

Krystyna Imielińska¹, Rafał Wojtyra²

Politechnika Gdańska, ul. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk

WPŁYW RODZAJU ZBROJENIA I KOLEJNOŚCI UŁOŻENIA WARSTW NA TOLERANCJĘ ZNISZCZEŃ WYWOŁANYCH UDARAMI O MAŁEJ PRĘDKOŚCI LAMINATÓW EPOKSYDOWYCH ZBROJONYCH WŁÓKNEM WĘGLOWYM, SZKLANYM, KEVLAROWYM I HYBRYDOWYCH

W pracy, będącej fragmentem projektu dotyczącego wprowadzania nowych materiałów kompozytowych do budowy małych jednostek pływających, porównano zachowanie pod obciążeniem statycznym i udarowym laminatów epoksydowych zbrojonych tkaniną węglową lub szklaną z własnościami laminatów hybrydowych zawierających zarówno zbrojenie szklane, jak i węglowe w różnej ilości i układzie geometrycznym. Określono odporność udarową za pomocą kryterium poudarowej wytrzymałości na ściskanie związanej z wielkością pola zniszczeń w laminacie poddanym uderzeniu o określonej energii. Kryterium to można też określić mianem tolerancji zniszczeń spowodowanych przez udary o małej prędkości.

EFFECT OF TYPE OF REINFORCEMENT AND STACKING SEQUENCE ON LOW VELOCITY IMPACT DAMAGE TOLERANCE FOR HYBRID WOVEN CARBON, GLASS, KEVLAR-EPOXY LAMINATES

Interest in composite materials for structural components has increased rapidly in the last decade. Proper selection of fibre and matrix may be expected to provide weight savings up to 50 percent over structural metals as well as improvements in fatigue endurance and corrosion resistance, reduced manufacturing costs and precise tailoring of material properties to service loads. In spite of these and other advantages which can be achieved with composite materials their use in many applications has been limited by concerns over their susceptibility to impact damage during the manufacturing process and in service as well as the corresponding reductions in mechanical properties resulting from such damage [1-3]. Consequently damage resistance and damage tolerance under impact loading can be regarded as most important characteristics of fibre reinforced composites [4]. Depending on the characteristics of composite constituents the choice of fibre and matrix type, laminate configuration and loading geometry the damage process can be a very complex combination of energy absorption mechanisms. In particular the selection of the types of fibres, form of reinforcement (woven or unidirectional) as well as stacking sequence play an important role in determining failure mechanisms, the extent of damage and the threshold energy of the composite. Often this damage may not be visible from the laminate surface, but its presence substantially reduces the mechanical properties of the composite, especially the in-plane stiffness and strength [7].

The results presented in this paper are a part of a broader study of new laminates for marine structures. The purpose of the project was to characterise the impact response and impact damage tolerance of four different laminates considered for use in construction of small ships. Woven carbon fabric and glass fabric laminates have been compared with the behaviour of laminates with different stacking sequence of carbon and glass layers (E/C/E/C/E/C/E, C/E/C/C/E/C, C/C/E/E/E/C/C) as well as Kevlar-glass and Kevlar-carbon fabric laminates. Impact behaviour was assessed on (100x100 mm) square laminate specimens using a dropweight facility. Weights with a hemispherical nose of 12 mm in diameter were dropped through 1 m along the rails to hit the laminate at the centre of the span of the specimen freely supported on the steel plate with a central, circular opening 38 mm in diameter. The weights were adjusted to give the incident energies 10+64J. Three specimens have been tested for each impact energy level. The impact resistance was assessed in terms of internal delamination surface area resulting from impact of a given incident energy. The extent of impact damage has been estimated by ultrasonic C-scan technique or by visual inspection. The first method has been applied to the specimens containing carbon fibres which were opaque to light. The second approach was used in the case of glass and Kevlar-glass laminates for which visual observation of internal damage against the strong source of light was possible.

Compression after impact tests were performed on impacted square specimens (100x100 mm) using abtubucking device. The graphs of impact damage area vs. normalised impact energy have been plotted and compression strength after impact has been related to the area of impact damage. For comparison, the same plots have been analysed for Kevlar-carbon fabric and Kevlar-glass fabric laminates. Tensile and bending strengths have also been compared for different laminates.

