

WPLYW NISKOENERGETYCZNYCH USZKODZEŃ UDAROWYCH NA WYTRZYMAŁOŚĆ LAMINATU WZMOCNIONEGO TKANINĄ

Andrzej BELZOWSKI, Zdzisław RECHUL, Jan STASIEŃKO

Wydziałowy Zakład Wytrzymałości Materiałów, Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej,
50-370 Wrocław, ul. Smoluchowskiego 25, tel.: 071-3202949, fax: 071-3204098,
e-mail: belzowski@wzwm.pwr.wroc.pl

Streszczenie

Omówiono problem uszkodzeń wywołanych w kompozycie polimerowym przez poprzeczne obciążenia udarowe. Uszkodzenia udarowe obniżają wytrzymałość materiału oraz ułatwiają inicjację korozji naprężeniowej, co ogranicza efektywność stosowania kompozytów polimerowych. Omówiono wyniki badań wpływu uszkodzeń udarowych na strukturę i wytrzymałość laminatu epoksydowo-szklanego wzmocnionego tkaniną. Przedstawiono rezultaty prób zmęczeniowych próbek z uszkodzeniem udarowym. Stwierdzone zmiany wytrzymałości na zginanie badanego laminatu stanowią potencjalnie mniejsze zagrożenie w porównaniu do otwartych pęknięć poprzecznych widocznych już przy najmniejszej stosowanej energii uderzenia.

Słowa kluczowe: kompozyty polimerowe, uszkodzenia udarowe

EFFECT OF LOW-ENERGY IMPACT DAMAGE ON INTEGRITY OF FABRIC-REINFORCED LAMINATES

Damage in polymer composite induced by lateral impact loads is discussed. This type of damage reduces strength characteristics of a material and gives rise to stress corrosion being thus a principal limiting factor in application of composites in many areas of technology. The paper presents results of investigations on the effect of impact damage on microstructure and strength of a glass-fabric reinforced epoxy laminate. Both static and cyclic tests were carried out to assess the most common combination of loads found in service. The chief conclusion states that open lateral cracks arising from impact pose the severest danger. They are formed by even mild impacts and must be regarded more detrimental to the material integrity than the observed decrease in bending strength.

Keywords: polymer composites, impact damage

1. WPROWADZENIE

Materiały kompozytowe (MK) utworzone z polimerów duro lub termoplastycznych wzmocnionych włóknami od wielu lat skutecznie konkurują ze stopami metali w wielu dziedzinach techniki. Obok zalet przesądzających o ich wzrastającym rozpowszechnieniu, kompozyty posiadają również słabe strony. Jedną z nich jest wrażliwość na działanie uderzeń spowodowanych przez różne ciała obce. Podatność polimerowych kompozytów konstrukcyjnych na działanie poprzecznych obciążeń udarowych (POU) powodujących powstawanie w elemencie uszkodzeń udarowych (UU) jest zagadnieniem specyficznym, dotyczącym szczególnie tej grupy materiałów. Dlatego metody detekcji i kwantyfikowania UU, dokonywania oceny podatności materiału na ich powstawanie, sposobów uwzględniania takich uszkodzeń w procedurach monitorowania konstrukcji itp. są opracowywane często podczas rozwiązywania różnych konkretnych problemów, w zasadzie bez możliwości korzystania z

istniejących opracowań odnoszących się do innych materiałów konstrukcyjnych. Próby udarowości Charpy'ego, Izooda itp. stosowane do oceny metali oraz tworzyw sztucznych nie wzmocnionych są mało przydatne w badaniach kompozytów.

Ranga problemu uszkodzeń udarowych materiału kompozytowego zależy od specyfiki danej dziedziny techniki. Inne jest podejście do tego zagadnienia w instalacjach przemysłowych, inne w budowie jednostek pływających, inne w konstrukcjach lotniczych. Uszkodzenia udarowe utrudniają pełne wykorzystanie wielu potencjalnych możliwości kompozytów. W największym stopniu odnosi się to do zastosowań podlegającym zwiększonym wymaganiom pod względem trwałości i bezpieczeństwa eksploatacji (lotnictwo, rurociągi i urządzenia ciśnieniowe [1, 2]). Ocenia się, że w konstrukcjach lotniczych uszkodzenia udarowe stanowią obecnie problem o znaczeniu porównywalnym do zmęczenia materiału.

