



Rafał Wojtyra¹, Krystyna Imielińska^{2*}

¹ Politechnika Gdańska, Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa, ul. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk, Poland

² Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Materiałowej, ul. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk, Poland

e-mail: *kimielin@pg.gda.pl

Otrzymano (Received) 11.01.2007

BADANIA PĘKANIA UDAROWEGO W KONSTRUKCJACH PRZEKŁADKOWYCH POLIESTROWO-SZKLANYCH Z RDZENIEM Z PIANKI PVC

Porównano podatność do pęknięcia udarowego trzech konstrukcji przekładkowych z okładkami z laminatu poliestrowo-szklanego i rdzeniem z pianki PVC za pomocą dynamicznych charakterystyk obciążeń/odkształceń oraz badań mikrostrukturalnych. Zastosowano trzy rodzaje spoiwa (Scott Bader) do połączenia okładek z rdzeniem: spoiwo dwufazowe z twardym napętniaczem, spoiwo lekkie z napętniaczem w postaci mikrosfer oraz żywicę poliestrową (przyklejanie pianki do nieutwardzonych powłok). Obciążenie inicjacji pęknięć było niezależne od spoiwa i wyniosło ok. 2,5 kN dla wszystkich próbek. W badaniach quasi-statycznych wartość ta okazała się niższa: 1,2+1,7 kN. Największą podatność do pęknięcia poprzez rdzeń wykazały próbki ze spoiwem dwufazowym zawierającym twarde cząstki. Badania sekwencji pęknięcia próbek przy użyciu kamery do szybkiej fotografii pozwoliły ustalić, że powodem tego była słaba adhezja na granicy spoiwo-pianka (pęknięcie miało charakter adhezyjny) w przeciwieństwie do próbek z lekkim spoiwem zawierającym mikrosfery, gdzie pęknięcie miało charakter kohezyjny. Najskuteczniejszym w warunkach udaru spoiwem okładek i rdzenia okazała się sama żywica poliestrowa w procesie formowania „na mokro”.

Słowa kluczowe: laminaty, kompozyty polimerowe, konstrukcje przekładkowe, badania udarowe

IMPACT FAILURE IN POLYESTER-GLASS/PVC FOAM CORE SANDWICH STRUCTURES

Impact resistance of glass/polyester-PVC foam core sandwich structures was studied using instrumented impact tests. The efficiency of three face core bonding agents was estimated: the two Scott Bader adhesives (the high density, and the low density) and polyester resin (wet lay-up). The load (deflection-) time plots were analyzed in terms of the threshold load for impact damage and maximum impact load. With the aid of high-speed photography the damage initiation load was found approximately 2.5 kN, independent of the adhesive type compared to 1.2+1.7 kN obtained in the quasi-static indentation tests. It was found that for low velocity impact loading high density adhesive was the least effective face/core bonding agent since the core crack originated from the adhesive/core interfacial fracture while for the low density bonding agent cohesive fracture occurred. Resin-bonded specimens were most resistant to the development of the face/core fracture.

Keywords: laminates, polymer composites, sandwich structures, impact testing

WPROWADZENIE

Konstrukcje typu sandwich (przekładkowe) z okładką laminatu polimerowego, a rdzeniem z pianki PVC lub aramidowego plastra miodu są często stosowane w budowie kadłubów okrętowych, w szczególności trałowców i okrętów patrolowych oraz katamaranów i jachtów regatowych, a także statków rybackich. Materiały te zapewniają dużą odporność na korozję i wysoki stosunek sztywności do masy, co przyczynia się m.in. do ograniczenia kosztów eksploatacji jednostek, są też amagnetyczne, co ma znaczenie w zastosowaniach militarnych. Wiadomo jednak, że materiały warstwowe są podatne na zniszczenia spowodowane uderzeniem drobnych obiektów o małej energii, w wyniku których

dochodzi do delaminacji i oddzielenia rdzenia od powłok. Takie uszkodzenia wpływają na obniżenie wskaźników wytrzymałościowych konstrukcji oraz przyspieszają pochłanianie wody [1, 2]. Konieczne są zatem badania czynników, które wpływają na jakość produkowanych materiałów, takich jak: rodzaj materiałów składowych okładek, rodzaj spoiwa łączącego okładki z rdzeniem oraz geometria laminatu i rdzenia [3-6].