It has been concluded that all carbon-glass laminates had similar post-impact compression strength for the same area of impact damage regardless the stacking sequence. Kevlar-glass fabric laminate showed similar damage tolerance and mechanical properties as carbon-glass laminates. Despite the high price laminates reinforced with Kevlar-carbon fabric were importantly inferior than other materials. Regarding low velocity impact damage tolerance, in the case when the extreme strength and stiffness are not required, expensive carbon laminates tested in the present work can potentially be replaced by cheaper carbon glass-epoxy laminates of diverse stacking sequence as well as by Kevlar-glass fabric laminates.

¹dr inż., ² mgr inż.

WPROWADZENIE

Kompozyty warstwowe zbrojone włóknami ciągłymi stanowią dziś ważną grupę materiałów konstrukcyjnych stosowanych powszechnie w budowie środków transportu. Mimo ogromnego zastosowania wiedza na temat zachowania tych materiałów w eksploatacji jest ciągle ograniczona ze względu na mnogość czynników, które mają wpływ na zachowanie materiałów kompozytowych w porównaniu z materiałami litymi, takich jak: własności materiału osnowy i włókien, udział objętościowy włókien, ilość warstw zbrojenia, typ zbrojenia (włókna ciągle jednokierunkowe, tkanina jednorodna lub hybrydowa), wzajemna orientacja włókien w warstwach, jakość powiązania składników, technologia wykonania laminatu [1].

Problem przewidywania zachowania laminatów w eksploatacji dodatkowo komplikuje fakt ich wrażliwości na działanie uderzeń, które mogą wywołać znaczne zniszczenia podpowierzchniowe (niewidoczne gołym okiem), nawet przy niewielkiej energii i prędkości uderzenia, obniżające wytrzymałość laminatu. Przykładem takiej sytuacji może być uderzenie wywołane spadającym narzędziem w trakcie prac konserwacyjnych danego obiektu lub uderzenie w materiał przedmiotu znajdującego się na drodze przemieszczającego się środka transportu. W badaniach laboratoryjnych takie uderzenia imitują spadające ciężary, których prędkość w chwili uderzenia jest rzędu kilkunastu m/s. Rozróżnienia uderzeń o małej i dużej prędkości można też dokonać w oparciu o towarzyszące im zjawiska. Przy dużej prędkości uderzenia obszar odkształcenia elementu jest silnie ograniczony, zlokalizowany w strefie bezpośredniego kontaktu obiektu uderzającego i materiału. W uderzeniach o małej prędkości - przeciwnie, w czasie kontaktu bijąca z materiałem cały element ulega odkształceniu, gdy fale naprężeń rozprzestrzeniają się do granicy przedmiotu i odbijają wielokrotnie [2, 3].

Istotna jest znajomość odporności udarowej nowych materiałów kompozytowych przeznaczonych do budowy środków transportu (np. małych jednostek pływających), wyrażanej za pomocą pola największej delaminacji w

laminacie oraz przez poudarową wytrzymałość na ściskanie (związaną z wielkością pola zniszczeń w laminacie poddanym uderzeniu o określonej energii), nazywaną tolerancją zniszczeń wywołanych przez udary. Wybór poudarowej wytrzymałości na ściskanie, a nie np. na rozciąganie, jako kryterium tolerancji zniszczeń, wiąże się z wrażliwością wytrzymałości na ściskanie laminatów na wszelkie zniszczenia powstające na skutek uderzeń [4, 6]. Dane uzyskane z badań tak rozumianej odporności udarowej mogą być podstawą klasyfikacji różnych materiałów stosowanych w środkach transportu, produkowanych za pomocą tej samej technologii.

W niniejszej pracy, będącej fragmentem projektu dotyczącego wprowadzania nowych materiałów kompozytowych do budowy małych jednostek pływających, przeprowadzono analizę celowości stosowania laminatów hybrydowych zamiast tradycyjnych laminatów szklanych lub węglowych, biorąc pod uwagę kryterium odporności udarowej oraz kryterium ekonomiczne. Przedmiotem badań były laminaty zbudowane z warstw tkanin jednorodnych włókien szklanych lub węglowych oraz hybrydowe - szklano-węglowe o zróżnicowanej budowie. Wyniki porównano z własnościami laminatów hybrydowych badanych poprzednio przez autorów [7], w których zastosowano tkaniny hybrydowe, składające się z dwóch rodzajów włókien: szklanych i Kevlarowych oraz węglowych i Kevlarowych.

