

Henryk Leda<sup>1</sup>, Szymon Kropaczewski<sup>2</sup>

Politechnika Poznańska, Instytut Inżynierii Materiałowej, pl. Skłodowskiej-Curie 5, 60-965 Poznań

## WPŁYW WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE OSIOWE NA ODPORNOŚĆ NA UDERZANIE GRUBOŚCIENNYCH KOMPOZYTÓW WŁÓKNA SZKLANE-ŻYWICE EPOKSYDOWE

Wyprodukowano i badano kompozyty o grubości ścianki 22 mm w celu ustalenia zależności pomiędzy wytrzymałością na ściskanie osiowe a ich odpornością na uderzanie. Wszystkie próbki kompozytowe zbrojono włóknami szklanymi typu E o średnicy 16  $\mu\text{m}$ . Wyprodukowano dwa typy kompozytów z włóknami ułożonymi w kierunku 0 oraz w kierunkach 0,  $\pm 45, 90$ . Udział włókien wynosił 70%. Zmiennymi składnikami kompozytów były osnowy z żywicy epoksydowych ze zróżnicowanymi modułami sprężystości. Najwyższe wartości wytrzymałości na ściskanie osiowe 700 MPa uzyskano dla próbek kompozytowych z osnową z wysokomodulowej żywicy epoksydowej, przeznaczonej do produkcji narzędzi i oznaczonej symbolem AN. Najniższe wartości w tej próbie uzyskano dla próbek z niskomodulową żywicą epoksydową firmy Bakelite i oznaczoną symbolem B.

Odporność na niskoenergetyczne uderzania okazała się najwyższa dla próbek z średniomodulową osnową z żywicy Araldit oznaczoną symbolem  $A_{bp}$  (bez przyspieszacza) i wynosiła 4  $\text{J}/\text{cm}^3$ . Próbki z osnową B i AN gromadziły mniej energii przed pęknięciem i pękały przy niższych wartościach energii właściwej wyrażonej w  $\text{J}/\text{cm}^3$ . Przyczyną niespodziewanie niskiej odporności na pęknięcie próbek z osnową AN jest prawdopodobnie degradacja żywicy epoksydowej AN w kontakcie z włóknami szklanymi w temperaturze 200°C.

Słowa kluczowe: kompozyty z włóknami szklanymi, wytrzymałość na ściskanie osiowe, odporność na uderzenia

## INFLUENCE OF AXIAL COMPRESSIVE STRENGTH ON IMPACT DAMAGE OF GLASS FIBRE-EPOXY RESIN THICK WALLED COMPOSITES

Thick-walled glass fibre epoxy composites with thickness of 22 mm were manufactured and tested to determine the effect of compressive axial strength on their impact damage. The diameter of reinforcing E-glass fibre was 16  $\mu\text{m}$  in all samples. Epoxy resins used as a matrix have varied modulus and strength. Two sets of composites: ones with unidirectional in 0 and ones quasi-isotropic in 0,  $\pm 45, 90$  directions were manufactured. The volume fraction of glass fibers were 70%. The highest values of compressive strength, 700 MPa, were found for composites with high modulus matrix denoted AN. The lowest values in these compression tests were determined for samples with low modulus epoxy matrix denoted B. On the other hand, the tests of low energy impact resistance indicated best results of 4  $\text{J}/\text{cm}^3$ , for samples with medium modulus matrix denoted  $A_{bp}$  (without accelerater). Samples with matrix B and AN accumulate less energy and were damaged at lower values of specific energy expressed as  $\text{J}/\text{cm}^3$  than samples with medium modulus  $A_{bp}$ . The reason for unexpected low resistance to damage of AN samples is probably the degradation of their matrix caused by interaction with glass fibers at hardening temperature of 200°C.

