZA POMOCĄ REJESTRACJI SYGNAŁU EMISJI AKUSTYCZNEJ

Prezentowane wyniki badań zginania statycznego próbek z laminatu żywica poliestrowa-włókno szklane: klasycznych oraz posiadających zbrojenie przeszyte nicią poliaramidową (Kevlar 50) oraz odpowiadające im wyniki rejestracji sygnału emisji akustycznej (rys. rys. 2-4). Stwierdzono wyraźne różnice w zarejestrowanych wykresach sygnału akustycznego dla laminatów zszywanych i niezszywanych. Próbki niezszywane wykazały znacznie większą liczbę zdarzeń akustycznych przypadających na jednostkę czasu (czas próbkowania) w porównaniu z próbkami zszywanych. Zachowanie takie można tłumaczyć faktem hamowania rozwoju pęknięć delaminacyjnych przez szwy w próbkach o zszytym zbrojeniu (mostkowanie). Rozrost pęknięcia delaminacyjnego wzdłuż kierunku zginania ma charakter krokowy (pęknięcie powiększa się stopniowo w miarę przyrostu ugięcia). Brak możliwości swobodnego postępowania pęknięć wzdłuż kierunku zginania wiąże się ze zmniejszeniem liczby zdarzeń akustycznych podczas zginania materiału, które można zarejestrować.

Dla potwierdzenia przewidywań związanych z różnicą w wielkości delaminacji dla materiałów zszywanych i niezszywanych przeprowadzono badania krótkotrwałej nasiąkliwości. Przyrosty masy próbek zszywanych po 40 min zanurzenia w wodzie okazały się być wyraźnie mniejsze w porównaniu do przyrostów masy próbek niezszywanych (rys. 5). Potwierdza to obecność istotnie większych pęknięć delaminacyjnych w próbkach niezszywanych, gdyż to one są zapewne obszarami wnikania wody po krótkotrwałym zanurzeniu. Różnica w wielkości delaminacji po przekroczeniu przez badane materiały zszywane i niezszywane maksymalnych naprężeń została zaobserwowana za pomocą mikroskopu świetlnego (rys. rys. 6 i 7).

Przeprowadzone badania świadczą o tym, że rejestracja sygnału emisji akustycznej może być bardzo pomocna w analizie wpływu zszywania zbrojenia laminatów na ich przebieg zniszczenia.

Słowa kluczowe: laminaty zszywane, emisja akustyczna, odporność delaminacyjna

INVESTIGATION OF FAILURE PROGRESS OF STITCHED POLYMER-GLASS FIBER COMPOSITES BY BENDING USING REGISTRATION OF ACOUSTIC EMISSION SIGNAL

Article presents results of static bending tests of polyester resin-glass fiber laminates specimens: classic and of reinforcing layers stitched with polyaramide thread (Kevlar 50), and recorded simultaneously acoustic emission signal (Figs 2-4). There have occurred clear difference in recorded diagrams for stitched and unstitched laminates. Unstitched specimens have shown much higher amount of acoustic events occurring over period of time in comparison to stitched specimens. These differences can be explained with restricting development of the delamination cracks by stitches in stitched specimens (bridging). Growth of delamination cracks develops gradually with growth of deflection. Restricting simple development of the delamination cracks causes decrease in number of acoustic events recordable during conducted bending test.

In order to confirm the predictions related to difference of average delamination crack length of stitched and unstitched specimens, there have been conducted short duration absorbability tests. After 40 minutes long immersion, increase in specimens weight of stitched materials occurred distinctly lesser than those of unstitched (Fig. 5). It confirms the presence of larger delamination cracks in unstitched laminates, because they are undoubtedly the regions penetrated by water during the short duration tests. Difference between stitched and unstitched laminates in average delamination crack length has been observed on a light microscope (Figs 6, 7).

Conducted investigations have shown that the registration of acoustic emission signal may be very helpful by analyze of affect of stitching on failure progress of polymer - glass fiber laminates.