MATERIAŁY

Laminaty przeznaczone do badań wykonano z ortotropowych tkanin węglowej i szklanej (1:1), ułożonych w zróżnicowanej kolejności, nasyconych żywicą epoksydową metodą próżniową (wszystkie tkaniny i żywica - produkcji SP Systems). Szczegółowy opis składników, budowy, ilości i rodzaju warstw przedstawiono w tabeli 1. Orientacyjny udział objętościowy włókien wynosił we wszystkich laminatach $V_f = 50\%$.

Wyniki uzyskane w pracy porównano z analogicznymi wynikami dla laminatów wykonanych z tkanin

TABELA 1. Opis budowy laminatów
TABLE 1. Description of laminates structure

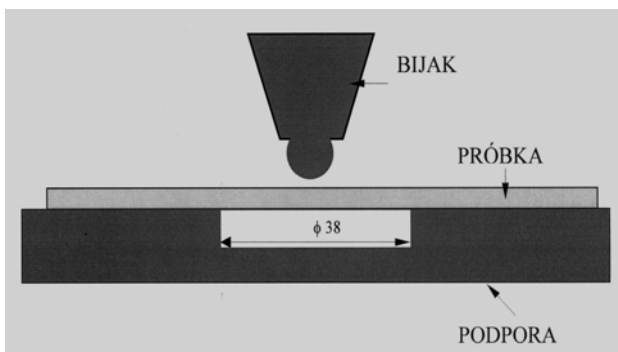
| Rodzaj włókien | Typ zbrojenia | Osnowa | Ilość warstw | Kolejność ułożenia warstw | Grubość g mm | Cena m ² PLN |
|---------------------------|------------------------------------|--|--------------|---------------------------|--------------|-------------------------|
| 1. szkło E | tkanina STR66-110 | Żywica epoksydowa SP 115, utwardzacz: N.C.+Butanox1:3 utwardzanie:2,5 h w próżni (worek próżniowy), 4 h w 60°C w piecu | 5 | Jednorodny E (1) | 2,3 | 150 |
| 2. węgiel C | tkanina RC300P | | 7 | Jednorodny C (2) | 3,3 | 2000 |
| 3. szkło+węgiel | tkanina STR66-110 + tkanina RC300P | | 7 | E/C/E/C/E/C/E (3) | 3,5 | 800 |
| 4. węgiel C+szkło E | tkanina RC300P + tkanina STR66-110 | | 6 | C/E/C/C/E/C (4) | 2,9 | 1200 |
| Laminaty badane wcześniej | | | | | | |
| 5. węgiel C1 | tkanina RC660T | Jak wyżej | 7 | C (5) | 4,6 | 2180 |
| 6. węgiel C1 i szkło E | tkaniny RC660T + STR 66-110 | | 8 | C/C/E/E/E/E/C/C (6) | 4 | 1440 |
| 7. Kevlar-węgiel Kev.-C1 | RCA 180 | | 18 | Kev.-C (7) | 5 | 2080 |
| 8. Kevlar-szkło Kev.E | REA 390S | | 10 | Kev.-E (8) | 4 | 1070 |

hybrydowych zawierających włókna Kevlarowe, szklane i węglowe oraz laminatu zbudowanego z jednorodnych warstw tkaniny węglowej i szklanej. Dane dotyczące budowy tych laminatów przedstawiono w tabeli 1 [7].

PRZEBIEG I WYNIKI BADAŃ

Badania udarowe

Charakterystyki zniszczeń udarowych pod wpływem spadającego ciężaru określono na próbkach kwadratowych (100x100 mm) laminatów z użyciem urządzenia ze spadającym ciężarem [8]. Stalowy bijak o zróżnicowanym ciężarze i sferycznej końcówce o średnicy 12 mm spuszczano z wysokości ok. 1 m wzdłuż prowadnic tak, że uderzały w środku próbki wolno podpartej na płycie z otworem o średnicy 38 mm. Ciężary dobrano tak, aby otrzymać energię uderzenia w zakresie 10÷64 J. Zbadano po trzy próbki dla każdego poziomu energii uderzenia. Odporność udarową oceniono za pomocą kryterium pola zniszczeń odpowiadającego danej energii uderzenia odniesionej do grubości próbki [9] oraz poudarowej wytrzymałości na ściskanie próbek zawierających zniszczenia.

