**Andrzej Bełzowski[1], Zdzisław Rechul[2], Jan Stasieńko[3]**
**Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, ul. Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław**

# USZKODZENIA UDAROWE W LAMINACIE WZMOCNIONYM TKANINĄ SZKLANĄ

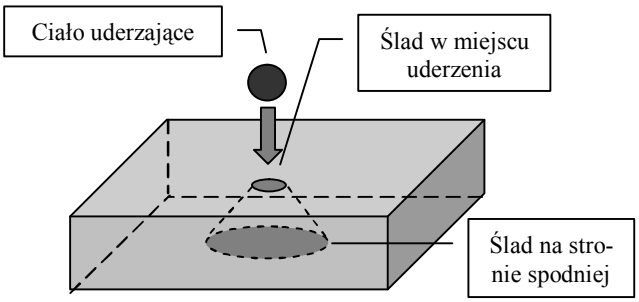
**Poprzeczne obciążenia udarowe obniżają własności laminatów, w szczególności wytrzymałość na ściskanie w płaszczyźnie. W pracy opisano badania laminatu epoksydowo-szklanego o grubości 4 mm wzmocnionego tkaniną. W materiale tym występuje progowa wartość energii uderzenia, poniżej której nie stwierdzono spadku wytrzymałości materiału. Podczas badań okazało się, że uderzenia o energii nieprzekraczającej wartości progowej wywołały groźne uszkodzenia struktury grożące przyspieszoną korozją wzmocnienia. Wynika z tego, że ocena energii progowej uszkodzenia udarowego na podstawie prób wytrzymałości może być zbyt optymistyczna. Obserwacje mikroskopowe stanowią czułe narzędzie wykrywania niebezpiecznych zmian struktury i powinny uzupełniać badania wytrzymałości podczas oceny wartości progowej energii poprzecznych obciążeń udarowych.**

## IMPACT-RELATED DAMAGE IN GLASS ROVING REINFORCED LAMINATE

**Transverse impact loads lower laminate properties and especially its compressive strength as measured parallel to the fibre ply plane. The present paper gives an account of investigations on 4 mm thick glass-epoxy laminate reinforced with woven roving. The compressive strength was found to be reduced by as much as 33% throughout the energy range used (0÷18 J). The material exhibited threshold behaviour with impact energies below 6÷7 J resulting in no strength decrease (Fig. 3). The compressive strength evaluation cannot be decisive, however, since even the low-energy impacts (3÷5 J) gave rise to microstructural damage that, though raising no concern when looked at macroscopically, could accelerate corrosion of the strengthening phase and as such can in no way be neglected (Figs 5-7, 9). The presented study is a clear demonstration that microscope examination is a reliable diagnostic technique that should accompany strength tests since the latter give overly optimistic estimates of the safe impact energy value.**

## WPROWADZENIE

Wysoka ocena walorów technicznych kompozytów polimerowych wzmocnionych włóknami (KP) nie przesłania faktu, że nie są to materiały idealne i posiadają również swe słabe strony. Zalicza się do nich niewątpliwie stosunkowo niewysoka odporność na działanie poprzecznych obciążeń udarowych. Problem ten został zauważony najwcześniej w elementach poszycia zewnętrznego konstrukcji lotniczych. Okazało się, że uderzenia poprzeczne w powierzchnie skrzydeł i kadłuba, spowodowane np. przez nieostrożnych mechaników lub kamyki wyrzucone spod kół startującego samolotu, mogą powodować dość poważne uszkodzenia wewnętrzne w elemencie kompozytowym w sąsiedztwie punktu uderzenia. Przy niedużych energiach impulsu obciążenia - rzędu kilku dżuli - w miejscu udaru tworzy się niewielki, niekiedy trudny do zauważenia ślad. Badania mikrostruktury wykazują, że pod tym śladem w materiale może powstać złożony układ rozwarstwień i pęknięć poprzecznych, obejmujący w przybliżeniu obszar ściętego stożka (rys. 1). Wierzchołek stożka pokrywa się ze śladem w miejscu uderzenia (powierzchnia zewnętrzna elementu), podczas gdy podstawa leży na przeciwległej (tj. wewnętrznej) powierzchni ścianki elementu.




