

MATEUSZ KOZIOL, JÓZEF ŚLEZIONA

Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii
Katedra Technologii Stopów Metali i Kompozytów
40-019 Katowice, ul. Krasińskiego 8
e-mail: Mateusz.Koziol@polsl.pl

Przebieg zniszczenia przy statycznym zginaniu laminatów poliestrowo-szklanych o wzmocnieniu zszywanym^{*)}

Streszczenie — Zbadano przebieg zniszczenia w warunkach trójpunktowego zginania statycznego próbek laminatów żywica poliestrowa — tkanina szklana klasycznych (niezszywanych) oraz ze wzmocnieniem zszywanym. Przebieg zniszczenia rejestrowano fotograficznie oraz dokonywano zapisu sygnału emisji akustycznej. Stwierdzono, że zainicjowanie badanego procesu w laminatach zarówno zszywanych, jak i niezszywanych zachodzi na drodze delaminacji. W laminatach zszywanych jest ona przy tym wyraźnie ograniczona przez szwy, ponieważ siły wywołujące naprężenia styczne lub translaminarne są w tym przypadku przenoszone przez szwy na warstwy wzmocnienia. Laminat zszywany charakteryzuje mniej gwałtowny przebieg zniszczenia niż laminat klasyczny. W kompozycie niezszywanym w chwili osiągnięcia przez materiał maksimum naprężenia dominującym mechanizmem zniszczenia jest delaminacyjne pęknięcie osnowy, w laminacie zszywanym natomiast dominujące jest pęknięcie włókien. W tym ostatnim zaobserwowano znacznie większą niż w laminacie klasycznym liczbę elementarnych pęknięć obu składników, co jest prawdopodobnie efektem obecności większej ilości defektów struktury.

Słowa kluczowe: kompozyt, żywica poliestrowa, włókno szklane, laminat zszywany, zginanie statyczne, przebieg zniszczenia.

FAILURE PROGRESS OF STITCHED REINFORCED POLYESTER-GLASS LAMINATE AT STATIC BENDING

Summary — The course of failure of polyester-glass fabric laminates, classic (non-stitched) and stitched ones (Fig. 1, 2), has been studied at three-point static bending tests of the samples. The failure progress was recorded using photographic (Fig. 3—5) and acoustic emission (Fig. 6—9) methods. It was found that failure process initiation in stitched or non-stitched laminates run by delamination. Delamination in stitched laminates is clearly limited by stitches as the forces causing tangential or translaminar stresses are carried by the stitches to reinforcement layers in a laminate. So the stitched laminate shows milder failure progress than the classic one. At the moment of reaching the maximal stress a dominant failure mechanism in non-stitched composite is delaminating cracking of a matrix while in stitched laminate — cracking of reinforcing fibers. In the latter the higher number of elementary cracks of both components was observed than in classic one, what probably resulted from the higher number of structural defects.

Key words: composite, polyester resin, glass fiber, stitched laminate, static bending, failure progress.

OGRANICZANIE NA DRODZE ZSZYWANIA WARSTW WZMACNIAJĄCYCH PODATNOŚCI LAMINATÓW NA PĘKANIE DELAMINACYJNE

Jedną z najistotniejszych wad laminatów polimero-włóknistych stanowi podatność na pęknięcie delaminacyjne. Pęknięcia takie tworzą się w strukturze laminatów zazwyczaj w wyniku różnego rodzaju lokalnych obciążeń udarowych. Następuje wtedy kruche pęknięcie os-

nowy w obszarach między warstwami wzmocnienia a powstałe szczeliny rozprzestrzeniają się pod wpływem naprężeń roboczych występujących w laminacie, co prowadzi do zmniejszenia jego nośności, a czasem nawet do zniszczenia materiału [1—6]. Podatność na pęknięcie delaminacyjne ogranicza w wielu przypadkach możliwość stosowania laminatów. Znanych jest wiele rozwiązań mających na celu zapobieganie powstawaniu i rozprzestrzenianiu się pęknięć delaminacyjnych. Są to metody polegające bądź na polepszaniu właściwości osnowy i połączenia między składnikami kompozytu, bądź na modyfikacji struktury wzmocnienia (wytwarzanie laminatów o wzmocnieniu trójwymiarowym) [7, 8].

^{*)} Artykuł zawiera treść wystąpienia w ramach Konferencji Naukowej „Materiały Polimerowe POMERANIA-PLAST”, Kołobrzeg 23—25 maja 2007 r.

Najpowszechniejszym sposobem modyfikacji wzmocnienia włóknistego jest zszywanie jego warstw nicią o dużej sztywności i wytrzymałości. Zszywa się zazwyczaj nienasycone (przed zaimpregnowaniem żywicą) warstwy (powstawanie preform).