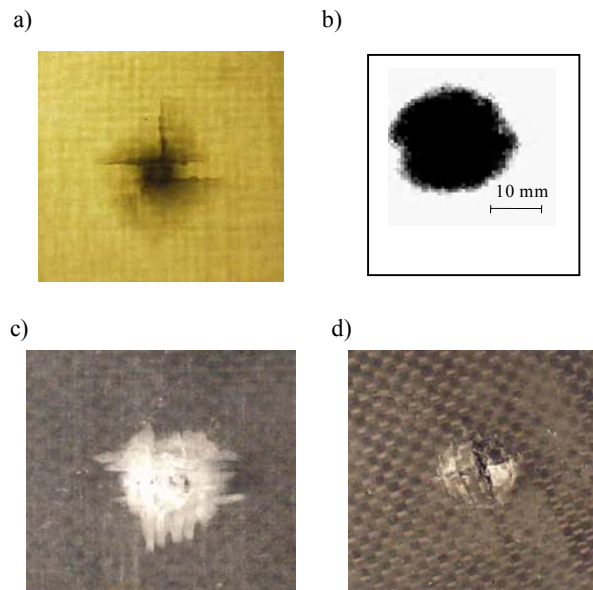


Rys. 1. Schemat sposobu obciążania próbki w próbie udarowej spadającego ciężaru

Fig. 1. Drop-weight impact test set-up

Rozmiar zniszczeń wywołanych udarami o danej energii określono w dwojaki sposób: optycznie i ultradźwiękowo. Dla materiałów przepuszczających światło fotografowano podświetlone próbki, otrzymując obszar zaciemniony w miejscach, gdzie doszło do delaminacji. Następnie określano pole obszaru zaciemnionego za pomocą ilościowej analizy obrazu. W przypadku próbek zawierających włókno węglowe ocena maksymalnego obszaru zniszczeń wewnętrznych metodą optyczną była niemożliwa, gdyż nie przepuszczają one światła, dlatego posłużono się metodą ultradźwiękową C-scan. Szczegóły zastosowanej metody zostały wcześniej opisane przez autorów [10, 11]. Przykład obrazu zniszczeń uzyskanego metodą optyczną oraz obrazu ultradźwiękowego próbek zawierających wewnętrzne delaminacje przedstawiono na rysunku 2.

Z uszkodzonych płytek wycięto próbki do badań mikrostrukturalnych w celu określenia charakteru zniszczeń w laminacie. Przykład struktury kompozytu po udarze przedstawiono na rysunku 3.



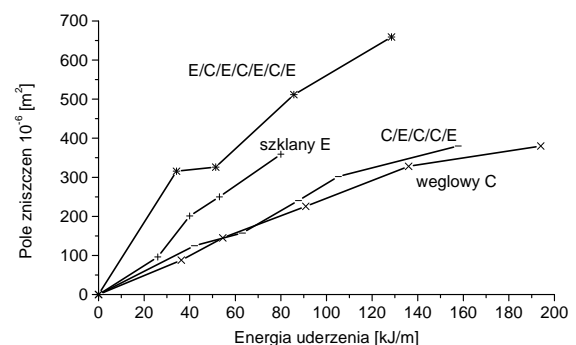
Rys. 2 a) Przykład obrazu zniszczeń udarowych w laminacie szklanym, uzyskany metodą optyczną, (b) obraz ultradźwiękowy C-scan zniszczeń udarowych w próbce laminatu, (c, d) widok próbek laminatu hybrydowego, szklano-węglowego o układzie warstw E/C/E/C/E/C/E i węglowo-szklanego o układzie warstw: C/E/CC/E/C po udarze o energii 45 J

Fig. 2 a) Optical image of impact damage, (b) ultrasonic C-scan image of impact damage, (c, d) examples of impact damage (45 J) in hybrid woven carbon-glass fibre laminates (E/C/E/C/E/C/E and C/E/CC/E/C)



Rys. 3. Przekrój laminatu węglowego zawierającego wewnętrzną delaminację

Fig. 3. Micrograph of internal structure of woven carbon fiber laminate after impact



