

APARATURA BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Stanowisko badawcze do kontrolowanych testów udarowych płyt kompozytowych

ANDRZEJ KATUNIN¹, MAREK SZNURA²

¹POLITECHNIKA ŚLĄSKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY TECHNOLOGICZNY, INSTYTUT PODSTAW
KONSTRUKCJI MASZYN

²DWS DRAEXLMAIER SP. Z O.O.

Słowa kluczowe: badania udarowe, uszkodzenia udarowe kompozytów, symulacja rzeczywistych uszkodzeń udarowych, kontrola energii uderzenia

STRESZCZENIE

Artykuł opisuje stanowisko badawcze do testów udarowych płyt kompozytowych, pozwalających na automatyczną kontrolę energii uderzenia oraz symulację rzeczywistych uszkodzeń w płytach kompozytowych. Stanowisko zostało wyposażone w układy elektroniczne pozwalające na automatyczny dobór optymalnej wysokości zrzutu oraz obciążenia w szerokim zakresie energii uderzenia. Zestaw 14 impaktorów pozwala na przeprowadzenie zarówno klasycznych testów udarowych, jak i symulowanie uderzeń występujących w lotnictwie. Do pomiaru prędkości kolumny udarowej wykorzystano mikroprocesorowe układy pomiarowe, a pomiar siły uderzenia jest realizowany przy pomocy specjalistycznego czujnika piezoelektrycznego. Przedstawiono możliwości badawcze stanowiska oraz przykładowe wyniki badań.

Experimental test rig for the controlled impact tests of composite plates

Keywords: impact tests, impact damages of composites, simulation of realistic impact damages, control of impact energy

ABSTRACT

The paper describes an experimental test rig for impact testing of composite plates, which makes possible an automatic control of impact energy and simulation of realistic damages in composite plates. The test rig was equipped with electronic systems, which allow for automatic selection of optimal height of a drop and a loading in the wide range of impact energy. The set of 14 impactors allows for carrying out classical impact tests as well as simulation of impacts occurred in aircraft structures. For the measurement of impact column the microprocessor sensing systems were used, the measurement of the force of impact is realized by special piezoelectric sensor. The research capabilities of a test rig as well as exemplary results of tests were presented.

1. WPROWADZENIE

Uszkodzenia udarowe są częstym zjawiskiem występującym podczas eksploatacji elementów wykonanych z kompozytów polimerowych. Ze względu na charakterystyczną budowę kompozytów, w szczególności laminatów, mechanizmy zniszczenia w takich strukturach różnią się od mechanizmów występujących w materiałach jednorodnych. Mechanizm zniszczenia laminatu jest uzależniony od szeregu czynników takich jak postać umocnienia (włókno krótkie, włókno długie, tkanina, mata), jego ukierunkowanie w poszczególnych warstwach, a także prędkość i energia uderzenia, geometria powierzchni uderzającej oraz kąt natarcia. Badania udarowe mają kluczowe znaczenie wszędzie tam, gdzie elementy wykonane z kompozytów odgrywają istotną rolę, między innymi w przemyśle motoryzacyjnym, budownictwie, budowie maszyn, budowie jednostek pływających, lotnictwie i kosmonautyce. Z tego względu poznanie mechanizmów uszkodzania tych struktur w różnych warunkach eksploatacji jest jednym z priorytetowych aspektów przy stosowaniu kompozytów w wyżej wymienionych gałęziach przemysłu.

Badania w zakresie uszkodzeń udarowych są prowadzone w licznych ośrodkach w kraju i na świecie. Stanowiska badawcze wykorzystywane do prowadzenia badań można sklasyfikować ze względu na prędkość uderzenia. Wyróżnia się testy udarowe o małej prędkości (rzędu kilku m/s), o średniej prędkości (tzw. testy sub-balistyczne charakteryzujące się prędkością rzędu kilkudziesięciu m/s) oraz wysokiej prędkości (tzw. testy balistyczne cechujące się prędkością rzędu kilkuset m/s) [1]. W zależności od potrzebnej do uzyskania prędkości impaktora wyróżnia się kilka podstawowych konstrukcji stanowisk badawczych.