Szerokie badania odporności udarowej konstrukcji przekładkowych przeprowadził Wen i inni [6], przedstawiając charakterystyki dynamiczne i quasi-statyczne obciążeń i odkształceń przy różnych geometriach bijaka oraz grubościach rdzenia. Stwierdzono, że najistotniej-

szą rolę w absorpcji energii uderzenia odgrywają własności laminatu, natomiast grubość rdzenia wpływa na mechanizm zniszczenia [6].

Duże znaczenie w kształtowaniu odporności udarowej ma sposób wytwarzania konstrukcji przekładkowych. Łączenie okładek z rdzeniem z pianki PVC w procesie ciśnieniowym, wymaganym ze względu na własności powłok, niesie ze sobą ryzyko uszkodzenia pianki wzdłuż granicy z laminatem, dlatego wg Abrate [2] korzystniejsze jest użycie połączeń klejonych z zastosowaniem specjalistycznych spoiw.

Celem prezentowanej pracy było porównanie trzech rodzajów spoiw łączących poliestrowo/szklane okładki konstrukcji sandwich z rdzeniem z pianki PVC pod kątem skuteczności połączenia w warunkach uderzenia obiektem o małej masie.

MATERIAŁY I PRZEBIEG BADAŃ

Konstrukcje przekładkowe zbudowane były z okładek z laminatu poliestrowo-szklanego o grubości 26 mm oraz rdzenia z pianki PVC (Divynycel H80-DIAB) o grubości 20 mm. Okładki i rdzeń sklejo alternatywnie za pomocą dwóch spoiw produkcji Scott Bader: 1) Crestomer 118-6PA, o dużej gęstości, przeznaczony do różnorodnych zastosowań, 2) Crestomer 1196-2PA, o małej gęstości i dużej sile wiązania. Osnowę laminatu stanowiła preakcelerowana żywica poliestrowa Palatal U 541TV-03 (Sarżyna) utwardzona za pomocą nadtlenkowego inicjatora Metox 50. Wzmocnienie stanowiły naprzemienne warstwy maty szklanej (150 g/m^2) i ortogonalnej tkaniny szklanej (E) o splocie płóciennym (450 g/m^2) produkcji zakładów w Krośnie. Płyty laminatu ($1,1 \times 1,5 \text{ m}$) składały się z 5 warstw wzmocnienia formowanych metodą ręczną. Udział objętościowy włókien w laminacie wynosił około 40%. Płyty konstrukcji sandwich wytwarzano dwiema metodami stosowanymi w okrętownictwie: 1) utwardzane płyty laminatu po przeszlifowaniu papierem ściernym łączono z rdzeniem za pomocą jednego z klejów, 2) rdzeń przykładano do nieutwardzonego laminatu, utwardzano, formowano laminat drugiej okładki i łączono z wcześniej utwardzoną konstrukcją laminat-rdzeń. Całość utwardzano w temperaturze otoczenia, a następnie dotwardzano w 60°C i wycinano próbki do badań $150 \times 80 \text{ mm}$. Próbki sklejo klejem o małej i dużej gęstości oznakowano odpowiednio „pinkglue”, „whiteglue”, a płyty sklejo z laminatem „na mokro” bez użycia kleju - „wet”.