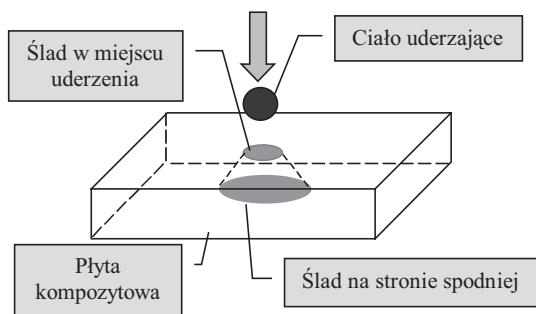
W artykule przedstawiono wyniki badań wybranego laminatu konstrukcyjnego o symbolu handlo-

wym TSE-2 utworzonego z żywicy epoksydowej wzmocnionej tkaniną szklaną. Materiał ten jest produkowany z przeznaczeniem do zastosowań konstrukcyjnych w elektrotechnice. Prowadzone badania dotyczyły głównie zakresu niskich energii (tj. poniżej początku perforacji płyty) i niewielkich prędkości ciała wykonującego uderzenie (rzędu kilku–kilkunastu m/s). W praktyce eksploatacyjnej często chodzi o obiekty o masie do kilku kilogramów poruszające się z prędkością rzędu kilku–kilkudziesięciu m/s. Takie parametry cechują przypadkowe uderzenia narzędziami, grad, kamienie rzucone umyślnie lub wyrzucone spod kół pojazdu.

Szczególną uwagę poświęcono problemowi energetycznego proggu uszkodzenia udarowego materiału oraz wzajemnemu oddziaływaniu uszkodzeń udarowych i zmęczeniowych.

UWAGI O STRUKTURZE USZKODZENIA NISKOENERGETYCZNEGO

Przy niedużych energiach impulsu obciążenia – rzędu kilku–kilkunastu dżuli – w miejscu uderzenia tworzy się niewielki, trudny do zauważenia ślad. Pod tym śladem może powstać w materiale złożony układ rozwarstwień i pęknięć poprzecznych, obejmujący w przybliżeniu obszar ściętego stożka (rys. 1). Wierzchołek stożka pokrywa się ze śladem uderzenia (powierzchnia zewnętrzna elementu), podczas gdy podstawa leży na przeciwległej (tj. wewnętrznej) powierzchni ścianki.

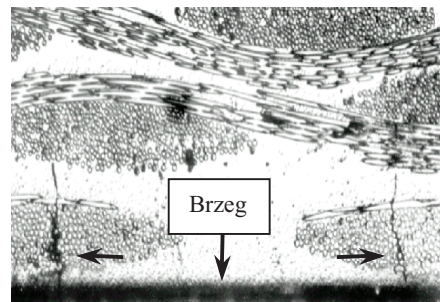


Rys. 1. Przybliżony zarys obszaru uszkodzonego w płycie kompozytowej po uderzeniu o niskiej energii

W pewnym przedziale energii impulsu siły ślad uderzenia jest nieduży i tym samym łatwy do przeoczenia, a powstałe pęknięcia spełniają strukturalne kryteria wystąpienia stanu niebezpiecznego. Takie uszkodzenia określa się często terminem BVID (*Barely Visible Impact Damage*). Kompozyty pracujące w środowisku agresywnym (rury, zbiorniki) przeważnie projektuje się na podstawie tzw. kryterium FPF (*First Ply Failure*). Wyraża ono zasadę, że w MK przeznaczonych do długotrwałej pracy w agresywnym środowisku (woda, ścieki, chemikalia itp.) nie mogą występować pęknięcia poprzeczne (tj. w kierunku grubości ścianki) osiagające rozmiar grubości pojedynczej warstwy laminatu (najczęściej

0,1–0,5mm) [3]. Takie nieciągłości mogłyby znacznie przyspieszyć korozję naprężeniową włókien szklanych stanowiących wzmocnienie MK.

Na rys. 2 jest pokazana struktura płyty o grubości 4mm z badanego laminatu TSE-2 zawierającej uszkodzenie udarowe wywołane przez swobodny spadek bijaka o masie 0,930 kg z końcówką sferyczną o średnicy 25 mm. Energia impulsu siły wynosiła 3 J.