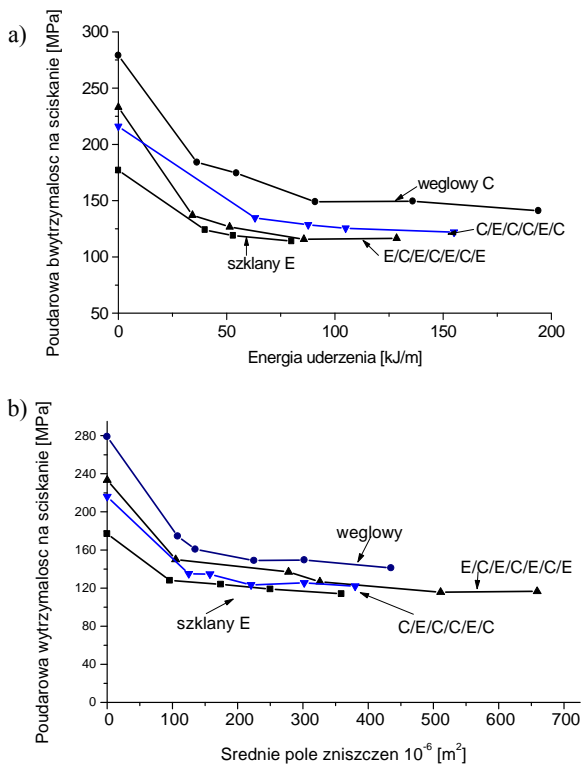
Rys. 4. Wykres pola zniszczeń udarowych w funkcji znormalizowanej energii uderzenia (E/g) dla czterech laminatów

Fig. 4. Impact damage surface area vs. normalised impact energy (E/g) for four laminates

Na rysunku 4 pokazano wykresy zależności pola delaminacji w laminatach w funkcji energii uderzenia znormalizowanej względem grubości.

Próby wytrzymałości na ściskanie

W celu określenia tolerancji zniszczeń uderowych w laminatach przeprowadzono próby ściskania próbek nieuszkodzonych (100x15 mm) oraz uszkodzonych płytek (100x100 mm) zawierających delaminacje o zróżnicowanym rozmiarze w zależności od energii uderu. Próby przeprowadzono za pomocą maszyny hydraulicznej Instron w specjalnym uchwycie zapobiegającym wyboczeniu próbki, rutynowo stosowanym w tego typu badaniach laminatów [12]. Wykresy poudarowej wytrzymałości na ściskanie w funkcji znormalizowanej energii uderu E/g (energii odniesionej do grubości próbki) przedstawiono na rysunku 5.



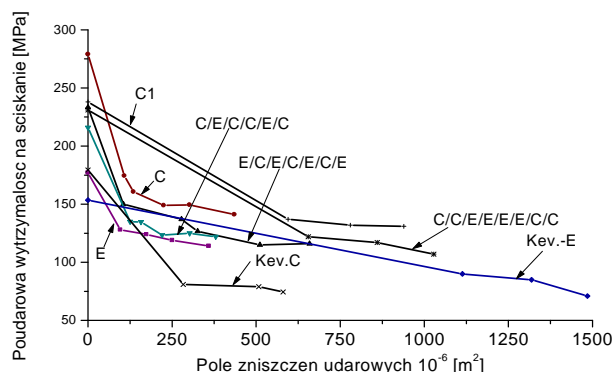
Rys. 5. Wykresy poudarowej wytrzymałości na ściskanie w funkcji: a) znormalizowanej energii uderu E/g (energia uderzenia odniesiona do grubości próbki), b) pola zniszczeń uderowych

Fig. 5. Compression after impact strength graphs as a function of: a) normalised impact energy (E/g), b) area of impact damage

ANALIZA WYNIKÓW

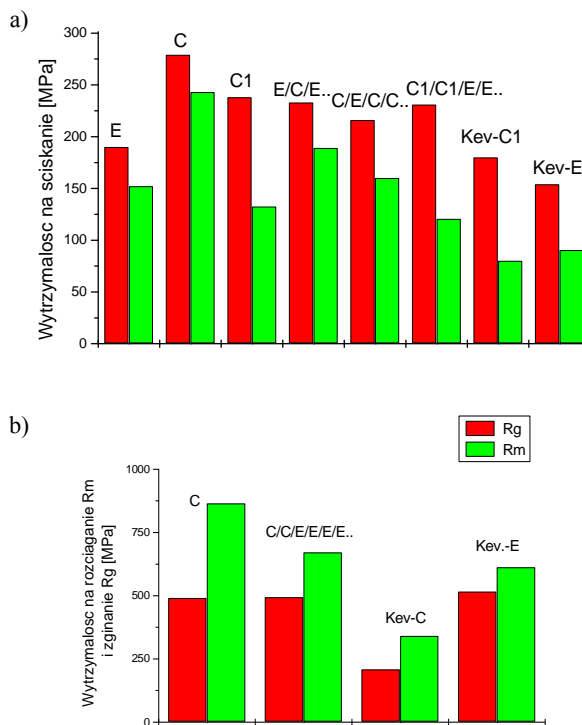
W celu wyjaśnienia różnic w odporności na uderzy o małej prędkości badanych laminatów poszerzono zakres analizowanych materiałów o laminaty badane w poprzedniej pracy [7]. Zbiorcze wykresy porównujące poudarową wytrzymałość na ściskanie tych dwóch grup