Key words: composites reinforced with glass fibres, axial compressive strength, impact damage resistance

### WSTĘP

W eksploatacji znajdują się również wyroby kompozytowe o większych przekrojach aniżeli najczęściej spotykane wyroby cienkościennie. Ze względów technicznych do oceny właściwości mechanicznych kompozytów o przekrojach 400÷500  $\text{mm}^2$  bardziej przydatna okazała się próba ściskania osiowego. Przepisy brytyjskie wymagają np. pomiarów wycinków grubościennych zbiorników ciśnieniowych, co skutecznie można zrealizować w próbie ściskania.

Posiadanie grubościennych próbek kompozytowych ma również ważne znaczenie poznawcze, gdyż można wtedy realizować różne badania i przygotowywać dane wyjściowe do modelowania zjawisk zachodzących pod-

czas eksploatacji wyrobów kompozytowych. Przyjęto, że tylko próbki wycięte z jednej wyjściowej grubszej

plyty pozwalają na ocenę roli wielkości próbki w kształtowaniu się ich właściwości. Możliwość pomiarów w próbie ścinania międzylaminarnego pozwala na ocenę innych parametrów grubościennych wyrobów kompozytowych [1].

Dla realizacji celów niniejszego opracowania ważna jest szeroko akceptowana zależność wyników ściskania osiowego od błędów struktury kompozytów oraz od obecności uszkodzeń powstałych w wyniku niskoenergetycznych uderzeń [2, 3]. Redukcja właściwości mechanicznych kompozytów polimerowych wywołanych przez

<sup>1</sup> dr hab. inż., <sup>2</sup> mgr inż.

nieniszczące uderzenia twardymi obiektami jest jednym z poważniejszych mankamentów tej grupy materiałów [4]. Uderzenia powodują powstanie osłabionego fragmentu w kompozycie, który traktuje się jak nieciągłość osłabiającą wyrób. Wielkość tego osłabionego fragmentu rośnie wraz z rosnącą energią uderzenia, zależy również od wymiarów próbki, sposobu zamocowania [5]. Najsilniej na uderzenie reagują wyroby grube, małe i sztywno zamocowane. W przypadku płyt z kompozytów z włóknami węglowymi wystarczy uderzenie z energią  $5\div 7$  J, aby osłabić wyrób do tego stopnia, że w następnych pomiarach wytrzymałości na ściskanie uzyskuje się zaledwie połowę wartości wyjściowych [6].

Oczywistą konsekwencją wrażliwości kompozytów na uderzenia jest produkcja kompozytów hybrydowych i wykorzystanie właściwości różnych włókien [7].

Powtarzające się uderzenia powodują zwiększanie się uszkodzonych fragmentów kompozytu, co w serii quasi-izotropowej powoduje szczególnie silny rozwój zniszczeń wzdłuż słabszych kierunków 45 i może stać się przyczyną większej wrażliwości na uderzenie tej grupy kompozytów.

Ilość skumulowanej energii powodującej pęknięcie wyrobu zależy od: objętości, składowych kompozytu, rozłożenia włókien, sposobu zamocowania, rodzaju bijką i innych czynników. Kompozyty z osnową z termoplastów są mniej wrażliwe na uderzenia [8, 9].

Ze względu na podobne mechanizmy niszczenia z wyników ściskania osiowego można ocenić zachowanie się grubościennych próbek kompozytowych w próbie zginania [10], natomiast z wyników ściskania trudniej ocenia się zachowanie kompozytów w próbie ścinania międzylaminarnego.

Również mniej znane są zależności pomiędzy wytrzymałością na ściskanie osiowe grubościennych kompozytów polimerowych i ich odpornością na uderzenie.

Celem pracy jest poznanie zależności pomiędzy wytrzymałością na ściskanie kompozytów z różnymi osnowami epoksydowymi wzmocnionymi włóknami szklanymi E o średnicy  $16\ \mu\text{m}$  a ich zdolnością do kumulowania energii. Wyniki pracy mogą wnieść nowe informacje o tym, jakie dane z innych podstawowych pomiarów właściwości kompozytów grubościennych są przydatne w ocenie zachowania się wyrobów kompozytowych narażonych na różne działania skoncentrowanych sił zewnętrznych.