Istnieją również inne możliwości modyfikacji spoiny obydwu komponentów, np.: zszywanie warstw prepregów (preimpregnatów) [9] bądź też zszywanie selektywne, wzmacniające konstrukcję lub połączenia między elementami kompozytowymi [10, 11]. Laminaty zszywane znalazły zastosowanie przemysłowe do produkcji paneli skrzydeł samolotów [12—14], elementów niektórych statków marynarki wojennej — kutrów patrolowych lub małych jednostek podwodnych [15—19]. Zszywane preformy szklane można potencjalnie wykorzystywać m.in. w wentylatorach przemysłowych.

Działanie wzmacniające nici zszywającej tłumaczy się tym, że szwy spajające warstwy wzmocnienia w kierunku translaminarnym „mostkują” pęknięcia delaminacyjne zapobiegając tym samym ich rozprzestrzenianiu się [9]. W wyniku operacji zszywania pojawiają się jednak we wzmocnieniu laminatu uszkodzenia oraz zaburzenia struktury włókien, powodujące istotne pogorszenie cech nośnych w kierunkach roboczych. Ustalona doświadczalnie i opisana w literaturze przyczyną odmiennych właściwości mechanicznych laminatów zszywanych i klasycznych jest zróżnicowanie zainicjowania i przebiegu procesu zniszczenia [9, 17].

Celem naszej pracy była ocena różnic w przebiegu zniszczenia podczas prób statycznego zginania klasycznych (niezszywanych) oraz zszywanych laminatów poliestrowo-szklanych. Przebieg procesu rejestrowano zarówno fotograficznie, jak i na drodze zapisu sygnału emisji akustycznej.

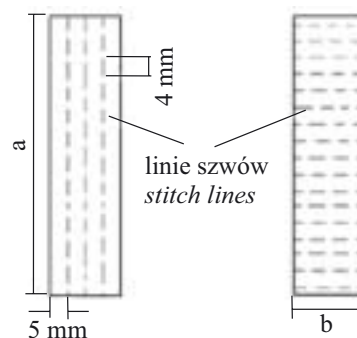
Badanie kompozytów włóknistych w statycznych próbach mechanicznych z jednoczesną rejestracją sygnału emisji akustycznej stanowi bardzo dobrą metodę oceny przebiegu ich zniszczenia. Przyjmuje się, że podstawowymi elementarnymi mechanizmami zniszczenia kompozytu włóknistego są: pęknięcie osnowy, pęknięcie włókien oraz zanik łączenia między tymi komponentami. Poznanie kolejności występowania tych zjawisk i ich natężenia w miarę postępu odkształcania kompozytu jest bardzo cenną informacją uzupełniającą charakterystykę materiału. Analiza sygnału emisji akustycznej, zarejestrowanego np. podczas próby zginania laminatu, pozwala na ocenę przebiegu zniszczenia w wyniku obserwacji odrębnych zdarzeń akustycznych pochodzących od poszczególnych etapów tego procesu. Podstawowe deskryptory (parametry opisujące) w analizie sygnału emisji akustycznej, takie jak energia lub częstotliwość generowanej fali akustycznej, zależą od modułu sprężystości ośrodka. Jeśli pękające składniki kompozytu traktujemy jako ośrodki generujące falę akustyczną wówczas rozdzielanie zdarzeń jest możliwe dzięki bardzo dużej różnicy modułów sprężystości obu kompozytów. Na przykład: żywica poliestrowa typu Estromal

charakteryzuje się modułem przy rozciąganiu na ogół równym 3 GPa, a włókno ze szkła typu E — modułem 72 GPa, różnica w tym przypadku jest więc ok. 24-krotna.

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Materiały

Do badań wykorzystano wykonane we własnym zakresie próbki laminatów dziesięciowarstwowych wzmocnionych tkaniną szklaną (włókno szklane ze szkła typu E) o splocie płóciennym i gramaturze 350 g/m², z ułożeniem warstw wzmocnienia w kierunku 0/90°. Przykroje tkaniny zostały spięte do postaci preform. Przed nasycaniem część preform zszyto nicią poliamidową typu Kevlar® 50, ścięciem długości 4 mm z odległością między liniami szwów 5 mm. Nasycanie



Rys. 1. Kształt i wymiary próbek do badań: z rejestracją fotograficzną: $a = 80$ mm, $b = 20$ mm; z rejestracją emisji akustycznej: $a = 160$ mm, $b = 40$ mm

Fig. 1. Shapes and dimensions of specimens tested with photographic record: $a = 80$ mm, $b = 20$ mm; with acoustic emission record: $a = 160$ mm, $b = 40$ mm

preform przeprowadzano metodą RTM (Resin Transfer Moulding, czyli metodą formowania z prasowaniem) przy użyciu żywicy poliestrowej Estromal 14 LM-01. Utwardzano płyty w temperaturze pokojowej w ciągu 24 h, a następnie dotwardzano w temp. 55 °C przez 6 h. Grubość laminatów wynosiła ok. 2,4 mm. Próbki do badań (rys.1) wycięto z płyt mechanicznie.