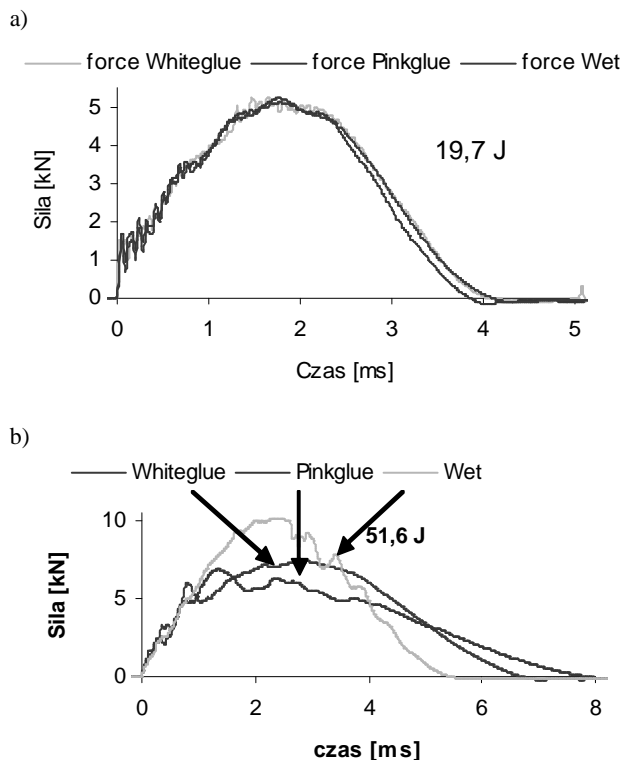
Dynamiczne badania udarowe przeprowadzono w ENSAM (LAMEFiP) w Bordeaux we Francji za pomocą stanowiska ze spadającą masą i laserowymi czujnikami, mierzącego dynamiczne odkształcenia próbki i prędkość bijaka w trakcie udaru, oraz piezoelektrycznym przetwornikiem do dynamicznego pomiaru obciążeń udarowych, umieszczonym nad bijakiem

[2]. Próbki były swobodnie podparte (35 mm) na równoległych podporach walcowych (o średnicy 35 mm) o regulowanym rozstawie. Zastosowano rozstaw 120 mm. Bijak stalowy zakończony był końcówką półkulistą o średnicy 25 mm. Sygnały z czujnika obciążenia były wysyłane do wzmacniacza i rejestrowane za pomocą komputera. Poziomą energię udaru regulowano przez zmianę wielkości masy i wysokości jej spadku. Zastosowano 4 poziomy energii w zakresie $19,7 \div 51,6 \text{ J}$. Badano od 3 do 5 próbek dla danej energii udaru i typu próbki. W celu identyfikacji momentu inicjacji zniszczeń udarowych i obserwacji przebiegu pęknięcia rejestrowano obrazy górnej lub bocznej powierzchni wybranych próbek za pomocą kamery Phantom V4 umożliwiającej uzyskanie do 11 000 obrazów na sekundę. Przeprowadzono porównawcze badania quasi-statycznego wgniatania wgłębnika o identycznych rozmiarach jak bijak w próbie udarowej i identycznej konfiguracji próbki i podpór. W celu określenia zniszczeń w próbkach badanych udarowo i quasi-statycznie wycięto próbki przekrojów w miejscu uderzenia, zgładki wyszlifowano i wypolerowano tlenkiem aluminium, a następnie przeprowadzono badania mikrostrukturalne na mikroskopie skaningowym Philips.