## MATERIAŁY I WARUNKI EKSPERYMENTÓW

W niniejszej publikacji prezentujemy wyniki pomiarów właściwości kompozytów z różnymi osnowami wzmocnionymi rowingowymi włóknami szklanymi typu E o średnicy  $16\ \mu\text{m}$ , pobranymi z motka o masie 14 kg. Włókna ułożono w kierunkach 0 oraz  $0,\pm 45,90$ .

Symbolem B oznaczano w dalszym ciągu niniejszej prezentacji niskomodulową żywicę epoksydową produkcji firmy Bakelite w zestawie Rutapox L 1000 z utwardzaczami VE 5194/H i VE 5195/H w proporcji 48:13:3. Umacnianie osnowy w kompozytach przeprowadzano przez 16 h w temperaturze otoczenia i przez 10 h w temperaturze  $70^\circ\text{C}$ . W próbie rozciągania żywica B wykazała moduł sztywności  $0,029 \times 10^5$  MPa. Próbki spolimeryzowanej żywicy B wymagały do złamania udarowego energii  $2,0\ \text{J}/\text{cm}^2$ . Żywicę B uznano za reprezentanta ciągliwej, mało sztywnej grupy żywic epoksydowych.

Symbolem  $A_{bp}$  oznaczono żywicę epoksydową produkcji Vantico o nazwie Araldit F z utwardzaczem HY 905 bez przyspieszacza. Utwardzanie przeprowadzano w temperaturze  $120^\circ\text{C}$  przez 24 h i w temperaturze  $140^\circ\text{C}$  również przez 24 h. W próbie rozciągania uzyskano moduł sztywności  $0,039 \times 10^5$  MPa, a energia potrzebna do złamania wynosiła  $1,6\ \text{J}/\text{cm}^2$ . Żywicę uznano za reprezentanta średniomodulowych i w miarę mało kruchych żywic epoksydowych.

Symbolem AN oznaczono produkt firmy Vantico o nazwie Araldit LY 5210 z utwardzaczem XB 5173 przeznaczony do produkcji narzędzi, lecz również do zastosowania jako osnowy laminatów. Proces utwardzania przebiegał przez 16 h w temperaturze  $40^\circ\text{C}$  z następnym dograniem do temperatury  $200^\circ\text{C}$  przez 4 h. Moduł sztywności w próbie rozciągania wynosi  $0,042 \times 10^5$  MPa, a energia złamania wynosi  $1,5\ \text{J}/\text{cm}^2$ . Ponadto żywica AN wyróżnia się innymi bardzo korzystnymi właściwościami nawet trudnymi do oceny liczbowej np. utrudnionym cięciem znakomitymi piłkami Sandvik HSS.

Dodatkowo do badań wprowadzono osnowę A z przyspieszaczem utwardzaną w temperaturze  $120^\circ\text{C}$ , co pozwala na uzyskiwanie gęstości  $1,8\ \text{g}/\text{cm}^3$  zamiast gęstości  $2\ \text{g}/\text{cm}^3$ . Kompozyty z tą osnową stosowano jako miarę reakcji próby ściskania osiowego na obecność wad i defektów struktury.

W tabeli 1 zestawiono inne informacje o zastosowanych żywicach epoksydowych.

Wyprodukowano płytę kompozytową o wymiarach  $120 \times 120 \times 25$  mm z udziałem włókien 70%. Łączna powierzchnia włókien szklanych w ww. bloku wynosiła  $47\ 520\ \text{mm}^2$ . Płyty z osnową B są przezroczyste, natomiast pozostałe płyty są matowe, przy czym zdecydowanie najbardziej matowe były płyty z osnową AN, tj. polimeryzowane w temperaturach do  $200^\circ\text{C}$ . Do pomiarów właściwości mechanicznych z płyt wykrawano mniejsze próbki o wymiarach  $22 \times 22 \times 90$  mm, które po zamocowaniu w obejmach o grubości 11 mm zapewniały relację boku podstawy próbki do czynnej wysokości jak  $3/8$ . Oprawki zostały zabezpieczone przed ruchem poziomym podczas ściskania przez usadowienie ich wypustów we wgłębieniach płyt maszyny wytrzymałościowej. Wolną przestrzeń pomiędzy próbkami kompozytowymi i