Key words: stitched laminates, acoustic emission, delamination toughness

WSTĘP

Polimerowe kompozyty włókniste o strukturze warstwowej (laminaty) oferują bardzo dobre właściwości mechaniczne w połączeniu z niską masą właściwą, dlatego też są one obecnie bardzo szeroko stosowane m.in. w przemyśle lotniczym, okrętowym i w energetyce

(elektrownie wiatrowe). Jednym z głównych problemów związanych z laminatami o zbrojeniu włóknistym są ich relatywnie niskie właściwości mechaniczne w kierunku translaminarnym, determinowane głównie przez stosunkowo niewielką wytrzymałość polimerowej

¹ mgr inż., ² prof. dr hab. inż.

osnowy. Skutkiem niskiej wytrzymałości w obszarach między warstwami jest łatwy wzrost mikroszczelin pomiędzy warstwami włókien pod wpływem obciążenia. Obecność pęknięcia delaminacyjnego powoduje obniżenie nośności laminatu [1].

Jednym z rozwiązań proponowanych dotychczas w celu podniesienia wytrzymałości międzywarstwowej laminatów jest wprowadzenie umocnienia w kierunku translaminarnym poprzez zszywanie tkanin zbrojących nicią o dużej wytrzymałości i sztywności. Podnosi to odporność delaminacyjną laminatu poprzez utrudnienie propagacji pęknięcia delaminacyjnego między warstwami włókien (mostkowanie pęknięcia). Skutkiem podwyższonej odporności delaminacyjnej są też lepsze rezidualne właściwości mechaniczne laminatów o zszytym zbrojeniu, po poddaniu ich działaniu obciążenia, w porównaniu z laminatami o zbrojeniu niezszytym [2, 3].

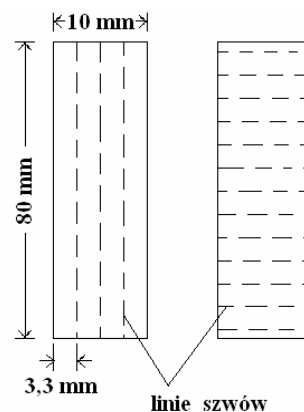
Jakkolwiek zszywanie poprawia właściwości mechaniczne w kierunku translaminarnym, to jednak pogarsza właściwości mechaniczne w kierunkach płaszczyzny ułożenia włókien zbrojących laminatu. Podczas procesu zszywania igła i nić penetrują strukturę tkanin zbrojących, co powoduje przerywanie włókien oraz zakłócanie porządku ich ułożenia w okolicach punktów przeszycia. Ponadto w obszarach otaczających szwy formują się obszary bogate w żywicę, a same szwy stają się koncentratorami naprężeń. Stwierdzono, że uszkodzenia spowodowane zszywaniem przyczyniają się do pogorszenia właściwości wytrzymałościowych podczas rozciągania i ściskania w kierunkach płaszczyzny ułożenia warstw zbrojenia laminatu [4-6].

Zmiany mechanizmu zniszczenia laminatu spowodowane zszywaniem jego warstw zbrojących wiążą się głównie z przenoszeniem obciążeń translaminarnych, które w klasycznym laminacie spowodowałyby wzrost szczelin delaminacyjnych przez nici o wysokiej wytrzymałości. Następuje więc w laminatach zszywanych ograniczenie rozwoju delaminacji podczas odkształcania. Tego typu zachowania wymagają głębszej analizy, gdyż ich dokładne poznanie może mieć fundamentalne znaczenie dla stosowania zszywania jako sposobu podnoszenia odporności delaminacyjnej kompozytów warstwowych.

BADANE MATERIAŁY

Próbnom zginania statycznego poddano próbki laminatów 8- oraz 10-warstwowych zbrojonych tkaniną szklaną o splocie płóciennym i gramaturze 260 g/m^2 , z ułożeniem warstw zbrojących w kierunku $0/90^\circ$. Przed nasyceniem zbrojenia osnową przykroje (arkusze) tkaniny zbrojącej zostały zszyte nicią poliaramidową typu Kevlar 50, z gęstością szycia ok. 11 szwów/cm^2 (długość ściegu $2,7 \text{ mm}$, odległość między liniami szwów $3,3 \text{ mm}$). Po obciążeniu krawędzi uzyskano zszyte