WYNIKI I DISKUSJA

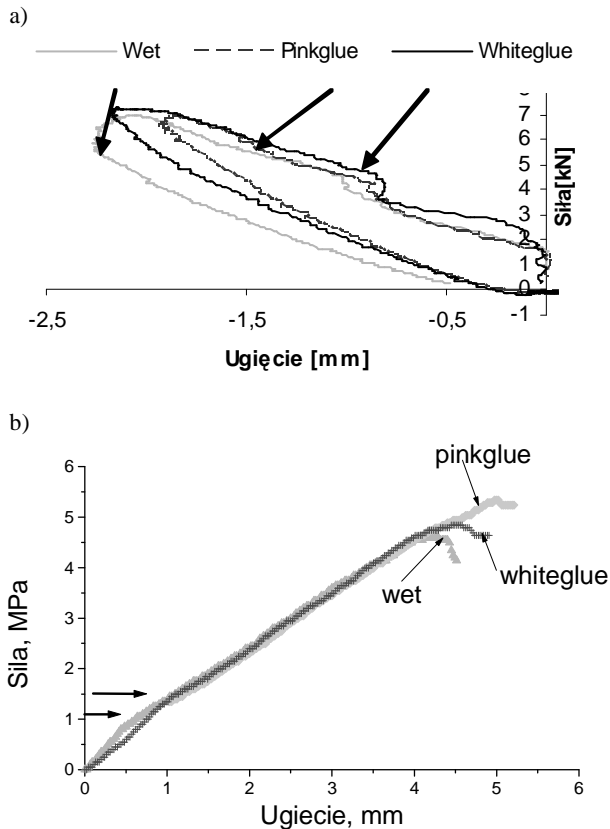
Na rysunku 1 przedstawiono wykresy obciążenie-czas zarejestrowane dla próbek o różnej budowie w trakcie uderzenia o energii: (a) $19,7 \text{ J}$, (b) $51,6 \text{ J}$. Widać, że przy małej energii uderzenia nie ma praktycznie różnicy w zachowaniu płytek (rys. 1a). Na wykresie obciążenie-odkształcenie (rys. 2a) widać, że pierwszemu okresowi wzrostu obciążenia w trakcie udaru nie towarzyszy wzrost ugięcia, zatem pierwsze zniszczenia dokonują się w górnej okładce laminatu zaraz po powstaniu kontaktu z bijakiem. Wydaje się więc, że na tym etapie rodzaj spoiwa nie odgrywa roli. Przy małym obciążeniu bijak odbija się od powierzchni próbki, pozostawiając jedynie niewielkie uszkodzenia górnej okładki. Liczne impulsy widoczne na wykresach na rysunku 1 (w pierwszym okresie) uniemożliwiają odczytanie obciążenia inicjacji zniszczeń udarowych bezpośrednio z wykresu dynamicznego, dlatego do oceny tej własności posłużono się dodatkowym wyposażeniem do rejestracji zniszczeń metodą szybkiej fotografii.

Dla małych obciążeń przy braku sprzętu do badań dynamicznych w celu przybliżonej oceny obciążeń inicjacji zniszczeń w górnej okładce stosuje się [7, 8] badania quasi-statyczne, polegające na wgniataniu wgłębnika w próbkę osadzoną na podporach tak jak przy badaniu udarowym. Na rysunku 2b strzałkami pokazano zmianę pochylenia krzywych obciążenie/ugięcie sygnalizujące pojawienie się zniszczeń w próbce. Odczytane wartości obciążenia inicjacji pęknięć w badanych próbkach wynoszą $1,2 \div 1,7 \text{ kN}$.



Rys. 1. Wykresy obciążenie-czas zarejestrowane dla próbek o różnej budowie w trakcie uderzenia o energii: a) 19,7 J, b) 51,6 J

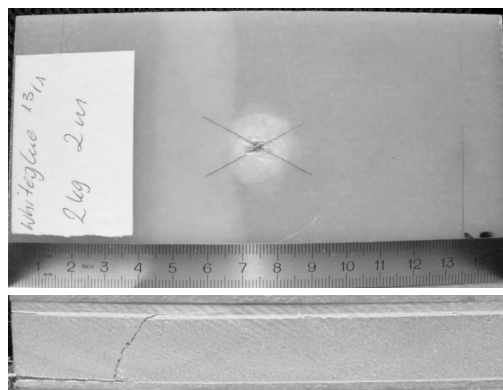
Fig. 1. Load-time plots for samples of varying structure, impact energy: a) 19.7 J, b) 51.6 J



Rys. 2. Wykres obciążenie-odkształcenie próbek poddanej: a) dynamicznemu zginaniu, b) quasi-statycznemu zginaniu

Fig. 2. Typical load-deflection plots for: a) impact loading, b) static indentation loading of sandwich samples