TABELA 1. Wybrane informacje o żywicach epoksydowych zastosowanych jako osnowy kompozytów  
TABLE 1. Selected informations about epoxy resins used as a composite matrix

Lp.	Cecha	Symbol	Składniki	Twardość Shore'a D	Moduł sprężystości przy rozciąganiu MPa	Praca zginania udarowego J/cm <sup>2</sup>
1	B	L 1000	Żywica z eteru alkiloglicydylowego (C <sub>12</sub> -C <sub>14</sub> ), Bisfenolu A i epichlorohydryny	72 ± 1	0,029 x 10 <sup>5</sup>	2,0
		Utwardzacz VE 5194/H	alkiloeteroamina + izofoforanodiamina			
		Utwardzacz VE 5195/H	aminoetylopiperazyna + nonylofenol			
2	A <sub>bp</sub>	Araldite F	Bisfenol A + epichlorohydryna	79 ± 1	0,039 x 10 <sup>5</sup>	1,6
		Utwardzacz HY 905	bezwodniki kwasów karboksylowych			
3	AN	Araldite LY 5210	N,N,N,N-tetraglicydylo-4'diaminodifenylometan + eter diglicydylowy 1,4-butandiolu	84	0,042 x 10 <sup>5</sup>	1,5
		Utwardzacz XB 5173	Izofoforanodiamina + 2,2'-dimetylo-4,4'-bismetyleno-(cykloheksylamina)			

ścianami oprawki wypełniono PMMA. W kilkuset próbach nie stwierdzono uszkodzenia tego fragmentu ściskanego obiektu. Przyjmujemy, że odchylenia od pionowego działania siły ściskającej są porównywalne z odchyleniami w uchwytach do ściskania cienkich próbek wg ASTM D3410, czyli odchylenia od pionowego kierunku siły są limitowane tą wartością dla maszyny wytrzymałościowej o sile nacisku 300 kN. Z wyników eliminowano sporadyczne przypadki zniszczenia próbek w obrębie części mocującej oprawek.

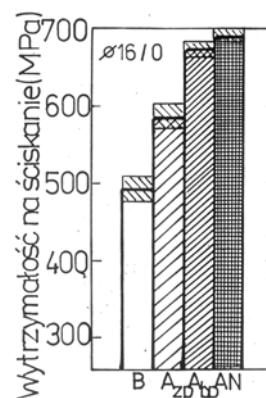
Inną serię próbek uderzano w dłuższe boki bijakiem kulowym o promieniu kuli 25 mm i masie 1355 g. Bijak miał obniżony środek ciężkości i specjalne prowadzenie w części ogonowej zapewniające minimalny kontakt z ściankami rury. Energię regulowano przez zmianę wysokości opadania. Próbki były ułożone na fundamencie: ziemia, bryła betonowa o masie 20 kg, blok stalowy o masie 9 kg. Próbki były dociskane do fundamentu krawędzią rury prowadzącej bijak. Próbki pękały przy pierwszym, drugim, trzecim lub czwartym uderzeniu. Za energię niszczącą przyjmowano sumę energii zgromadzonej w próbce. Energię zgromadzoną oraz niszczącą wyrażano w J/cm<sup>3</sup>. Próbki, które nie pękały po czterech uderzeniach, ściskano osiowo w celu wyznaczenia resztkowej wytrzymałości na ściskanie.

## WYNIKI

Na rysunku 1 przedstawiono wyniki ściskania osiowego siłą skierowaną wzdłuż włókien kompozytu anizotropowego z włóknami ułożonymi wzdłuż kierunku 0.