Metodyka badań

W celu określenia różnic w przebiegu zniszczenia laminatów zszywanych i klasycznych, przeprowadzono próby trójpunktowego zginania statycznego.

Próby zginania z fotograficzną rejestracją przebiegu

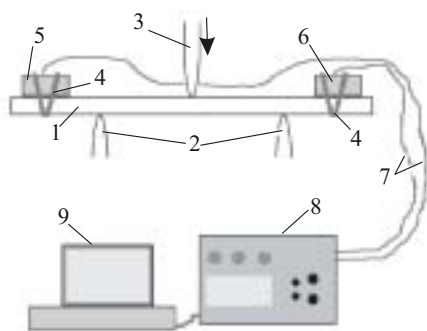
Próby zginania prowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 14125: 2001/AC:2003 przy użyciu maszyny wytrzymałościowej Instron 4469 z prędkością odkształcania $v = 10$ mm/min i z rozstawem podpór $l = 60$ mm.

Próbki badano przy zginaniu wzdłuż oraz poprzecznie do kierunku linii szwów. Przebieg zginania rejestrowano fotograficznie za pomocą aparatu fotograficznego (lustrzanka cyfrowa) typu Nikon. Zdjęcia w rozdzielczości ok. 12 mln pikseli wykonywano wykorzystując powtarzalny samowyzwalacz, z częstością ok. 5 zdjęć na sekundę. Czas wykonywania zdjęć był zsynchronizowany z czasem procesu zginania, co umożliwiło przyporządkowanie poszczególnych zdjęć odpowiednim punktom na krzywej zginania. Fotografie powiększono, przeanalizowano i wybrano te, na których wyraźnie widać postęp procesu zniszczenia charakterystyczny dla danego typu próbki, po czym przypisano właściwym punktom na krzywych zginania.

Próby zginania z rejestracją sygnału emisji akustycznej

Zginanie statyczne trójpunktowe prowadzono analogicznie jak poprzednio, zmieniając jednak rozstaw podpór do $l = 100$ mm. Próbki również w tym przypadku zginano wzdłuż i poprzecznie do kierunku linii szwów.

Podczas zginania rejestrowano sygnał emisji akustycznej w układzie pomiarowym schematycznie przedstawionym na rys. 2. Układ składał się z urządzenia Vallen AMS 3 oraz czujników Vallen VS45-H (zakres częstotliwości 20—450 kHz) i Vallen VS375-RIC (zakres częstotliwości 250—700 kHz) produkcji niemieckiej. Sterowanie rejestracją oraz końcowy zapis danych odbywały się przy użyciu przenośnego komputera przemysłowego typu IBM. Czujniki emisji akustycznej mocowano do próbek za pomocą ściągaczy gumowych. Powierzchnie styku czujników z próbka pokrywano smarem silikonowym, ułatwiającym przewodzenie fal akustycznych. Zastosowany czujnik Vallen AMS 3 cechuje się rozdzielczością czasową 1 ns oraz rozdzielczością rejestracji



Rys. 2. Ideowy schemat układu do rejestracji sygnału emisji akustycznej podczas próby zginania. 1 — próbka, 2 — podpory, 3 — trzpień obciążający, 4 — ściągacze gumowe, 5 — czujnik niższych częstotliwości, 6 — czujnik wyższych częstotliwości, 7 — przewody, 8 — urządzenie rejestrujące, 9 — komputer

Fig. 2. Schematic diagram of acoustic emission signal recording during bending test: 1 — specimen, 2 — support bars, 3 — loading bar, 4 — rubber pullers, 5 — low-frequency sensor, 6 — high-frequency sensor, 7 — conduits, 8 — recording unit, 9 — computer

energii rzędu 10^{-18} J. Deskryptorem rozdzielającym zdarzenia akustyczne pochodzące od pękającej osnowy kompozytu oraz od włókien wzmacniających była energia zdarzeń. Rozdzielenie sygnału pozwoliło na ocenę przebiegu zniszczenia poszczególnych składników układu i umożliwiło wychwycenie chwili maksymalnego natężenia ich pękania.