materiałów w funkcji pola zniszczeń przedstawiono na rysunku 6. Na rysunku 7 porównano wytrzymałość na ściskanie, rozciąganie i zginanie różnych laminatów.



Rys. 6. Wykresy porównujące poudarową wytrzymałość na ściskanie w funkcji pola zniszczeń dla laminatów badanych i z [7]

Fig. 6. Comparative graphs of compression after impact strength as a function of impact damage area for laminates tested and from [7]



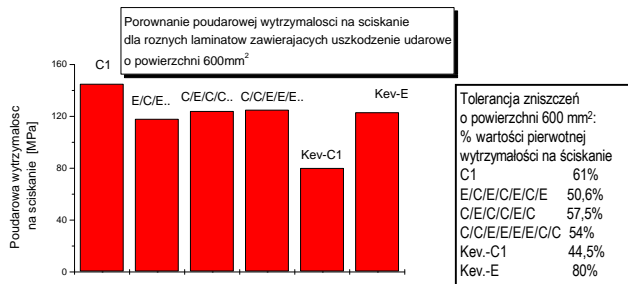
Rys. 7. Wykresy porównawcze: a) wytrzymałości na ściskanie, b) wytrzymałości na rozciąganie i zginanie dla różnych laminatów (średnie wartości odpowiadające pierwszemu pęknięciu i całkowitemu zniszczeniu)

Fig. 7. Comparative graphs of: a) compression strength, b) tensile and bending strengths for different laminates (mean values at first fracture and laminate failure)

Interesujące wydaje się, iż mimo znaczących różnic w polu powierzchni zniszczeń (rys. 4) obserwowanych dla laminatów szklano-węglowych o różnej kolejności ułożenia warstw i ilości poszczególnych warstw poudarowa wytrzymałość na ściskanie, będąca miarą tolerancji zniszczeń, jest bardzo zbliżona (rys. rys. 5 i 6). Do-

tyczy to również laminatu z serii wcześniej badanych. Przy budowie C/E/C.. (4) pole zniszczeń jest niewiele wyższe niż laminatu węglowego. Wyższą poudarową wytrzymałość na ściskanie posiada jedynie około dwukrotnie droższy laminat węglowy.

Przedstawione na rysunku 8 porównanie tolerancji zniszczenia o powierzchni 600 mm² dla sześciu różnych laminatów potwierdza, że laminaty szklano-węglowe posiadają bardzo dobrą tolerancję uszkodzeń udarowych.



Rys. 8. Porównanie poudarowej wytrzymałości na ściskanie odpowiadającej obszarowi zniszczeń udarowych 600 mm² jako miary tolerancji zniszczeń laminatów: węglowego oraz zbrojonych tkaniną węglową i szklaną (o różnej kolejności ułożenia warstw), Kevlarowo-węglową i Kevlarowo-szklaną

Fig. 8. Comparative graphs of compression after impact strength corresponding to the damage area of 600 mm² as a measure of impact damage tolerance for laminates reinforced with woven carbon fibres, carbon-glass (diverse stacking sequence), hybrid woven Kevlar-carbon and Kevlar-glass

Zróznicowanie spadku wytrzymałości na skutek udaru dla laminatów o tej samej ilości warstw węgla (ale różnej ilości warstw szkła i kolejności warstw) w granicach 54÷57% nie pozwala sformułować zdecydowanego wniosku odnośnie do przewagi którejkolwiek kolejności ułożenia. Potwierdzają to porównawcze dane wytrzymałości różnych laminatów. Widać, że najmniej korzystne pod względem wytrzymałościowym i odporności udarowej są laminaty wykonane z tkaniny hybrydowej Kevlar-węgiel. Nasycone badaną żywicą nie wykazały one odporności udarowej i wytrzymałości na rozciąganie i zginanie, jak też tolerancji zniszczeń uzasadniających ich bardzo wysoką cenę. Natomiast badane własności laminatów na bazie tkaniny Kevlar-szkło okazały się zbliżone do własności laminatów węglowo-szklanych, również pod względem ceny.