Czynnikami podwyższającymi wytrzymałość na ściskanie osiowe są moduł sztywności osnowy, (A<sub>bp</sub>, AN > B) oraz stopień zdefektowania wyrażający się niższą gęstością, około 1,8 g/cm<sup>3</sup>, dla silniej zdefektowanych

kompozytów A<sub>zp</sub>, podczas gdy gęstość kompozytów B i A<sub>bp</sub> przekraczała 2 g/cm<sup>3</sup>.

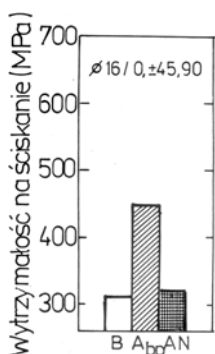


Rys. 1. Wytrzymałość na ściskanie osiowe próbek kompozytowych z włóknami ułożonymi w kierunku 0

Fig. 1. Compressive strength of unidirectionally reinforced composites in direction 0

Zważywszy na bardzo dobre właściwości narzędziowej żywicy epoksydowej AN, najwyższa wartość wytrzymałości na ściskanie osiowe dla próbek z tą osnową jest wytłumaczalna. Jednocześnie przypomnijmy, że kompozyty z osnową AN wyróżniały się najwyższym stopniem zmatowienia, co może wskazywać na zmiany typu degradacyjnego w osnowie. Równoległe z produkcją kompozytów z osnową AN prowadzono polimeryzację żywicy AN bez włókien, uzyskując piękne, miodowe próbki bez pęcherzy i śladów zmatowienia. Można zatem przypuszczać, że w kompozytach z osnową AN zaszły zmiany strukturalne i właściwości tego składnika kompozytów. Ułatwione cięcie próbek kompozytowych z osnową AN piłką oraz pylenie podczas uderzania również sugerują, że wystąpiły niekorzystne zmiany, co może niekorzystnie rzutować na ich zachowanie w kolejnych pomiarach właściwości mechanicznych.

Na rysunku 2 zestawiono wyniki pomiarów wytrzymałości na ściskanie osiowe próbek z włóknami ułożonymi w kierunkach 0,±45,90.



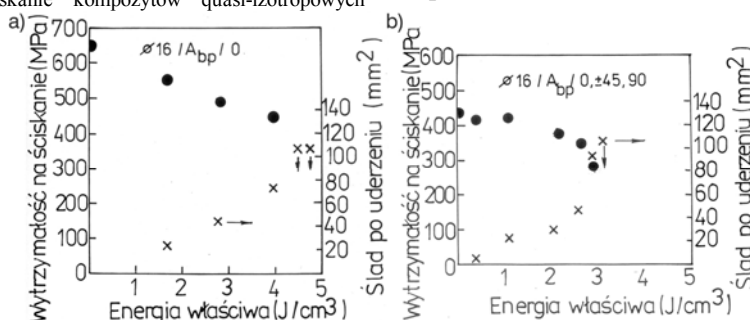
Rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie kompozytów quasi-izotropowych

z włóknami w kierunkach 0,±45,90

Fig. 2. Compressive strength of composite samples reinforced with fiber glass in directions 0,±45,90

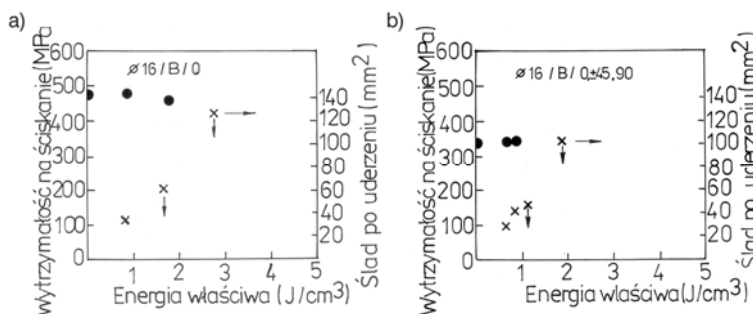
Najwyższą wytrzymałość na ściskanie mają próbki kompozytowe z osnową Araldit bez przyspieszcza oznaczoną A<sub>bp</sub>. W porównaniu do próbek anizotropowych z włóknami w kierunku 0, w tej serii osłabieniu uległy próbki z osnową AN, co wskazuje, że możliwe jest osłabienie kompozytów na granicy międzyfazowej włókien w kierunkach 45, zgodnie z przypuszczeniami o obniżeniu wartości naprężeń ścinających z powodu degradacji osnowy AN.