Rys. 1. Zarys obszaru uszkodzonego w płycie kompozytowej po niskoenergetycznym uderzeniu poprzecznym

Fig. 1. Configuration of the damaged zone following the low-energy impact

W zależności od wywołanych skutków wyróżnia się dwa zakresy energii impulsu siły:

- Uszkodzenia niskoenergetyczne, określane również symbolem BVID (*barely visible impact damage*), odpowiadają małym energiom impulsu. Wewnątrz materiału, w rejonie uderzenia, występuje siatka rozwarstwień i poprzecznych pęknięć warstw, nie ma

[1] dr inż., [2] dr inż., [3] dr inż.

natomiast miejsca masowe pękanie włókien. Na powierzchni w miejscu uszkodzenia powstaje niewielki ślad, na powierzchni przeciwległej uszkodzenie jest wyraźnie bardziej rozległe [1].

- W zakresie dużych energii występują pęknięcia włókien oraz co najmniej zaczątki perforacji, w przypadku rur i zbiorników ma miejsce wyraźny przeciek.

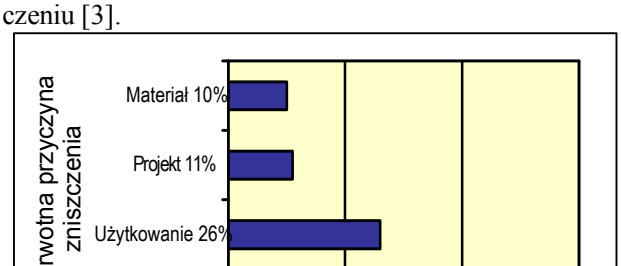
Ocena podatności polimerowych kompozytów konstrukcyjnych na powstawanie uszkodzeń udarowych stanowi ważny problem praktyczny. Klasyczne próby udarności Charpy'ego, Izoda itp. stosowane w badaniach metali i tworzyw sztucznych okazały się mało przydatne do oceny KP o strukturze warstwowej (tzw. laminatów). Specyficzne cechy laminatów sprawiają, że materiały te wymagają opracowania nowych metod oceny ich przydatności do pracy w warunkach stwarzających zagrożenie wystąpienia uszkodzeń udarowych.

Uszkodzenia BVID powodują spadek wartości wskaźników wytrzymałości. W największym stopniu zmniejsza się doraźna wytrzymałość laminatu na ściskanie w płaszczyźnie ($R_c$), której spadek może wynosić nawet 30÷60% [1, 2]. W przypadku energii uderzeń powodujących małe spadki wytrzymałości doraźnej, główne niebezpieczeństwo może być związane z wystąpieniem takich zjawisk destrukcyjnych, jak:

- propagacja powstałych rozwarstwień do rozmiarów powodujących zniszczenie elementu wskutek utraty stateczności (dotyczy to np. konstrukcji lotniczych),
- korozja naprężeniowa spowodowana przez pęknięcia lub odpryski po stronie przeciwległej do miejsca uderzenia (może dotyczyć rurociągów i zbiorników).

Garg [3] ocenia, że gdyby elementy poszycia samolotów wykonane z laminatów epoksydowo-węglowych nie były narażone na powstawanie uszkodzeń BVID, pozwoliłoby to na podniesienie wartości odkształceń dopuszczalnych, uwzględnianych przy projektowaniu, z 0,4 do 0,6%. Przy 50% udziale KP w masie samolotu odpowiadałoby to zmniejszeniu masy własnej konstrukcji o około 10%. W przypadku rurociągów przemysłowych główne zagrożenie ze strony uszkodzeń BVID jest związane z możliwością obniżenia wskaźników ich niezawodności oraz trwałości.

Na rysunku 2 są przedstawione wyniki analizy przyczyn awarii elementów wykonanych z kompozytów polimerowych oraz tworzyw sztucznych [4]. Dane dotyczą ekspertyz wykonanych we Francji przez CETIM (odpowiednik UDT w Polsce) w latach 1994-1998. Awarie spowodowane przez uszkodzenia udarowe zaliczają się do przyczyn zaistniałych podczas użytkowania elementów, które stanowią 26% ogółu. Przytoczona statystyka przypuszczalnie nie obejmuje awarii elementów konstrukcji lotniczych, w których uszkodzenia BVID stanowią problem techniczny o kluczowym znaczeniu [3].