preformy o wymiarach $250 \times 300 \text{ mm}$. Nasycanie preform prowadzono metodą kontaktową z użyciem żywicy poliestrowej Polimal 103 utwardzanej układem Metox 50 + naftenian kobaltu. Utwardzanie prowadzono w temperaturze pokojowej przez 24 godziny, a następnie płyty laminatu dotwardzano w temperaturze 75°C przez 6 godzin. Próbki wycinano z płyt mechanicznie, równoległe oraz prostopadłe do kierunku zszywania. Wymiary próbek i schemat przebiegu szwów pokazuje rysunek 1.



Rys. 1. Próbki do prób zginania

Fig. 1. Specimens for bending tests

PROCEDURA BADAWCZA

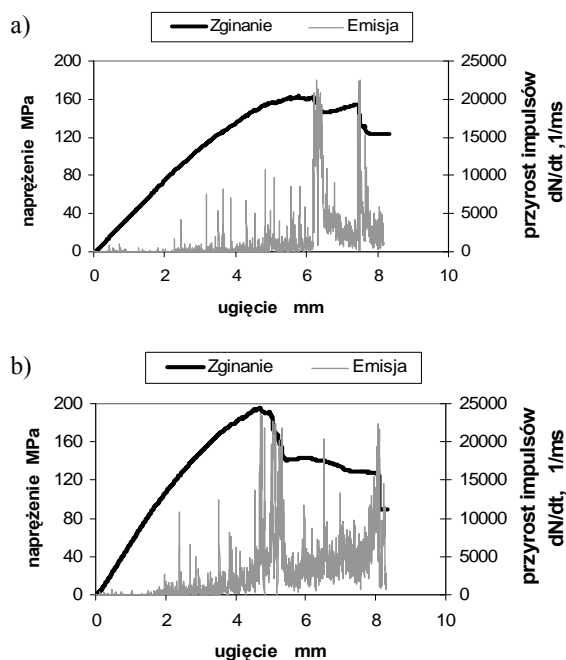
Próby zginania statycznego prowadzono zgodnie z normą PN-79/C-89027 na maszynie wytrzymałościowej INSTRON 4469, przy prędkości odkształcania $v = 10 \text{ mm/min}$ i przy rozstawie podpór $l = 60 \text{ mm}$.

Metodą, którą wykorzystano do zbadania przebiegu zniszczenia badanych laminatów podczas statycznych prób zginania, była rejestracja sygnału emisji akustycznej. Rejestrację sygnału emisji akustycznej podczas prób zginania statycznego realizowano za pomocą urządzenia Techpan DEMA-10 produkcji polskiej sprzężonego z komputerem za pomocą karty - przetwornika analogowo-cyfrowego AMBEX. Obróbkę danych przeprowadzono na komputerze przy użyciu specjalistycznego programu MULT. Krok czasowy (przedział czasu próbkiowania) ustalono na poziomie 50 ms . Ostatecznym wynikiem pomiarów jest wykres przyrostu impulsów (zdarzeń akustycznych) na jednostkę czasu dN/dt , skorelowanego z odpowiednią wielkością ugięcia.

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

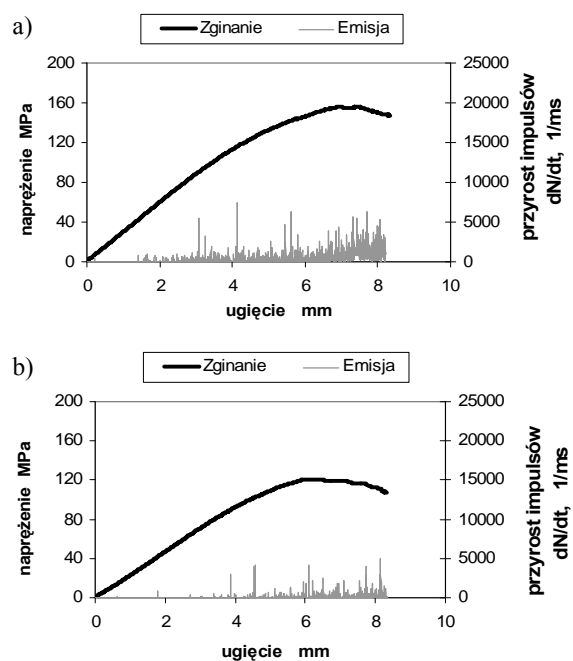
Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że próbki laminatów o zszywanym zbrojeniu wykazały, w porównaniu z klasycznymi materiałami, znacznie mniejsze wartości liczby impulsów akustycznych, praktycznie w całym zakresie procesu zginania (rys. rys. 2-4). Wartości te są dla próbek zszywanych mniejsze o $50\div 85\%$. Świadczy to o mniejszej ilości zdarzeń zwią-