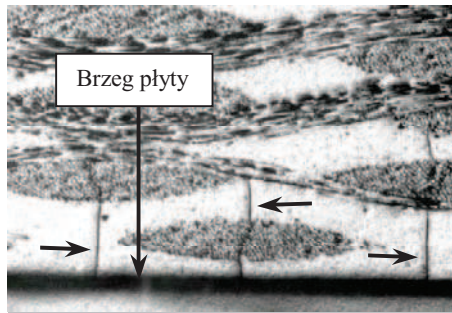


Rys. 2. Uszkodzenie wywołane przez uderzenie o energii całkowitej 3J; strona przeciwna (rozciągnięta) w stosunku do miejsca uderzenia poprzeczna do powierzchni. Płyta o grubości 4 mm z kompozytu epoksydowo-szklanego wzmocnionej tkaniną

Pęknięcia wskazane strzałkami na rys. 2 są uszkodzeniami niebezpiecznymi w rozumieniu kryterium FPF i w elementach instalacji nie powinny występować w całym okresie ich użytkowania [3]. W opracowaniu [4] przytoczono opis badań wytrzymałości długotrwałej rur poliesterowo-szklanych wypełnionych kwasem solnym i obciążanych ciśnieniem generującym odkształcenie obwodowe 1%. W projektowaniu instalacji przyjmuje się znacznie mniejsze odkształcenia dopuszczalne, wynoszące od 0,09% do 0,20% [5, 6] Rury z nieuszkodzoną warstwą skrajną ulegały zniszczeniu po upływie 1,9 roku, rury bez ciągłych skrajnych warstw żywicznych – po 200 minutach, a rury z popęknaną warstwą ochronną – po 30 minutach. Wynika z tego, że popękane warstwy skrajne nie zabezpieczają warstw nośnych przed wpływem środowiska powodującego rozwój korozji naprężeniowej włókien i niedopuszczenie do powstania takich pęknięć jest warunkiem trwałości instalacji. Uszkodzenie o energii 3 J wywołuje obiekt o masie 1kg spadający swobodnie z wysokości 0,3m.

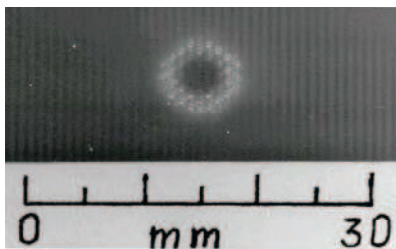
Na rys. 3 jest pokazana struktura uszkodzenia wywołanego przez uderzenie o energii 7,5 J. Jak widać, natura uszkodzeń jest podobna do pokazanej na rys. 2, ale gęstość i rozmiary pęknięć są większe.

Na rys. 4 jest pokazany ślad utworzony w miejscu uderzenia o energii 7,5 J. Ślad utworzony w miejscu uderzenia o energii 3 J był słabo widoczny i trudny do sfotografowania.



Rys. 3. Pęknięcia wychodzące na powierzchnię przeciwną do miejsca uderzenia, wywołane przez uderzenie o energii 7,5 J.

Materiał jak na rys. 2



Rys. 4. Ślad w miejscu uderzenia o energii 7,5 J

2. WPŁYW USZKODZEŃ UDAROWYCH NA WYTRZYMAŁOŚĆ KOMPOZYTÓW

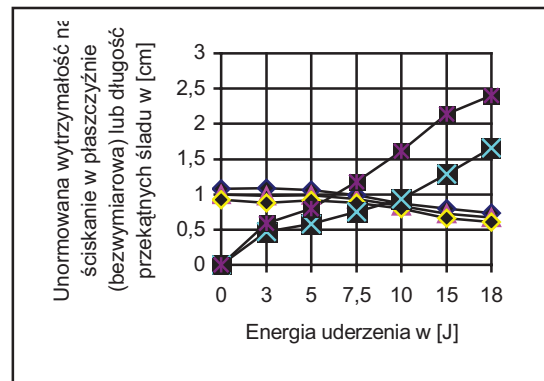
Obecność w materiale kompozytowym uszkodzenia udarowego wpływa ujemnie na jego wskaźniki wytrzymałości. W największym stopniu zmienia się wytrzymałość na ściskanie w płaszczyźnie, która może spadać nawet o 30–60%. Obserwuje się również spadki wytrzymałości na rozciąganie, zginanie oraz trwałości zmęczeniowej.

Procedury badań elementów uszkodzonych udarowo przeważnie nie mają statusu norm międzynarodowych. Względy merytoryczne przemawiają za stosowaniem próbek o większych wymiarach. Racje techniczne (konieczność zapobieżenia wyboczeniu) oraz ekonomiczne (ilość materiału potrzebnego do badań) przemawiają raczej za mniejszymi rozmiarami próbek.

W przeprowadzonych badaniach wpływu POU na wytrzymałość na ściskanie R_c laminatu TSE-2 stosowano próbki prostokątne o wymiarach 54×89 mm. Do próby uderzenia próbka była skręcana pomiędzy dwiema płytami stalowymi z centralnym otworem przelotowym $\phi 40$, co odpowiada utwierdzeniu na konturze otworu.