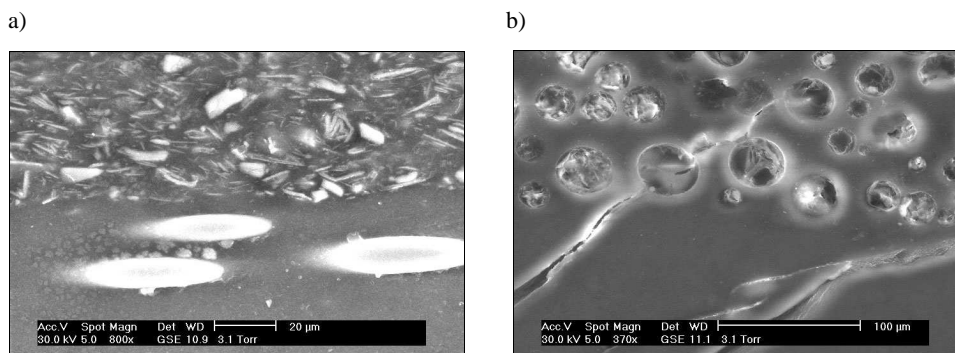
Oprócz obciążenia inicjacji zniszczeń przedmiotem zainteresowania w badaniach były mechanizmy pęknięcia próbek przy silniejszych uderzeniach prowadzących często do pęknięcia rdzenia i odklejania okładek od rdzenia. Przy energii uderzenia 29,5 J zaobserwowano, że płytki klejone spoiwem „whiteglue” pękały w rdzeniu częściej niż pozostałe, a przy energii 51,6 J (rys. 1b) jedynie próbki „wet” nie pękały w rdzeniu (łączenie rdzenia z okładkami bez kleju). Pęknięcie rdzenia objawia się znacznym spadkiem maksymalnego obciążenia przeniesionego przez próbkę i zwiększeniem ugięcia (rys. 1b). Widok próbki uderzonej zawierającej pęknięcie rdzenia pokazano na rysunku 3. Przedstawia on powierzchnię próbki z widocznym jasnym obszarem zniszczeń w laminacie (obszar ten jest jednym z kryteriów oceny odporności udarowej). Badania tego obszaru omówione w pracy [9] wykazały, że przy słabych uderzeniach (19,7 J) najmniej rozległe zniszczenia wystąpiły w próbkach z laminatu łączonego z rdzeniem spoiwem „whiteglue”. Strukturę tego spoiwa pokazano na rysunku 4a. Widać twarde cząstki absorbujące uderzenie w miękkiej osnowie polimerowej. Z kolei największy obszar zniszczeń wystąpił dla spoiwa „pinkglue” [9]. Dwufazową strukturę tego spoiwa zawierającego mikrobalony napełniacza w osnowie polimerowej pokazano na rysunku 4b. Widać, że ten rodzaj napełniacza nie stanowi skutecznej zapory dla propagacji pęknięć udarowych.



Rys. 3. Widok górnej i bocznej powierzchni próbki po uderzeniu (39 J)