Na rysunkach 3-5 przedstawiono wyniki pomiarów odporności na uderzenia.



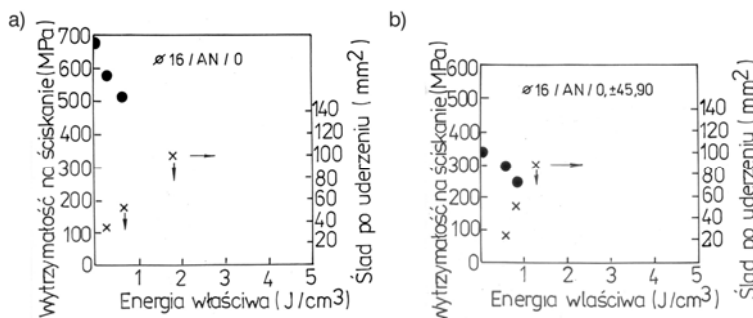
Rys. 3. Wytrzymałość resztkowa, powierzchnia śladu po uderzeniu oraz energia niszcząca kompozytów z osnową A<sub>bp</sub>: a) z włóknami ułożonymi w kierunku 0, b) z włóknami ułożonymi w kierunkach 0,±45,90

Fig. 3. Post-impact compressive strength, damaged surface area and failure energy of composites with matrix A<sub>bp</sub>: a) unidirectional reinforced, b) 0,±45,90 reinforced



Rys. 4. Wytrzymałość resztkowa, powierzchnia śladu po uderzeniu oraz energia niszcząca kompozytów z osnową B: a) z włóknami ułożonymi w kierunku 0, b) z włóknami ułożonymi w kierunkach 0,±45,90

Fig. 4. Post-impact compressive strength, damaged surface area and failure energy of composites with matrix B: a) unidirectional reinforced, b) 0,±45,90 reinforced



Rys. 5. Wytrzymałość resztkowa, powierzchnia śladu po uderzeniu oraz energia niszcząca kompozytów z osnową AN: a) z włóknami ułożonymi w kierunku 0, b) z włóknami ułożonymi w kierunkach 0,±45,90

Fig. 5. Post-impact compressive strength, damaged surface area and failure energy of composites with matrix AN: a) unidirectional reinforced, b) 0,±45,90 reinforced

Wyniki ilustrujące zdolność do gromadzenia energii bez zniszczenia próbki oraz wartości energii niszczącej próbki kompozytowe wskazują na najlepsze zachowanie

wyrobów z włóknami ułożonymi w kierunku 0 z osnową  $A_{bp}$ , kolejne miejsca zajmują próbki  $A_{bp}/0, \pm 45, 90$  oraz próbki B/0.

Oznacza to, że przy porównywaniu roli osnowy B i  $A_{bp}$  kompozyty są tym bardziej odporne na uderzenia, im w próbie ściskania osiowego wykazują większą wytrzymałość. Od tego wniosku odbiega zachowanie się kompozytów z osnową AN. Ich odporność na uderzenie jest niewspółmiernie niska przy uwzględnieniu wysokiej wytrzymałości na ściskanie. Wyniki próby uderzenia oraz silne pylenie zauważalne w wyniku efektu kominowego w rurze po uderzeniu potwierdzają osłabienie osnowy podczas utwardzania w temperaturach do  $200^{\circ}\text{C}$  w kontakcie z włóknami szklanymi zastosowanymi do wzmocnienia kompozytów.