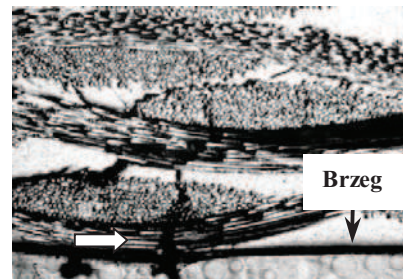
Uszkodzenia wywoływał spadający bijak o masie 930 g z końcówką sferyczną o średnicy 25 mm. Próbkę z uszkodzeniem udarowym poddawano próbie wytrzymałości na ściskanie w płaszczyźnie w uchwycie zapobiegającym wyboczeniu. Stosowano po 7–10 próbek dla każdego wybranego poziomu energii. Z wykresu zmian wartości R_c pokazanego na rys. 5 wynika, że uderzenia o energii nie przekraczającej 5 J nie obniżały wytrzymałości

materiału. Stopniowy spadek R_c w miarę wzrostu energii występował od jej wartości równej 7,5 J.



Rys. 5. Zmiany wytrzymałości na ściskanie laminatu TSE-2 w funkcji energii uderzenia w [J] – wartość średnia \pm odchylenie standardowe (krzywe malejące) oraz długość przekątnej śladu (w [cm]) w miejscu uszkodzenia – wykres rosnący niższy – i na stronie przeciwległej (wykres rosnący wyższy)

Największej zastosowanej energii uderzenia (18 J) odpowiadał spadek wartości średniej R_c o 33%. Pęknięte pasma włókien szklanych (rys. 6), świadczące o bliskim początku perforacji próbek, pojawiły się na stronie przeciwległej do miejsca uderzenia już przy energii uderzenia równej 15 J.



Rys. 6. Zerwane pasmo włókien szklanych po stronie przeciwległej; energia uderzenia wynosiła 15 J

Z porównania rys. 2 z wykresem zmian wytrzymałości (rys. 5) wynika, że niebezpieczne zmiany struktury (FPF) wystąpiły wcześniej, niż zmiany wytrzymałości. Pokazuje to niedostatek oceny uszkodzonego kompozytu na podstawie zmian wytrzymałości. Określenie energii progowej uszkodzenia MK pracujących w środowisku agresywnym powinno uwzględniać badanie mikrostruktury uszkodzonych warstw skrajnych.

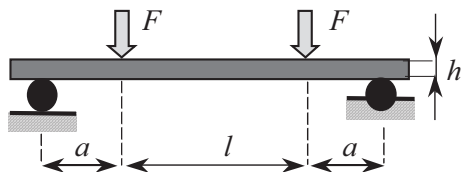
3. EFEKT SYNERGICZNY UDERZEŃ I OBCIĄŻEŃ DŁUGOTRWAŁYCH

W rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych element kompozytowy może być narażony na równoczesne działanie długotrwałych obciążeń stałych

lub zmiennych (zmęczeniowych), uderzenia oraz różne czynniki środowiskowe. Na podstawie opisów badań publikowanych w literaturze byłoby trudno wnioskować odnośnie charakteru i zakresu zmian wytrzymałości laminatu TSE-2 w takich warunkach. Przeprowadzono serię prób mających na celu uzyskanie danych na temat wytrzymałości na zginanie laminatu zawierającego równocześnie uszkodzenia zmęczeniowe i udarowe.

Pierwsza seria doświadczeń polegała na:

- wytworzeniu w próbkach uszkodzenia udarowego o energii impulsu 7,5 J,
- poddaniu tych próbek działaniu określonej liczby cykli zmęczeniowych w układzie tzw. zginania czteropunktowego (rys. 7).