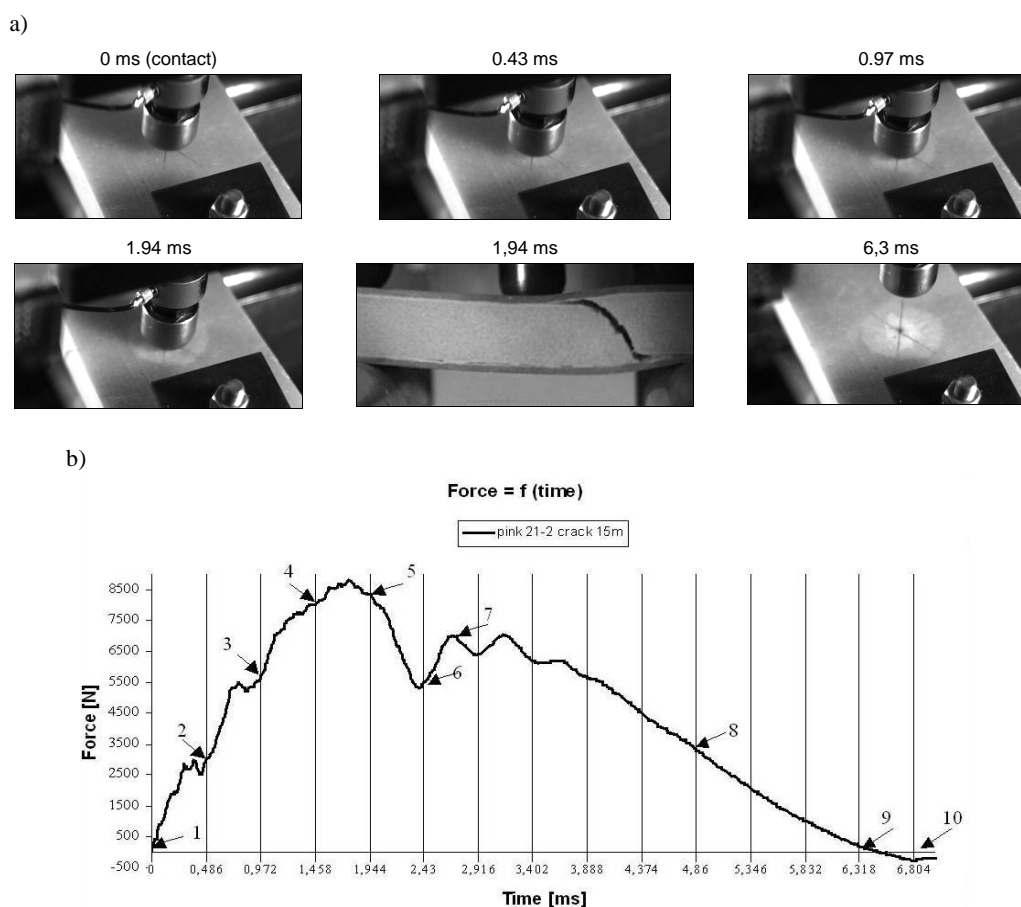
Fig. 3. Upper and sideview of the impacted sample (39 J)

W celu identyfikacji mechanizmów pęknięcia udarowego związanego z pękaniem rdzenia oraz identyfikacji obciążenia inicjacji uszkodzeń udarowych (ważnej własności charakteryzującej laminaty i konstrukcje przekładkowe) [10] zarejestrowano obrazy ilustrujące przebieg pęknięcia widoczny od strony górnej okładki lub powierzchni bocznej za pomocą kamery. Następnie wybrano kolejne obrazy (rys. 5a) przyporządkowane parametrom obciążenia (P) i czasu (t) (punkty 1, 2, 3, 5, 9 - rys. 5b), co umożliwiło identyfikację obciążenia, przy którym na powierzchni okładki pojawia się pierwsze zabielenie wskazujące na powstanie delaminacji.



Rys. 4. Dwufazowa struktura spoiw: a) whiteglue, b) pinkglue

Fig. 4. Two-phase structure of adhesives: a) whiteglue, b) pinkglue



Rys. 5. Wybrane zdjęcia z sekwencji obrazów zarejestrowanych kamer Phantom V4 do szybkiej fotografii pokazujące rozprzestrzenianie się zniszczeń w górnej okładce w trakcie trwania uderzenia masy 3,5 kg z wysokości 1 m, próbka pinkglue (a). Wykres obciążenie-czas zarejestrowany dla tej samej próbki (b)

Fig. 5. Sequence of high-speed photographs taken by Phantom V4 camera showing the evolution of damage in the upper skin during impact event by the mass 3.5 kg dropped from 1m, pinkglue specimen (a). Load time plot for the same sample (b)

Badanie to potwierdziło, że inicjacja zniszczeń zachodziła we wszystkich próbkach w przybliżeniu przy tym samym czasie ok. 0,5 ms i obciążeniu 2,5÷2,8 kN. Z kolei uważna obserwacja sekwencji obrazów ugięcia laminatu i pęknięcia rdzenia umożliwiła ocenę skuteczności powiązania rdzenia i okładek przy zastosowaniu różnych spoiw. Przebieg tego badania jest następujący: w przypadku uderzenia o tej samej energii 51,6 J w próbce „whiteglue” pod wpływem ugięcia

próbki dochodzi do pęknięcia warstwy spoiwa i propagacji tego pęknięcia wzdłuż granicy spoiwo/rdzeń, co wskazuje na pęknięcie adhezyjne. Przy pewnej długości tego pęknięcia dochodzi do pęknięcia rdzenia, a następnie odklejenia dolnej okładki. W przypadku próbki „pinkglue” pod wpływem ugięcia płytki powstaje najpierw pęknięcie propagujące wzdłuż granicy rdzeń/okładka wewnątrz warstwy spoiwa, jest to zatem pęknięcie kohezyjne przechodzące w pęknięcie rdzenia.