## OMÓWIENIE WYNIKÓW

Wytrzymałość na ściskanie osiowe zależy od zespołu czynników, na które składają się właściwości włókien i osnowy, powierzchni międzyfazowej dla stałej średnicy włókien szklanych  $16\ \mu\text{m}$ , ale głównie od modułu sztywności osnowy, co jest zgodne z większością zależności analitycznych wiążących wytrzymałość na ściskanie z modułem osnowy. W tym nurcie zależności w próbie ściskania znalazły się również kompozyty z osnową AN. W świetle wyników z prób pomiaru odporności na uderzenie można przyjąć, że w próbie ściskania osiowego rola przyczepności włókien do osnowy, wyrażona naprężeniem ścinania, ma w próbkach z włóknami o średnicy  $16\ \mu\text{m}$  mniejsze znaczenie. Dobre wartości wytrzymałości na ścinanie międzylaminarne kompozytów z osnową B,  $64\ \text{MPa}$ , nie zapewnią uzyskania najwyższych wartości na ściskanie. Wysokie wartości wytrzymałości na ściskanie uzyskuje się tylko w mezoskali z udziałem zespołu pozytywnych czynników [11]. W świetle niskich wartości energii niszczenia przy uderzeniu oraz średnich wyników przy ściskaniu kompozytów z osnową B nasuwa się pytanie, co spowodowało ich szerokie zastosowanie w budowie szybów w Niemczech oraz ich szeroką aplikację w pracach remontowych. Prawdopodobnie osnowa B zapewnia dobre właściwości przy obciążeniach zmiennych. Wyniki eksperymentów wskazują, że kompozyty odporne na uderzenia muszą być wszechstronnie silne, tzn. twarde, aby przy uderzeniu powstały najmniejsze objętości uszkodzonego materiału oraz szczeliny pomiędzy włóknami i osnową.

Producenci żywicy AN polecają ten produkt również do wytwarzania kompozytów z włóknami. W trakcie utwardzania płyt kompozytowych wygrzewano je

w formach stalowych o masie  $6\ \text{kg}$ . W trakcie sieciowania czas przebywania w temperaturze  $200^{\circ}\text{C}$  był dłuższy aniżeli zakładali producenci żywicy w wyniku bezwładności termicznej formy i urządzenia grzewczego. W innej próbie sieciowania belki kompozytowej z osnową AN o boku  $14\ \text{mm}$  w formie o masie  $2\ \text{kg}$  w temperaturze  $190^{\circ}\text{C}$  uzyskano prawie przezroczysty dla światła wyrób, co można uznać za symptom mniejszych zmian w strukturze osnowy AN. Celowe jest przeprowadzenie odrębnej serii prób w obniżonych temperaturach utwardzania kompozytów tak, aby wyeliminować zmatowienie i jeszcze zapewnić dostateczne umocnienie osnowy z żywicy AN. Celowe okazało się również przeprowadzenie prób odporności na ścinanie międzylaminarne próbek wyciętych z płyt wyjściowych. Wartości wytrzymałości na ścinanie wynoszą dla kompozytów z osnową B  $64\ \text{MPa}$ , dla kompozytów z osnową  $A_{bp}$   $58\ \text{MPa}$  i dla kompozytów z osnową AN  $50\ \text{MPa}$ . Niskie wartości wytrzymałości na ścinanie kompozytów AN wyjaśniają częściowo ich niekorzystne zachowanie w próbie uderzania. W trakcie eksperymentów są również próby ściskania i uderzania z kompozytami zbrojonymi włóknami szklanymi o średnicach  $10$  i  $24\ \mu\text{m}$  oraz włóknami węglowymi o średnicy  $7\ \mu\text{m}$ . Wyniki ściskania osiowego dla włókien szklanych o średnicy  $24\ \mu\text{m}$  wykazują pewne podobieństwo z prezentowanymi w niniejszej pracy, natomiast wyniki dla włókien szklanych o średnicy  $10\ \mu\text{m}$  i włókien węglowych są istotnie różne i będą przedmiotem odrębnej publikacji.