Rys. 2. Statystyka pierwotnych przyczyn awarii elementów z kompozytów polimerowych, termoplastów oraz elastomerów [4]

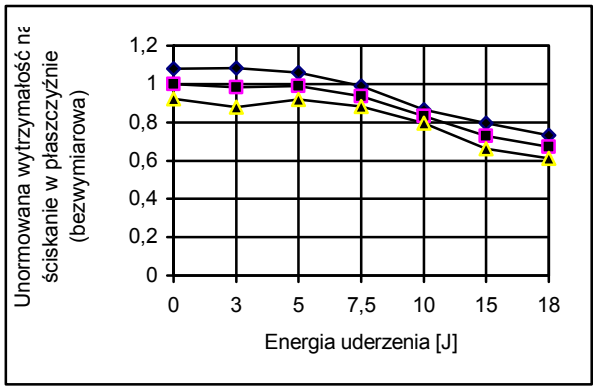
Fig. 2. Statistics of prime causes of failures in components made of polymer composites, thermoplastics and elastomers [4]

W artykule omówiono wyniki własnych badań i analiz nad wpływem niskoenergetycznych poprzecznych obciążeń udarowych na zmiany struktury laminatu epoksydowo-szklanego o grubości 4 mm wzmocnionego tkaniną. Badano zakres energii zbliżonych do wartości progowej, powodującej istotne obniżenie wytrzymałości materiału na ściskanie w płaszczyźnie. Pewna ilość próbek z uszkodzeniami została dodatkowo poddana działaniu środowiska agresywnego.

## BADANIE ZMIAN WYTRZYMAŁOŚCI

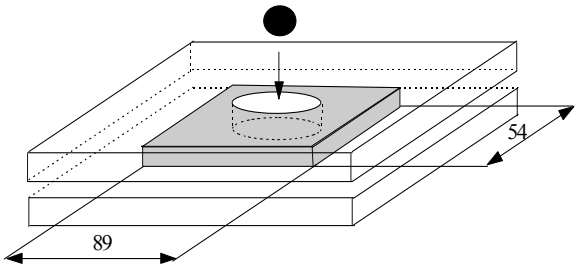
Badanie kompozytów pod kątem oceny ich przydatności do zastosowań w warunkach występowania poprzecznych obciążeń udarowych przebiega zazwyczaj w dwóch etapach: W *pierwszym* próbka w kształcie płytki prostokątnej o wymiarach od około 50×80 [5] do 127×254×6 mm [6] jest umieszczana w specjalnym uchwycie i następnie uderzana poprzecznie wzdłuż osi symetrii. Mocowanie może polegać na umieszczeniu płytki pomiędzy dwiema płytami z przelotowym otworem (np. $\phi$ 40÷50) wyznaczającym pole uderzenia. Stosuje się też inne zamocowania, np. dwa brzegi swobodne i dwa (przeciwległe) utwierdzone. Dla niskich prędkości uderzenie wykonuje masa (do 5 kg) z końcówką sferyczną (najczęściej o promieniu 10 lub 12,5 mm), spadająca z wysokości nieprzekraczającej kilku metrów. W celu uzyskania większych prędkości uderzenia stosuje się armatki pneumatyczne lub broń palną. W *drugim etapie* płytka próbna jest wyjmowana z uchwytu do realizacji uderzeń i mocowana w uchwytach do przeprowadzania próby wytrzymałościowej, najczęściej na ściskanie w płaszczyźnie. Konstrukcja uchwytu powinna zabezpieczyć płytkę przed wystąpieniem wyboczenia. Przy obciążeniach o wysokich energiach do drugiego etapu próby nie dochodzi, a kryterium oceny odporności materiału jest najczęściej stopień perforacji ścianki uzyskany w pierwszym etapie (częściowa, całkowita).

Celem badań nad uszkodzeniami BVID może być określenie zależności wytrzymałości od energii uderzenia. Przykład takiego wykresu jest zamieszczony na rysunku 3 (wg [1]). Badanym materiałem był laminat epoksydowo-szklany o wzmocnieniu z tkaniny. Próbki w kształcie płytek o wymiarach 54×89×4 mm były uszkadzane przez spadający bijak o masie 0,93 kg z końcówką sferyczną o średnicy 25 mm. Przed uderzeniem próbka była skręcana pomiędzy dwiema płytami stalowymi z centralnym otworem ϕ 40, co odpowiada utwierdzeniu na konturze otworu (rys. 4). Po wprowadzeniu uszkodzenia płytki poddawano próbie ściskania w płaszczyźnie w specjalnym uchwycie zabezpieczającym próbkę przed zniszczeniem wskutek wyboczenia [1].