zanych z destrukcją materiału podczas zginania. Fakt ten jest zapewne związany z hamowaniem wzrostu delaminacyjnych pęknięć przez szwy w materiałach o zszywanym zbrojeniu. Pierwsze obserwowalne sygnały akustyczne pojawiają się w zginanym laminacie już przy bardzo niewielkich wartościach ugięcia, a ich rozwój przebiega stopniowo, praktycznie aż do punktu zniszczenia. Ograniczenie rozprzestrzeniania się delaminacji w laminatach o zszywanym zbrojeniu objawia się mniejszymi wartościami liczby zliczeń emisji akustycznej w całym zakresie. Impulsy zarejestrowane w początkowych okresach próbkowania (dla małych wartości ugięcia) pochodzą prawdopodobnie od nowo powstających pęknięć delaminacyjnych, które mogą rozprzestrzeniać się tylko w pewnym obszarze ograniczonym przez szwy. Przy większych ugięciach dochodzą impulsy pochodzące od pęknięć włókien. Procesy te nasilają się w miarę przyrostu ugięcia, co przejawia się wzrostem liczby impulsów emisji rejestrowanych w jednostce czasu (odpowiadającej jednostce ugięcia), zarówno w przypadku laminatów o zszywanym zbrojeniu, jak i klasycznych. Dla laminatów o zszywanym zbrojeniu stwierdzono po próbach zginania bardzo niewielki obszar delaminacji, ograniczony do 2÷3 „komórek” wyznaczonych przez szwy - powierzchnia delaminacji w przypadku klasycznych laminatów była ok. 2÷4 razy większa. Mniejsza liczba zliczeń emisji akustycznej w próbkach laminatów o zszywanym zbrojeniu zdaje się potwierdzać ograniczenie delaminacji w tych materiałach.



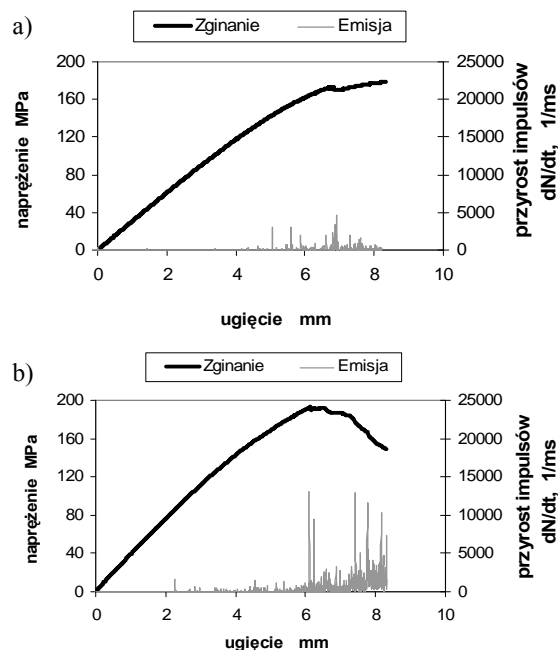
Rys. 2. Krzywe zginania próbek niezszywanych oraz odpowiadające im krzywe dN/dt : a) laminat 8-warstwowy, b) laminat 10-warstwowy

Fig. 2. Curves of bending of unstitched specimens and related to them graphs of dN/dt : a) 8 layers laminate, b) 10 layers laminate