Rys. 7. Schemat próby zginania czteropunktowego

Wytrzymałość na zginanie laminatu w stanie wyjściowym określono na próbkach o długości całkowitej 110mm, nominalnej grubości $h=4,0\text{mm}$ i wymiarach $a=24\text{mm}$, $l=32\text{mm}$. Wytrzymałość średnia na zginanie próbek o szerokości $b=35\text{mm}$ wynosiła $R_g=530\text{MPa}$ przy współczynniku zmienności 3,2%. W środku części o długości l wprowadzono w czterech próbkach uszkodzenie udarowe o energii 7,5 J. Sposób mocowania oraz realizacja uderzenia były podobne jak w badaniach przedstawionych na rys. 5. Następnie próbki te zostały poddane działaniu 10^4 cykli obciążenia w układzie przedstawionym na rys. 7. Maksymalna wartość siły w pojedynczym cyklu wynosiła 40% nośności wyjściowej próbek ($F=0,4F_{sr}=1730\text{N}$), współczynnik asymetrii $R=0,13$ ($R=\sigma_{min}/\sigma_{max}$). W dwóch próbkach podczas obciążeń cyklicznych ślad uderzenia był położony na górnej powierzchni (ściskanej). Większa część uszkodzenia udarowego (przeciwległa do miejsca uderzenia) leżała w strefie rozciąganej próbki. W dwóch pozostałych próbkach lokalizacja POU była odwrotna, tj. strefa przeciwległa do uderzenia była ściskana cyklicznie. Próbki uszkodzone udarowo i zmęczeniowo zostały poddane statycznej próbie zginania w układzie stosowanym w próbie zmęczeniowej. Okazało się, że spadek wytrzymałości zginanie R_g w stosunku do wartości określonej dla próbek bez uszkodzeń zmęczeniowych i udarowych nie przekraczał 3%. W porównaniu do zmian wytrzymałości na ściskanie R_c spowodowanych POU (rys. 5), zmiany wytrzymałości na zginanie R_g wywołane przez uszkodzenia udarowe i zmęczenie były nieznaczne.

Przeprowadzono analogiczne doświadczenie poddając 6 próbek z UU (7,5 J) działaniu 10^4 cykli na poziomie 50% wytrzymałości materiału nieuszkodzonego. Spadki wytrzymałości statycznej na zginanie okazały się nieco większe i wynosiły 4%

dla trzech próbek obciążanych cyklicznie ze spodem UU po stronie rozciąganej oraz 8% dla próbek z odwrotnym położeniem UU tj. z podstawą „stożka” objętości uszkodzonej (rys. 1) położoną po stronie ściskanej cyklicznie. Podczas badań zmęczeniowych przy zginaniu trzypunktowym próbek bez UU spadek wytrzymałości R_g po zastosowaniu 10^4 cykli na poziomie $\sigma_{max}=0,4R_g$ wynosił aż 14% [7].

Dopiero w próbkach z uszkodzeniami udarowymi (7,5 J) poddanych działaniu 10^5 cykli obciążenia realizowanych wg schematu z rys. 7 na poziomie $\sigma_{max}=0,5R_g$ stwierdzono znaczący spadek wytrzymałości pozostałej – do poziomu 70% wartości wyjściowej. We wszystkich przypadkach zginania czteropunktowego opisanych w tym rozdziale zniszczenie próbek wystąpiło nie w miejscu uszkodzenia udarowego lecz w przekroju obciążonym siłą F .

4. PODSUMOWANIE

Z opisanych badań wynika, że zastosowane obciążenia udarowe o całkowitej energii impulsu 7,5 J nie wpływały istotnie na przyspieszenie procesu degradacji zmęczeniowej materiału. Świadczy o tym lokalizacja przekrojów, w których wystąpiło zniszczenie wszystkich badanych próbek – zawsze był to rejon przyłożenia obciążenia F a nie strefa uszkodzenia udarowego. Jak się wydaje, znacznie większe potencjalne zagrożenie dla trwałości elementów z takimi uszkodzeniami udarowymi (rys. 1, 3, 4) stanowią pęknięcia poprzeczne dochodzące do powierzchni w obszarze uszkodzonym przeciwległym do miejsca uderzenia. Wynika z tego, że ocena wpływu POU na badany laminat na podstawie zmian jego wytrzymałości pozostałej jest niewystarczająca i powinna być uzupełniona o badania mikrostruktury.

LITERATURA

- [1] BEŁZOWSKI *Niskoenergetyczne uszkodzenia Udarowe w kompozytach polimerowych*. II Semin. STRUKTURALNE ASPEKTY DESTRUKCJI MATERIAŁÓW, OBR GRE W-w, 1997, s. 39–47.
- [2] BEŁZOWSKI A., STASIEŃKO J., *O wpływie poprzecznych obciążeń udarowych na własności polimerowych kompozytów konstrukcyjnych*. Przegląd Mechaniczny, zeszyt 13/2000, s. 13–18.
- [3] ECKOLD G.C., *Failure criteria for use in design environment*. Composites Science and Technology, 58, 1998, s. 1095–1105.
- [4] QUINN J.A., *Composites – Design Manual*. Wyd. 3, James Quinn Associates Ltd, 2002.
- [5] BS 4994 *Specification for design and construction of vessels and tanks in reinforced plastics*. 1987.
- [6] BS 7159 *Code of practice for design and construction of glass-reinforced plastic piping system*. 1989.
- [7] BEŁZOWSKI A., *Method for evaluating long-term strength of polymer composites allowing for fatigue degradation and size effect*. Archives of Civil Engineering, XLVII, 4, 2001, s. 521–537.