Rys. 3. Unormowana wytrzymałość na ściskanie laminatu epoksydowo-szklanego wzmocnionego tkaniną w funkcji energii uderzenia w J; wartość średnia ± odchylenie standardowe

Fig. 3. Normalized compressive strength of epoxy-glass ply laminate as a function of impact energy (mean value ± standard deviation)




Rys. 4. Sposób mocowania próbki przed wykonaniem uderzenia

Fig. 4. Clamping of a specimen to be impact tested

Wykres na rysunku 3 przedstawia wartości unormowanej wytrzymałości laminatu na ściskanie w płaszczyźnie w funkcji wartości całkowitej energii impulsu siły (wg [1]). W badaniach tych stosowano po 7-10 próbek na punkt pomiarowy. Jak wynika z rysunku 3, wytrzymałość na ściskanie $R_c$ przy niewielkich energiach impulsu siły w praktyce nie zmienia się. Po przekroczeniu energii wynoszącej 5 J rozpoczyna się systematyczny spadek wartości $R_c$. Można powiedzieć, że badany materiał cechuje się występowaniem progowej wartości energii impulsu siły, poniżej której nie występuje spadek wytrzymałości $R_c$. Występowanie energetycznego progu energii impulsu obciążenia dla wytrzymałości na rozciąganie zostało potwierdzone m.in. w [5, 7], a dla wytrzymałości na zginanie w [8]. Istnieją również doniesienia o laminatach, które charakteryzują się wyraźnym stopniowym spadkiem wytrzymałości, poczynając od najmniejszych stosowanych energii impulsu siły [9, 10].

Występowanie zakresu energii uderzenia, w którym nie zachodzi spadek wytrzymałości materiału, jest bardzo korzystne z punktu widzenia praktyki. Dotyczy to zarówno etapu projektowania, jak i eksploatacji konstrukcji pracujących w warunkach występowania takich narażeń. Jak podano w [1], dla wartości energii uderzenia wynoszących 3 i 5 J, leżących poniżej progu uszkodzenia, ślady uderzenia były w badanym materiale widoczne okiem nieuzbrojonym [11]. W tej sytuacji nasuwają się następujące pytania:

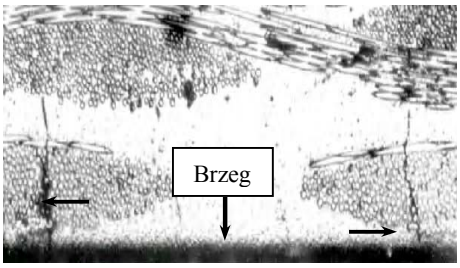
1. Jaki jest rodzaj oraz rozległość uszkodzeń, które wprawdzie nie obniżają wytrzymałości, ale są widoczne gołym okiem?
2. Czy widoczne uszkodzenia nie mogą stać się ogniskami przyspieszonej korozji i powstania zagrożenia w postaci stopniowego spadku wartości $R_c$, co mogłoby skutkować skróceniem przewidywanego okresu trwałości urządzenia?

W celu uzyskania odpowiedzi na powyższe pytania przeprowadzono badania mikroskopowe stanu struktury w przekrojach poprzecznych przecinających obszary uszkodzone. Odpowiedź na drugie pytanie jest wynikiem przeprowadzonych badań wytrzymałości na ściskanie w płaszczyźnie próbek zawierających uszkodzenia BVID, które zostały poddane działaniu agresywnego płynu przez 100 lub 1000 godzin.