Rys. 3. Krzywe zginania próbek zginanych poprzecznie do kierunku przebiegu szwów oraz odpowiadające im krzywe dN/dt : a) laminat 8-warstwowy, b) laminat 10-warstwowy

Fig. 3. Curves of bending of specimens bend perpendicularly to stitching direction and related to them graphs of dN/dt : a) 8 layers laminate, b) 10 layers laminate

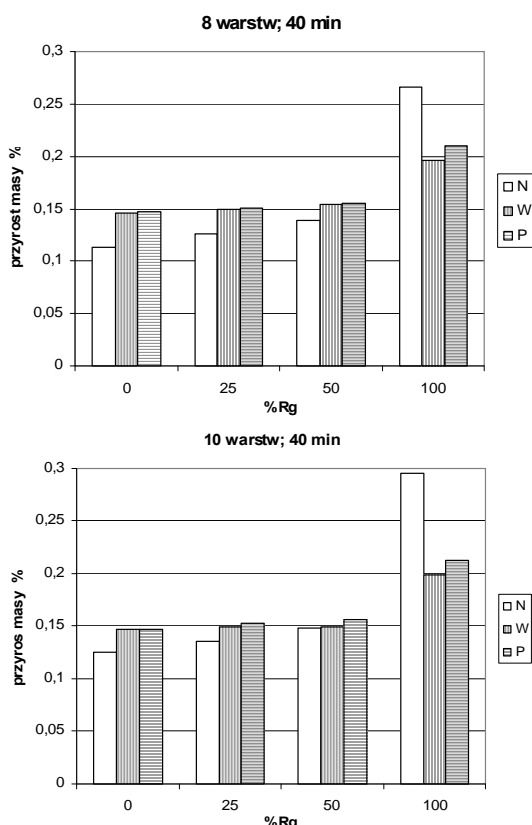


Rys. 4. Krzywe zginania próbek zginanych równoległe do kierunku przebiegu szwów oraz odpowiadające im krzywe dN/dt : a) laminat 8-warstwowy, b) laminat 10-warstwowy

Fig. 4. Curves of bending of specimens bend parallel to stitching direction and related to them graphs of dN/dt : a) 8 layers laminate, b) 10 layers laminate

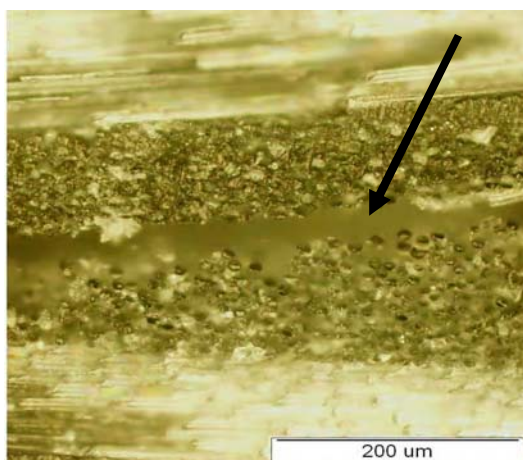
Występowanie większych obszarów delaminacji w laminatach niezszywanych potwierdzają dodatkowo krótkotrwałe badania nasiąkliwości próbek zginanych do różnych poziomów napężenia (rys. 5). W przypadku

materiału zginanego do maksymalnej wartości naprężenia przyrost masy próbek zszywanych jest wyraźnie mniejszy od przyrostu masy podobnych próbek laminatu niezszywanego. Świadczy to o występowaniu w niezszywanych próbkach większego obszaru delaminacji, który to obszar jest szczególnie szybko penetrowany przez wodę przy zanurzeniu.