WYNIKI I ICH OMÓWIENIE

Rejestracja fotograficzna

Na fotografiach wykonanych podczas prób zginania (rys. 3—5) wyraźnie widać znaczne ograniczenie rozwoju pęknięć delaminacyjnych w laminatach zszywanych (rys. 4, 5). Pojawia się natomiast pęknięcie warstw w części rozciąganej w warunkach ugięcia, któremu w laminacie klasycznym nie towarzyszy pęknięcie, lecz delaminacja (por. rys. 3 i 5). Zainicjowanie zniszczenia w próbkach niezszywanych i zszywanych następuje w podobny sposób, jednak szwy znacznie blokują dalszą delaminację. Na krzywych zginania laminatów zszywanych można zauważyć łagodniejszy niż w laminatach klasycznych spadek obciążenia po przekroczeniu punktu maksimum. Takie zachowanie analogicznych materiałów referowaliśmy już w publikacjach [19, 20].

Wyniki badań wskazują, że nici zszywające przenoszą obciążenia translaminarne na warstwy tkaniny szklanej, co powoduje m.in. pęknięcie warstw wzmacniających w rozciąganej części przekroju (por. rys. 4).

Jak widać (por. rys. 4 i 5), ugięcie próbek zszywanych następuje w miejscach przebiegu szwów, co świadczy o szczególnej wrażliwości laminatu na zginanie w tych obszarach. Potwierdza to fakt, że istniejące w laminatach zszywanych linie (rowki) charakteryzują się zwiększoną podatnością na zginanie [21].

Zauważyliśmy także, że nici zszywające podczas próby zginania ulegały pęknięciu dopiero po znacznym przekroczeniu wartości ugięcia odpowiadającej maksymalnemu naprężeniu — efektywność wzmocnienia szwami (wyteżenie) nie jest zatem maksymalna. W próbkach zginanych prostopadłe do linii szwów (por. rys. 5) nie zauważono pęknięcia nici zszywających nawet w warunkach bardzo dużych ugięć. Następowo natomiast „wyciągnięcie” złamanych warstw włókien wzmacniających z pętli nici.

Rejestracja sygnału emisji akustycznej

Na wykresach ilustrujących zależność energii zdarzenia od częstotliwości w odniesieniu do niewzmacnianej osnowy poliestrowej (rys. 6 a) widać bardzo nieliczne punkty odpowiadające zdarzeniom akustycznym zarejestrowanym podczas statycznej próby zginania. Punkty te są skupione, praktycznie biorąc, w dwóch zakresach częstotliwości: 25—50 kHz oraz 110—135 kHz. W zbliżonych przedziałach częstotliwości (20—60 Hz



Rys. 3. Krzywa zginania oraz fotografie laminatu niezszywanego: 1 — w chwili zainicjowania zniszczenia, 2 — w zaawansowanym stadium zniszczenia; widoczne obszerne pęknięcia delaminacyjne w górnej części próbki (1) oraz jego rozrost (2)
 Fig. 3. Bending curve and the photos of non-stitched laminate: 1 — at the moment of failure initiation, 2 — at advanced failure stage. Vast delamination crack visible at upper part of specimen (1) and its development (2)



Rys. 4. Krzywa zginania oraz fotografie laminatu zszywanego, kierunek zginania równoległy do ułożenia szwów: 1 — w chwili zainicjowania zniszczenia, 2 — w zaawansowanym stadium zniszczenia; widoczne niewielkie pęknięcia delaminacyjne w górnej części próbki (1) oraz zerwanie warstw wzmacniających w dolnej części (2)
 Fig. 4. Bending curve and the photos of stitched laminate; bending direction parallel to the stitches; 1 — at the moment of failure initiation, 2 — at advanced failure stage. Small delamination crack visible at upper part of specimen (1) and a break of reinforcing layers at lower part (2)