## BADANIA MIKROSKOPOWE USZKODZEŃ BVID

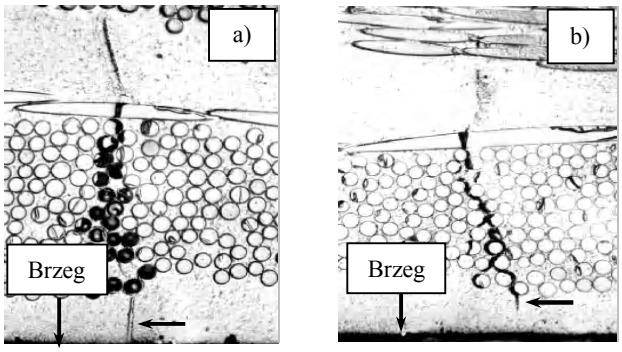
W celu dokonania mikroskopowej oceny struktury materiału wykonano szereg szlifów na próbkach zawierających uszkodzenia BVID. Niektóre próbki zostały uprzednio poddane działaniu 5% roztworu $H_2SO_4$, który jest stosowany jako medium służące do modelowania oddziaływania agresywnych ścieków na kompozyty polimerowe (wg normy ASTM D 3681). Płaszczyzny szlifów pokrywały się ze wzdłużną płaszczyzną symetrii próbki. Na rysunku 5 jest pokazany układ pęknięć poprzecznych stwierdzony przy brzegu próbki obciążonej impulsem siły o energii 3 J [12]. Po uderzeniu próbka ta była poddana przez 1000 h działaniu roztworu kwasu. Wcześniej stwierdzono, że uderzania o takiej wartości energii nie powodowały istotnych zmian wytrzymałości materiału na ściskanie, pomimo iż ślad uderzenia oznaczający powstanie nieodwracalnych zmian był widoczny gołym okiem. Pęknięcie lewe (rys. 6a) wychodzi na powierzchnię płytki, co oznacza, że przypuszczalnie

przez 1000 h zachodziła tędy infiltracja roztworu kwasu do wnętrza struktury laminatu. Potwierdzeniem tego jest obraz poprzecznego pasma rovingu na rysunku 6a. Ciemne obszary na widocznych kołowych przekrojach włókien oznaczają przypuszczalnie włókna w znacznym stopniu zniszczone przez działanie kwasu. Wskutek rozpadu struktury włókna i warstwy międzyfazowej takie miejsca wykruszają się podczas polerowania i pod mikroskopem stanowią ciemne pola. Zastosowany czas działania kwasu (1000 h) spowodował zatem wyraźną lokalną degradację zbrojenia i granicy międzyfazowej. Pęknięcie z prawej strony nie wychodzi na powierzchnię płytki, lecz pozostaje odizolowane od otoczenia przez cienką warstewkę żywicy. Potwierdza to wygląd włókien, na których nie widać śladów degradacji korozyjnej (rys. 6b).




Rys. 5. Przekrój przez uszkodzenie BVID; od strony spodniej energia uderzenia wynosiła 3 J

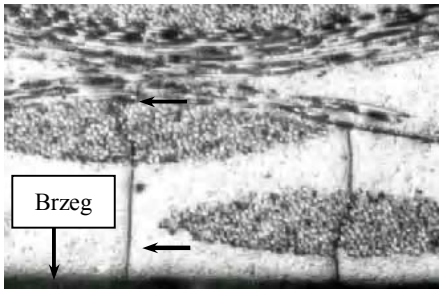
Fig. 5. Cross-section through the lower part of a BVID damage zone; impact energy = 3 J




Rys. 6. Powiększenie pęknięcia poprzecznego warstwy przy powierzchni laminatu widocznego na rysunku 5 z lewej (a) oraz prawej (b) strony

Fig. 6. Magnified view of a transverse crack through a layer located near the specimen surface. The same cracks are denoted by arrows in Fig. 5 (left-/righthand = a/b, respectively)

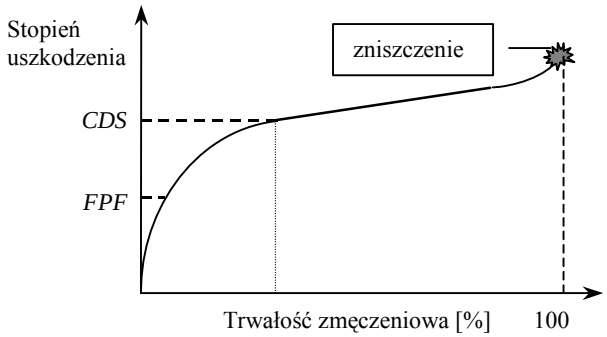
Na rysunku 7 jest pokazana struktura laminatu uszkodzonego przez uderzenie o energii 5 J w obszarze przeciwległym do miejsca uderzenia. Gęstość pęknięć poprzecznych wychodzących na powierzchnię próbki jest około dwukrotnie większa od zaobserwowanej przy energii wynoszącej 3 J i przypuszczalnie odpowiada gęstości stanu nasycenia CDS [13]. W wielu ważnych zastosowaniach byłby to stopień uszkodzenia wyraźnie przekraczający poziom uznawany za strukturalną definicję zaistnienia stanu niebezpiecznego. Najczęściej jest to powstanie pierwszego pęknięcie poprzecznego, tj. stan FPF (*first ply failure*).