Próbka, w której spoiwem łączącym okładki z rdzeniem była sama żywica, nie uległa pękaniu na grubości, jedynie w powierzchniowej okładce.

WNIOSKI

Ocena skuteczności trzech sposobów połączenia okładek i rdzenia konstrukcji sandwich w warunkach udaru wykazała najmniejszą przydatność ze względu na podatność do pęknięcia niszczącego (poprzez rdzeń) próbek ze spoiwem dwufazowym Crestomer 118-6PA (Scott Bader), gdzie udokumentowano adhezyjny przebieg pęknięcia, w odróżnieniu od charakteru kohezynego w przypadku spoiwa Crestomer 1196-2PA lub łączenia „na mokro”. Najskuteczniejszym w warunkach udaru spoiwem okładek i rdzenia okazała się sama żywica poliesterowa i proces formowania sandwicha „na mokro”.

Obciążenie inicjacji pęknięć udarowych było niezależne od spoiwa i wyniosło ok. 2,5 kN dla wszystkich próbek, natomiast w porównawczych badaniach przy obciążeniu quasi-statycznym wartość ta okazała się nieco niższa: ok. 1,2÷1,7 kN, co wbrew doniesieniom literatury odnośnie do identyfikacji zniszczeń w samych laminatach, w przypadku badań konstrukcji sandwich, może wskazywać na konieczność liczenia się ze sporymi rozbieżnościami wyników zastępczych badań quasi-statycznych, stosowanych w miejsce droższych badań udarowych.

Podziękowania

Autorzy składają podziękowania mgrowi inż. Tomaszowi Lendze, który w trakcie stażu w Uniwersytecie

Bordeaux I przeprowadził część eksperymentów, których wyniki wykorzystano w tej pracy.

LITERATURA

- [1] Imielińska K., Guillaumat L., The effect of water immersion ageing on low-velocity impact behaviour of woven aramid-glass fibre/epoxy composites, *Composites Science and Technology* 2004, 64, 2271-2278.
- [2] Abrate S., *Impact on composite structures*, Cambridge University Press 1998.
- [3] Bull P.H., Edgren F., Compressive strength after impact of CFRP-foam core sandwich panels in marine applications, *Composites Part B* 2004, 35, 535-541.
- [4] Cantwell R., Davies P.A., A study of skin-core adhesion in glass fibre reinforced sandwich materials, *Appl. Compos. Mater.* 1996, 3, 407-20.
- [5] Carlsson L.A., Sendlein L.S., Merry S.L., Characterisation of face sheet /core shear fracture of composite sandwich beams, *J. Compos. Mater.* 1991, 25 101-16.
- [6] Wen H.M., Reddy T.Y., Reid S.R., Soden P.D., Indentation, penetration and perforation of composite laminates and sandwich panels under quasi-static and projectile loading, *Key Engineering Materials* 1998, 141-143, 501-552.
- [7] Zenkert D., Shipsha A., Persson K., Static indentation and unloading response of sandwich beams, *Composites Part B* 2004, 35, 511-522.
- [8] Mines R.A.W., Worrall C.M., Gibson A.G., The static and impact behaviour of polymer composite sandwich beams, *Composites* 1994, 25(2), 95-110.
- [9] Lendze T., Wojtyra R., Guillaumat L., Biateau Ch., Imielińska K., Low velocity impact damage in glass/polyester composite sandwich panels, *Advances in Materials Science* 2006, 27, 3, 26-34.
- [10] Schoeppner G.A., Abrate S., Delamination threshold loads for low velocity impact on composite materials, *Composites* 2000, 31, 9.