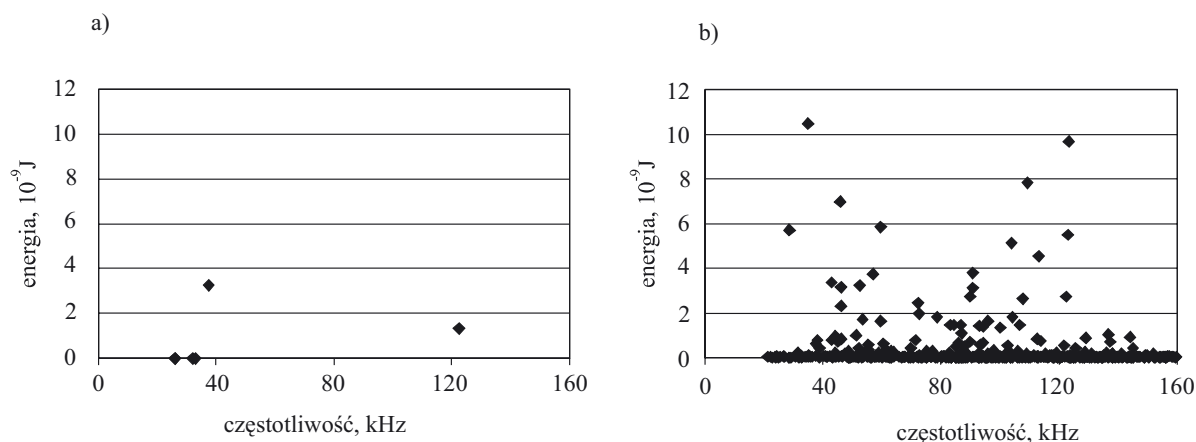
Rys. 5. Krzywa zginania oraz fotografie laminatu zszywanego, kierunek zginania prostopadły do ułożenia szwów: 1 — w chwili inicjacji zniszczenia, 2 — w zaawansowanym stadium zniszczenia; widoczne niewielkie pęknięcia delaminacyjne w górnej części próbki (1) i jego rozwój (2)
 Fig. 5. Bending curve and the photos of stitched laminate; bending direction perpendicular to stitches; 1 — at the moment of failure initiation, 2 — at advanced failure stage. Small delamination crack visible at upper part of specimen (1) and its development (2)

i 100—145 Hz) zarejestrowaliśmy zdarzenia akustyczne towarzyszące zginaniu laminatów (rys. 6 b).

Na podstawie wyników zobrazowanych omawianym rysunkiem nie udaje się więc jednoznacznie wyznaczyć różnicy częstotliwości zdarzeń pęknięcia osnowy i wzmocnienia. W zaistniałym przypadku pokrywania

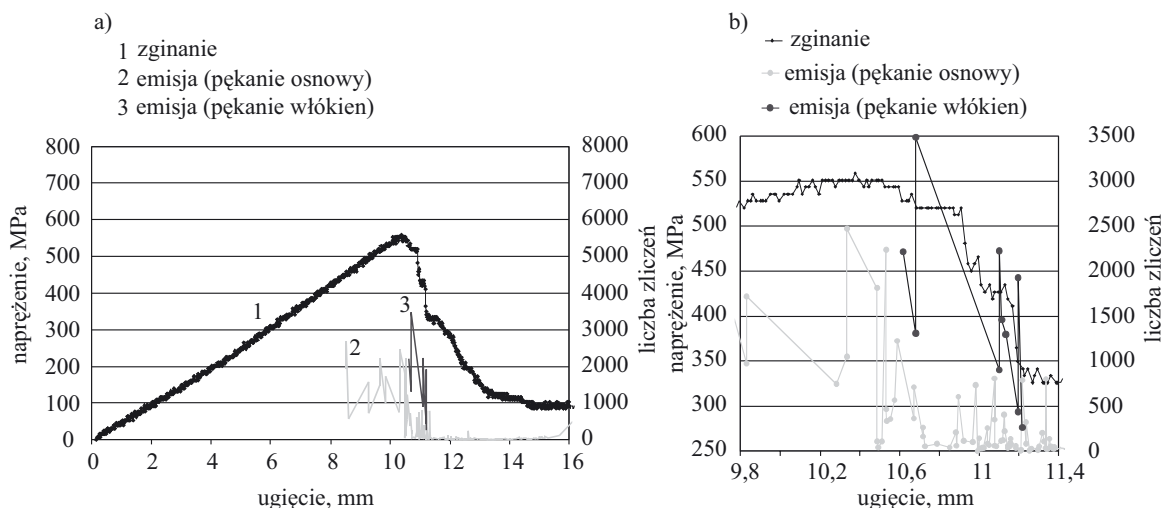
się przedziałów częstotliwości zdarzeń związanych z niszczeniem obydwu komponentów, przyjęcie częstotliwości zdarzeń jako deskryptora oceny przebiegu ich pęknięcia, nie jest zatem możliwe.