Rys. 7. Pęknięcia poprzeczne po stronie przeciwległej; energia uderzenia równa 5 J

Fig. 7. Transverse cracks as seen on the opposite side of specimens; impact energy = 5 J

Na rysunku 8 jest pokazany schematyczny wykres kinetyki procesu rozwoju uszkodzeń w polimerowych kompozytach konstrukcyjnych o wzmocnieniu z włókien. W kompozytach chemoodpornych stosowanych w budowie instalacji [14], w konstrukcjach lotniczych [15] oraz wielu innych typach urządzeń technicznych naprężenia lub odkształcenia dopuszczalne nie powinny osiągać wartości odpowiadających momentowi powstania pierwszych pęknięć poprzecznych (FPF). Wiąże się to z ryzykiem wystąpienia korozji naprężeniowej, która wskutek łatwej infiltracji substancji agresywnych z otoczenia do strefy warstw nośnych mogłaby spowodować znaczne skrócenie okresu trwałości elementu. W pracy [4] opisano przypadek cysterny wykonanej z laminatu poliestrowo-szklanego, która wskutek wystąpienia korozji naprężeniowej uległa awarii po niespełna roku użytkowania. Przykład ten pokazuje szybkość rozwoju korozji naprężeniowej w laminatach.

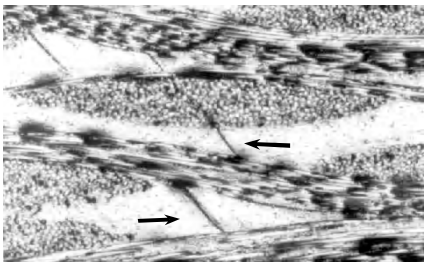



Rys. 8. Schematyczne przedstawienie procesu degradacji zmęczeniowej laminatów

Fig. 8. Schematic representation of the fatigue degradation process in laminates

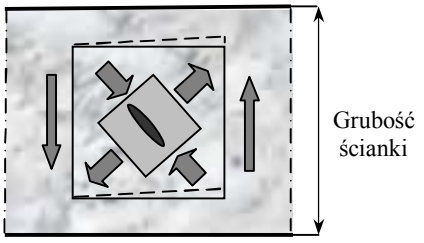
Uszkodzenia stwierdzone przy najniższym badanym poziomie energii impulsu obciążenia udarowego (3 J), który wynosi około 50% wartości progu energetycznego określonego w próbach wytrzymałościowych, przekraczają wartość graniczną określoną w kryterium FPF.

Uderzenie o energii 5 J powodowało powstanie licznych, biegnących ukośnie pęknięć warstw (rys. 9). Uprzywilejowanym miejscem ich powstawania jest środkowa strefa grubości ścianki w rejonie obejmującym otoczenie powierzchni stożka pokazanej na rysunku 1. Pęknięcia te są związane z krótkotrwałym działaniem siły poprzecznej. Mechanizm ich powstawania jest wyjaśniony na rysunku 10.



Rys. 9. Pęknięcia ukośne spowodowane przez ścinanie podczas uderzenia poprzecznego o energii 5 J

Fig. 9. Inclined cracks due to shear originated in specimens subject to 5 J impact




Rys. 10. Mechanizm powstawania skośnych pęknięć warstw pod wpływem siły poprzecznej

Fig. 10. Physical mechanism underlying the onset of inclined cracks due to shearing forces

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Uszkodzenia wywołane w laminatach przez uderzenia poprzeczne utrudniają rozpowszechnienie tych materiałów w technice. Podczas wcześniejszych prób stwierdzono, że uszkodzenia udarowe (BVID) obniżały znacznie wytrzymałość na ściskanie ($R_c$) w płaszczyźnie badanego laminatu. Przy energii równej 18 J spadek $R_c$ sięgał 33%. Stwierdzono również, że w badanym materiale istnieje progowa wartość energii uderzenia wynosząca około 6÷7 J, poniżej której wytrzymałość $R_c$ nie obniża się (rys. 3). Istnienie progowej energii udaru w wielu laminatach potwierdzają dane literaturowe, jednakże najczęściej dotyczy to prób przy obciążeniach rozciągających. Podczas mikroskopowych obserwacji uszkodzeń BVID stwierdzono, że już najmniejsze zastosowane wartości energii uderzenia (3 J) powodują pęknięcia poprzeczne warstw. Niektóre pęknięcia wychodziły na powierzchnię, umożliwiając infiltrację substancji z otoczenia do warstw nośnych. Badania polegające na wywołaniu infiltracji roztworu kwasu w obszarze uszkodzonym nie wykazały ich wpływu na wartość energii progowej spadku $R_c$. Obserwacje mikroskopowe uszkodzeń poddanych działaniu kwasu wykazały lokalną korozję włókien, co jednak nie powodowało spadku wartości $R_c$.