Ogólnie można stwierdzić, że badane w pracy laminaty węglowo-szklane zachowują się korzystnie w warunkach udarów o małej prędkości i mogą stanowić substytuty laminatów węglowych w zastosowaniach, gdzie nie jest wymagana ekstremalna wytrzymałość i sztywność, natomiast ma znaczenie umiarkowana cena.

WNIOSKI

1. Najwyższą tolerancję zniszczeń udarowych wykazały laminaty zbrojone tkaniną węglową.

2. Wszystkie badane laminaty hybrydowe węglowo-szklane o różnej ilości i kolejności ułożenia warstw tkaniny węglowej i szklanej wykazały bardzo dobrą tolerancję zniszczeń udarowych, nieco niższą niż laminaty węglowe.
3. Nie zaobserwowano dużych różnic w zakresie badanych własności wytrzymałościowych i tolerancji zniszczeń udarowych pomiędzy badanymi laminatami węglowo-szklanymi, zatem przy wyborze jednego z tych materiałów decydujące znaczenie może mieć jego cena.
4. Biorąc pod uwagę badane własności i cenę laminaty na bazie tkaniny Kevlar-szkło wykazują podobne zachowanie jak laminaty zbrojone tkaniną szklaną i węglową, natomiast laminaty na bazie tkaniny Kevlar-węgiel są zdecydowanie gorsze i bardzo drogie.

Wyniki uzyskane w pracy wskazują, iż zastępowanie badanych laminatów węglowych tańszymi, epoksydowo-węglowymi lub Kevlarowo-szklanymi nie spowoduje znaczącego obniżenia tolerancji uszkodzeń wywołanych udarami o małej prędkości.

LITERATURA

- [1] Matthews F.L., Rawlings R.D., Composite Materials, Engineering and Science, Chapman & Hall 1994.
- [2] Abrate S., Impact on laminated composite materials, Applied Mechanics Review 1991, 44, 4, 155-190.
- [3] Schoepfner, Abrate S., Delamination threshold loads for low velocity impact on composite materials, Composites 2000, 31, 9.
- [4] Cantwell W.J., Morton J., The impact resistance of composite materials - a review, Composites 1991, 22, 5, 347-362.
- [5] Richardson M.O.W., Wisheart M.J., Review of low velocity impact properties of composite materials, Composites 1996, 27A, 1123.
- [6] Yasunobu Hirai, Hiroyuki Hamada, Jang-Kyo Kim, Impact response of woven glass-fabric composites - 1, Effect of fibre surface treatment, Composites Science and Technology 1998, 58, 91-104.
- [7] Imielińska K., Wojtyra R., Cstaings M., Impact resistance and damage tolerance of hybrid: carbon, glass, Kevlar/epoxy laminates, XVth Physical Metallurgy and Materials Science Conference on Advanced Materials & Technologies AMT 2001, Gdańsk-Jurata, 16-20 September 2001.
- [8] Imielińska K., Wojtyra R., Wpływ modyfikacji osnowy epoksydowej mikrokulkami szklanymi na poudarową wytrzymałość laminatów epoksydowych zbrojonych włóknami szklanymi, Inżynieria Materiałowa 2001, 2, 102-107.
- [9] Strait L.H., Karasek M.L., Amateau M.F., Effect of stacking sequence on the impact resistance of carbon fibre reinforced thermoplastic toughened epoxy laminates, Journal of Composite Materials 1992, 26, 12, 1725-1740.
- [10] Cstaings M., Hosten B., Ultrasonics 1998, 36, 1-5, 361.
- [11] Imielinska K., Cstaings M., Haras J., Le Clezio E., Hosten B., Impact damage development in carbon reinforced composites by means of air-coupled ultrasonic C-scans and

- X radiography, Proc. 9th Int. Scientific Conference AMME'2000, Gliwice-Sopot-Gdańsk, 11-14 Oct. 2000.
- [12] Cantwell W.J., Curtis O.T., Morton J., An assessment of the impact performance of CFRP reinforced with high strain carbon fibre, Composites Science and Technology 1986, 25, 133-148.

Recenzent
Andrzej P. Wilczyński