Za taki deskryptor przyjęliśmy wartości energii zdarzeń. Na zilustrowanych na rys. 6 a) i b) zależność



Rys. 6. Wykres zależności energii zdarzenia od częstotliwości zarejestrowanego sygnału emisji akustycznej podczas statycznej próby zginania: a — niewzmocniona osnowa kompozytu, b — kompozyt

Fig. 6. Dependence of energy on frequency of recorded acoustic emission signal during static bending test: a — not reinforced composite matrix, b — composite



Rys. 7. Krzywa zginania kompozytu niezszywanego z odpowiadającym jej zarejestrowanym sygnałem emisji akustycznej: a) cały przebieg, b) wycinek krzywej z sygnałem emisji w okolicy punktu odpowiadającego maksimum naprężenia

Fig. 7. Bending curve of non-stitched composite and corresponding acoustic emission signal recorded: a — whole course, b — curve sector, with emission signal, near maximal bending stress point

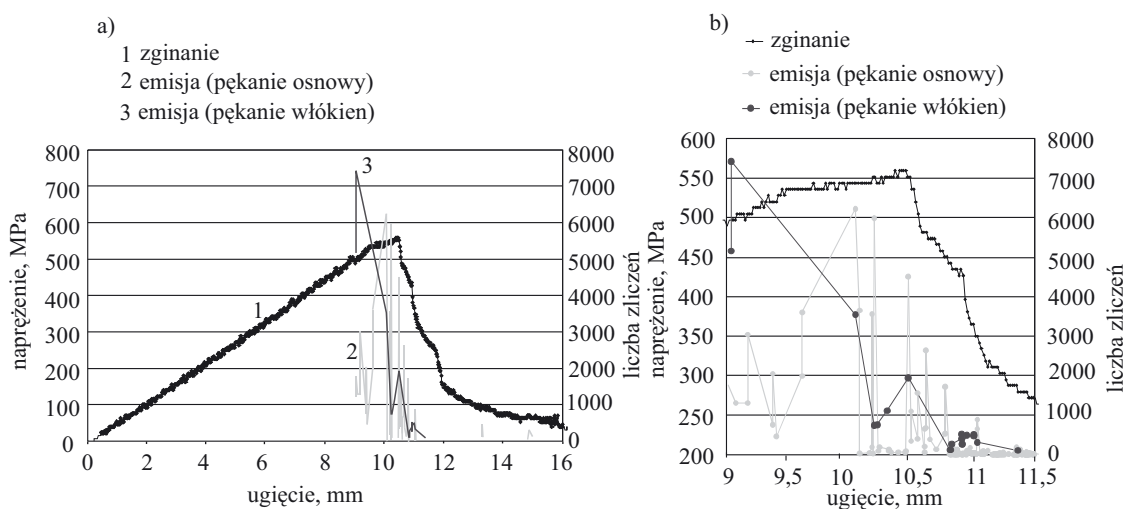
ciach bardzo wyraźnie widać różnicę energii zdarzeń zachodzących podczas prób zginania niewzmocnionej żywicy oraz kompozytu (laminatu). W przypadku żywicy niewzmocnionej zarejestrowane zdarzenia, we wszystkich przypadkach, cechują się energią nie przekraczającą poziomu $4 \cdot 10^{-9}$ J. Wartość tę przyjęliśmy więc jako granicę rozdzielającą zdarzenia związane z pękaniem osnowy (poniżej poziomu granicznego) oraz z pękaniem włókien (powyżej poziomu granicznego).

Krzywe emisji akustycznej uzyskane podczas statycznego zginania próbek laminatu niezszywanego zamieszczono na rys. 7, a laminatu zszywanego, w zależności od kierunku zginania, na rys. 8 i 9.

Duża, we wszystkich tych przypadkach, liczba zdarzeń związanych z pękaniem osnowy żywicznej w laminacie pochodzi najprawdopodobniej od stopniowego