Z opisanych badań wynikają następujące wnioski o charakterze ogólnym:

- ocena wrażliwości laminatów na poprzeczne obciążenia udarowe na podstawie wartości wytrzymałości na ściskanie może nie wykazać uszkodzeń stwarzających zagrożenie w postaci zjawiska korozji materiału,
- określenie energii progowej impulsu obciążenia poprzecznego elementów kompozytowych przewidzianych do długotrwałej pracy powinno uwzględniać wyniki badań mikroskopowych obszaru uszkodzonego.

## LITERATURA

[1] Bełzowski A., Stasieńko J., O wpływie poprzecznych obciążeń udarowych na własności polimerowych kompozytów konstrukcyjnych, Przegląd Mechaniczny 2000, 13, 13-18.

[2] Prichard J.C., Hogg P.J., The role of impact damage in post-impact compression testing, Composites 1990, 21, 6, 503-511.

[3] Garg A.C., Delamination - a damage mode in composite structures, Eng. Fract. Mech. 1988, 29, 5, 557-584.

[4] Bollaert F., Lemasçon A., Analyse de défaillance pièces plastiques, élastomères ou composites. Guide Pratique. Wyd. CETIM, Francja 1999.

[5] Richardson M.O.W., Wisheart M.J., Reviev of low-velocity impact properties of composite materials, Composites 1996, Part A, 27A, 1123-1131.

[6] Ishikawa T., Matsushima M., Hayashi Y., Comparison and Discussion about Compression after Impact (CAI), Properties Obtained by SACMA and NASA Methodes, VIII Japan- -US Conf. on Comp. Mat., Technomic 1998, 476-485.

[7] Hull D., Yi Bing Shi, Damage mechanism characterisation in composite damage tolerance investigations, Composite Structures 1993, 23, 99-120.

[8] Oh-Yang Kwon, Doo-Hyun Hong, Non-destructive evaluation of impact damaged CFRP laminates by acoustic emission during flexural loading. Proceedings of ICCM-11, Gold Coast, Australia 1997, VI/223-229.

[9] Siow Y.P., Shim P.W., An Experimental Study of Low Velocity Impact Damage in Woven Fiber Composites, J. of Composite Materials 1998, 32, 12, 1178-1202.

[10] Verpoest I., Marien J., Devos J., Wevers M., Absorbed energy and residual strength after impact of glass fibre epoxy composites, Proceedings of ICCM-6, 1987, 3, 485-3.493.

[11] Bełzowski A., Rechul R., Stasieńko J., Ocena wpływu poprzecznych obciążeń udarowych na wytrzymałość laminatu szklano-epoksydowego, Mat. IV Konf. Metody doświadczalne w budowie maszyn, Szklarska Poręba 1999, 101-112.

[12] Bełzowski A., Degradacja mechaniczna kompozytów polimerowych. Metody oceny wytrzymałości długotrwałej i stop- nia uszkodzenia, Wrocław 2002 (w przygotowaniu do druku).

[13] Bełzowski A., O praktycznych aspektach badań nad kinetyką rozwoju pęknięć poprzecznych w kompozytach war-

stwowych, Mat. I Konf. Polimery i Kompozyty Konstrukcyjne, Kozubnik 95, SIMP, Gliwice 1995, 95-101.
[14] Eckold G.C., A design method for filament wound GRP pressure vessels and pipework, Composites 1985, 16, 1, 41-47.
[15] Kaczkowski J., Komputerowe wspomaganie obliczeń konstrukcji kompozytowych, Mat. III Szkoły Kompozytów nt. Modelowanie i analiza konstrukcji kompozytowych, Wisła 2001, 41-64.

Recenzent
Andrzej P. Wilczyński