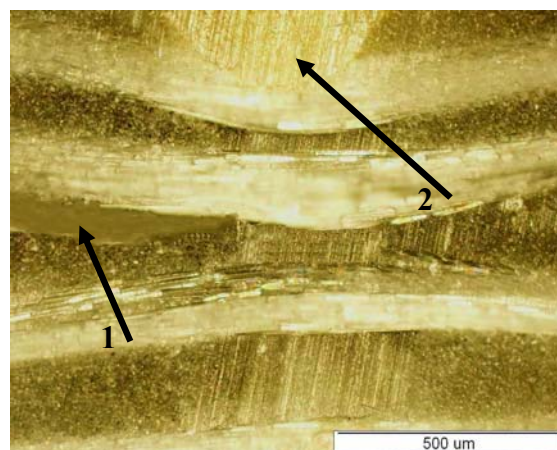
Rys. 5. Nasiąkliwość próbek laminatów po zadziaaniu obciążania zginającego (% Rg). N - laminat niezszywany, W - laminat zginany wzdłuż kierunku szwów, P - laminat zginany poprzecznie do kierunku szwów

Fig. 5. Water absorbability of laminate specimens after bending (% Rg). N - unstitched laminate, W - laminate bend parallel to stitching direction, P - laminate stitched perpendicularly to stitching direction



Rys. 6. Przykładowe zdjęcie mikroskopowe pęknięcia delaminacyjnego. Laminat niezszywany

Fig. 6. Representative light microscope photograph of delamination crack. Unstitched laminate



Rys. 7. Przykładowe zdjęcie mikroskopowe pęknięcia delaminacyjnego zatrzymanego na szwie. Laminat zszywany; 1 - pęknięcie delaminacyjne, 2 - linia szwu

Fig. 7. Representative light microscope photograph of delamination crack stopped at the stitch. Stitched laminate; 1 - delamination crack, 2 - stitch line

Obserwacje za pomocą mikroskopu świetlnego prowadzone przy różnych powiększeniach jednoznacznie wykazują obecność szczelin między warstwami zbrojenia laminatów (rys. rys. 6 i 7), przy czym w laminatach klasycznych szczeliny te osiągają wyraźnie większe długości i są znacznie szersze w porównaniu ze szczelinami w próbkach o zbrojeniu zszywanym. W próbkach zszywanych większość szczelin delaminacyjnych kończy się w okolicach przebiegu linii szwów przechodzących przez strukturę (rys. 7).

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wyniki przeprowadzonych eksperymentów pozwoliły na podanie następujących wniosków:

1. Zszywanie warstw zbrojących badanych laminatów nicią o dużej wytrzymałości spowodowało istotne podwyższenie ich odporności delaminacyjnej. Wynika ono z zatrzymywania pęknięć delaminacyjnych na szwach. W ten sposób następuje zmniejszenie całkowitej powierzchni pęknięć delaminacyjnych przy zginaniu, nawet po przekroczeniu granicy wytrzymałości.
2. Ocena przebiegu zniszczenia laminatów za pomocą rejestracji sygnału emisji akustycznej wskazuje na istotne różnice w kinetyce rozwoju pęknięć delaminacyjnych materiałów klasycznych oraz materiałów o zbrojeniu zszywanym (rys. rys. 2-4). Różnice te są spowodowane utrudnieniem rozwoju pęknięć delaminacyjnych przez nici przesywujące strukturę.
3. Dokładniejsza ocena różnic w przebiegu zniszczenia laminatów o zszywanym zbrojeniu w stosunku do laminatów klasycznych wymaga prowadzenia dalszych badań związanych z opisem mechanizmów hamowania pęknięć delaminacyjnych.

LITERATURA

- [1] Jain L.K., Mai Y.-W., Recent work on stitching of laminated composites - theoretical analysis and experiments, Proceedings of ICCM - 11, Gold Coast, Australia 1997.
- [2] Mouritz A.P., Composites Part A 1996, 525-530.
- [3] Mouritz A.P., Comp. Sci. Tech. 1995, 55, 365-374.
- [4] Koziół M., Hyla I., Rutecka M., XII Seminarium Naukowe Nowe Technologie i Materiały w Metalurgii i Inżynierii Materiałowej, Katowice 2004, 173-178.
- [5] Koziół M., VI Międzynarodowa Studencka Sesja Naukowa Materiały i Technologie XXI Wieku, Katowice 2004, 79-84.
- [6] Koziół M., Hyla I., XXXII Szkoła Inżynierii Materiałowej, Kraków-Krynica 2004, 476-481.
- [7] PN-79/C-89027.

Recenzent
Danuta Żuchowska