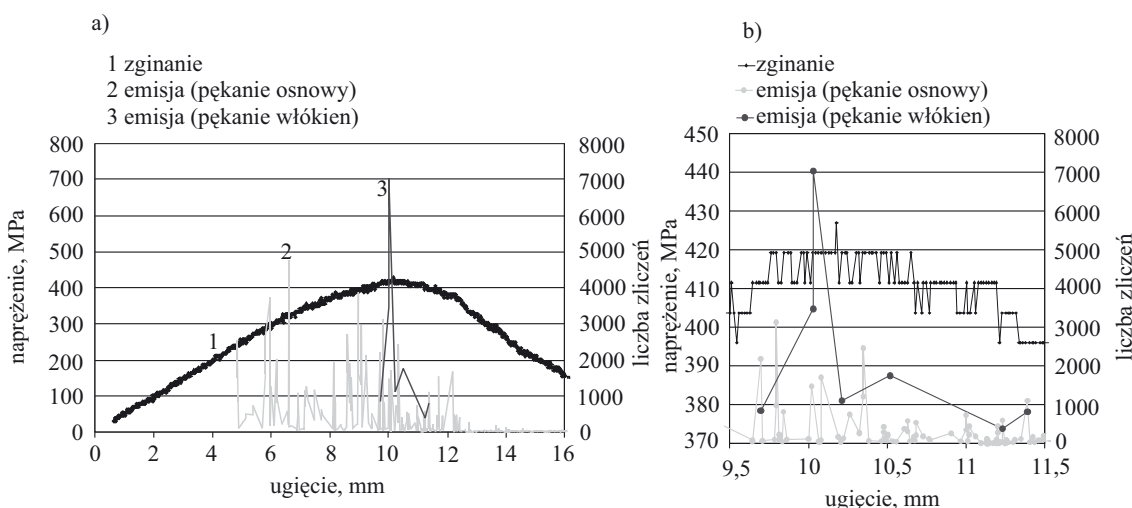
rozprzestrzeniania się mikropęknięć podłużnych i poprzecznych oraz następnym pęknięć delaminacyjnych między warstwami wzmocnienia [22]. Rozprzestrzenianie to jest stopniowe i narasta w miarę zwiększania naprężenia w materiale. Duże natężenie (skupienie) zdarzeń akustycznych w szerokim zakresie ugięcia próbek zaobserwowaliśmy w laminacie zarówno w klasycznym, jak i zszywonym.

W przypadku laminatu niezszywanego, największe natężenie pękania włókien zarejestrowano w warunkach ugięcia nieco większego niż ugięcie odpowiadające maksymalnemu naprężeniu (rys. 7 b). W chwili maksymalnego naprężenia w materiale dominującym mechanizmem zniszczenia jest pęknięcie osnowy. Wynika to prawdopodobnie z delaminacji w górnej (ściskanej) części laminatu. Wyniki potwierdzają obserwacje fotograficzne (por. rys. 3).



Rys. 8. Krzywa zginania kompozytu zszywanego z odpowiadającym jej zarejestrowanym sygnałem emisji akustycznej, kierunek zginania równoległy do linii szwów: a) cały przebieg, b) wycinek krzywej z sygnałem emisji w okolicy punktu odpowiadającego maksimum naprężenia

Fig. 8. Bending curve of stitched composite and corresponding acoustic emission signal recorded; bending direction parallel to the stitches; a — whole course, b — curve sector, with emission signal, near maximal bending stress point



Rys. 9. Krzywa zginania kompozytu zszywanego z odpowiadającym jej zarejestrowanym sygnałem emisji akustycznej, kierunek zginania prostopadły do linii szwów: a) cały przebieg, b) wycinek krzywej z sygnałem emisji w okolicy punktu odpowiadającego maksimum naprężenia

Fig. 9. Bending curve of stitched composite and corresponding acoustic emission signal recorded; bending direction perpendicular to the stitches; a — whole course, b — curve sector, with emission signal, near maximal bending stress point

W odniesieniu do laminatu zszywanego tuż przed punktem odpowiadającym maksymalnemu naprężeniu na krzywej zginania zarejestrowano maksymalne natężenie pęknięcia włókien (por. rys. 8 b oraz 9 b). Tak więc, w przeciwieństwie do laminatu klasycznego, w chwili osiągnięcia przez materiał maksymalnego naprężenia dominującym mechanizmem zniszczenia jest tu pęknięcie włókien. Zachowanie takie można tłumaczyć tym, że szwy przechodzące przez strukturę i łączące warstwy wzmocnienia, uniemożliwiają łatwą delaminację (zwiększają wytrzymałość materiału w kierunku translaminarnym). Siły, które w laminacie klasycznym wywołują naprężenia styczne lub translaminarne w war-

stewkach żywicy między warstwami wzmocnienia, w laminacie zszywanym są przenoszone przez szwy na włókna wzmocniające; w laminacie takim delaminacja pojawia się więc tylko w bardzo ograniczonym zakresie lub nie występuje wcale. Wyniki te są zgodne z obserwacjami fotograficznymi (por. rys. 3—5).