## WNIOSKI

1. Kompozyty z niskomodulową osnową B uzyskują niskie wartości wytrzymałości w próbach ściskania osiowego i niskie energie niszczenia w próbach odporności na uderzenie.
2. Kompozyty z wysokomodulową osnową AN uzyskują wysokie wartości wytrzymałości w próbie ściskania osiowego i niskie wartości energii niszczenia w pomiarach odporności na uderzenie. Za prawdopodobną przyczynę rozbieżnego zachowania się w dwóch próbach można przyjąć zmiany w strukturze osnowy.
3. Kompozyty z średniomodulową osnową  $A_{bp}$  zachowują się dobrze we wszystkich przeprowadzonych pomiarach właściwości mechanicznych.
4. Mało wrażliwe na uderzenie kompozyty z włóknami szklanymi i osnowami epoksydowymi winny cechować się jednocześnie wysokimi wartościami wytrzymałości na ściskanie, ścinanie oraz zginanie. Wizualnym wyznacznikiem posiadania powyższych cech jest mała powierzchnia trwałego śladu po uderzeniu.

## Podziękowania

*Autorzy wyrażają podziękowanie kolegom doktorom Markowi Gościańskiemu, Jerzemu Jęczalikowi oraz Piotrowi Wasilewiczowi za pomoc w realizacji pracy.*

## LITERATURA

- [1] Barbero E., Wen E., Compressive strength of production parts without compression testing, research / aurora/ wen/paper-astm/ astmppr.doc.
- [2] Lee S.H., Waas A.M., Compressive response and failure of fiber reinforced unidirectional composites, International Journal of Fracture 1999, 100, 275-306.
- [3] Hosur M.V., Murphy C.R., Ramurthy R.S., Compression after impact testing of carbon fiber reinforced plastic laminates, [astm.org/cgi-bin/SoftCart.exe/JOURNAL/COMPTECH/PAGES/140.ht](http://astm.org/cgi-bin/SoftCart.exe/JOURNAL/COMPTECH/PAGES/140.ht).
- [4] Bełzowski A., Rechul Z., Stasieńko J., Uszkodzenia udarowe w laminacie wzmocnionym tkaniną szklaną, Kompozyty (Composites) 2002, 2, 5, 394-398.
- [5] Davies G., Zhang X., Zhou G., Watson S., Numerical modeling of impact damage, Composites, 1994, 25, 342-350.
- [6] Curtis P.T., Browne M., Cost-effective high performance composites, Composites 1994, 25, 273-280.
- [7] Imielinska K., Wojtyra R., Castaings M., Impact resistance and damage tolerance of hybrid carbon, glass, Kevlar/epoxy laminates, Inżynieria Materiałowa 2001, 388-391.
- [8] Kwiatkowski D., Koszkuł J., Badanie właściwości dynamicznych kompozytów poliamidu 6 z włóknem szklanym, Kompozyty (Composites) 2002, 2, 3, 117-120.
- [9] Sobczak R., Nitkiewicz Z., Koszkuł J., Badania dynamicznych właściwości mechanicznych kompozytów na osnowie polipropylenu wzmocnionych włóknem szklanym, Kompozyty (Composites) 2002, 2, 3, 78-80.
- [10] Leda H., Materiały IV Szkoły Kompozytów, Politechnika Warszawska, Warszawa-Wisła 2003.
- [11] Piggot M.R., Compressive strength of composites: how to measure it and how to improve it, (w:) Advanced Composites 93, The Minerals, Metals and Materials Society, 1993.
- [12] Reifsnider K.L., Modelling of the interphase in polymer-matrix composite material systems, Composites 1994, 25, 461-469.

Recenzent  
Danuta Żuchowska