W sygnale akustycznym pochodzącym od laminatu zszywanego zarejestrowano większą sumaryczną liczbę zdarzeń niż w przypadku laminatu niezszywanego. Należy to tłumaczyć różnicami w przebiegu ich zniszczenia. W laminacie klasycznym pęknięcie żywicy jest wynikiem przede wszystkim delaminacji o charakterze „masowym”. Pęknięcia delaminacyjne występujące w nie-

wielkich ilościach w jednostce czasu rozprzestrzeniają się każdorazowo w stosunkowo dużych obszarach próbki, sygnał emisji akustycznej pochodzący od tych pęknięć wykazuje zatem odpowiednio mniejszą liczbę zliczeń. W laminatach zszywanych istotny wpływ na przebieg krzywych emisji związanych z pękaniem osnowy wywierają natomiast zaburzenia struktury, takie jak np. „kieszenie” żywiczne (czyli obszary, w których brak wzmocnienia). W tych dość licznie występujących miejscach może dochodzić do powstawania i rozprzestrzeniania mikropęknięć biorących udział w tworzeniu sygnału akustycznego. Zjawiska „kieszeni” nie obserwuje się w laminatach klasycznych.

WNIOSKI

— Przyczyny zainicjowania procesu zniszczenia w laminatach zszywanych i niezszywanych są podobne. W obu przypadkach następuje to na drodze delaminacji, przy czym w laminatach zszywanych delaminacja jest wyraźnie ograniczona przez szwy.

— Przebieg zniszczenia laminatu zszywanego jest mniej gwałtowny niż laminatu klasycznego. Siły wywołujące w laminacie klasycznym naprężenia styczne lub translaminarne, w laminacie zszywanym są przenoszone przez szwy na warstwy wzmocnienia.

— Dominujący mechanizm zniszczenia w chwili osiągnięcia przez materiał maksimum naprężenia stanowi w laminacie niezszywanym pęknięcie osnowy (delaminacja), a w laminacie zszywanym — pęknięcie włókien.

— W laminacie zszywanym zaobserwowano większą niż w laminacie klasycznym ilość elementarnych pęknięć obydwu składników, co prawdopodobnie wiąże się z występującymi defektami struktury.

LITERATURA

1. Prichard J. C., Hogg P. J.: *Composites* 1990, **21**, 503.
2. Liu D.: *J. Reinf. Plast. Compos.* 1990, **9**, 59.
3. Su K. B.: *ASTM STP* 1989, **1044**, 279.
4. Chung W. C., Jang B. Z., Chang T. C., Hwang L. R., Wilcox R. C.: *Mater. Sci. Eng. A* 1989, **112**, 157.
5. Jang B. Z., Cholakara M., Jang B. P., Shih W. K.: *Polym. Eng. Sci.* 1991, **31**, 40.
6. Cantwell W. J., Morton J.: *Composites* 1991, **22**, 347.
7. Mayadas A., Pastore C., Ko F. K.: „Proceedings of 30th International SAMPE Symposium”, 19—25 marca 1985 r., mat. konf. str. 1284—1293.
8. Chan W. S.: *J. Compos. Technol. Res.* 1991, **14**, 91.
9. Jain L. K., Mai Y.-W.: Recent work on stitching of laminated composites — theoretical analysis and experiments, Proceedings of Eleventh International Conference on Composite Materials, Gold Coast, Australia, 1997.
10. Stickler P. B., Ramulu M.: *Mater. Des.* 2002, **23**, 751.
11. Reeder J. R., Glaessgen E. H.: *J. Reinf. Plast. Compos.* 2004, **23**, nr. 3, 249.
12. Mouritz A. P., Bannister M. K., Falzon P. J., Leong K. H.: *Composites: Part A* 1999, **30**, 1445.
13. Dow M. B., Dexter H. B.: „Development of stitched, braided and woven composite structures in the ACT program and at Langley Research Center (1985 to 1997). Summary and bibliography, Raport NASA TP-97-206234, 1997.
14. Rhee K. Y., Kim H. J., Park S. J.: *Composites: Part B* 2006, **37**, 21.
15. Mouritz A. P.: *Compos. Sci. Technol.* 1995, **55**, 365.
16. Mouritz A. P.: *Composites: Part A* 1996, **27**, 525.
17. Mouritz A. P.: *Composites: Part B* 2001, **32**, 431.
18. Shah Khan M. Z., Mouritz A. P.: *Compos. Sci. Technol.* 1996, **56**, 695.
19. Koziół M., Hyla I., Rutecka M.: „Nowe Technologie i Materiały w Metalurgii i Inżynierii Materiałowej. XII Seminarium Naukowe”, Katowice 2004, mat. konf. str. 173—178.
20. Koziół M.: „Materiały i Technologie XXI Wieku. VI Międzynarodowa Studencka Sesja Naukowa”, Katowice 2004, mat. konf. str. 79—84.
21. Koziół M., Ślęziona J.: *Inż. Mater.* 2006, 151, nr 3, 616.
22. Reifsnider K. L.: „Service induced damage in composite structures, Handbook of composites, t. 2. Structures and design”, Amsterdam, 1988.