Stanowiska badawcze, zadające małą prędkość początkową impaktora wykorzystują zazwyczaj siłę grawitacji. Elementem czynnym w tym przypadku jest kolumna spadowa z impaktorem na końcu, a prędkość (energia) uderzenia jest regulowana wysokością spadku oraz masą obciążników. Rozróżnia się konstrukcje, w których realizowany jest spadek całej kolumny spadowej z impaktorem na końcu wraz z obciążnikami [2-4], jak również spadek samego impaktora [5]. Zastosowanie konstrukcji z kolumną spadową pozwala jednak na regulację prędkości uderzenia w szerszym zakresie ze względu na możliwość doboru

masy spadającej kolumny. Do badań udarowych o małej prędkości impaktora wykorzystuje się również inne rozwiązania, na przykład młot Charpy'ego [6] lub konstrukcję wahadła [7]. W celu zwiększenia prędkości uderzenia w wyżej opisanych konstrukcjach stosowane są przyspieszacze sprężynowe lub pneumatyczne [1]. Innym rozwiązaniem konstrukcyjnym w badaniach udarowych jest wykorzystanie dzielonego pręta Hopkinsona [8]. W tej metodzie badany element znajduje się pomiędzy dwoma prętami wyposażonymi w tensometry. Uderzenie następuje w koniec jednego z prętów, po czym fala sprężysta uderzenia oddziałuje na próbkę, a następnie przenosi się na drugi pręt.

W celu uzyskania prędkości średnich i dużych najczęściej wykorzystywane są rozwiązania konstrukcyjne opierające się na koncepcji napędzania impaktora sprężonym gazem [1, 9-11]. Urządzenia takie zawierają lufę w postaci okrągłej rury z umieszczonym wewnątrz impaktorem. Z jednej strony do lufy jest podłączony zbiornik ze sprężonym powietrzem lub sprężarka. Uwolnienie impaktora następuje przy użyciu szybkiego zaworu spustowego. Wykorzystanie takiej koncepcji w stanowiskach badawczych pozwala na precyzyjną regulację prędkości uderzenia w szerokim zakresie. Najczęściej czynnikiem roboczym w takich urządzeniach jest powietrze [1], jednak stosowane są także inne gazy, na przykład azot [10] lub hel [11]. Spotyka się również rozwiązania napędu impaktora przy pomocy reakcji spalania gazów palnych lub prochu strzelniczego [1], w tym testy z wykorzystaniem broni palnej [12].

W niniejszej pracy przedstawiono konstrukcję i zasadę działania stanowiska do badań udarowych o małych prędkościach z kolumną spadową, zaprojektowanego i wykonanego na potrzeby badań udarowych kompozytów polimerowych. Stanowisko posiada mikroprocesorowy układ sterowania, pozwalający na automatyczny dobór wysokości spadku oraz obciążników po wprowadzeniu wartości energii uderzenia. Omówiono specyfikę budowy układów mechanicznych oraz elektroniczny układ sterowania. Opisano także sposób przeprowadzenia pomiarów oraz przedstawiono przykładowe wyniki badań na stanowisku.

2. BUDOWA ORAZ PARAMETRY TECHNICZNE STANOWISKA BADAWCZEGO

2.1 Układy mechaniczne

Zasadniczym elementem maszyny wytrzymałościowej jest rama nośna 1, wykonana z elementów wycinanych laserowo z aluminiowej blachy, a następnie giętych na prasie krawędziowej. Dolną część stanowiska stanowi komora 2 zawierająca miejsce na zamocowanie kamery obserwującej próbkę 3 od dołu. Komora ta jest pokryta czarną matową farbą w celu zniwelowania odbicia światła. Górna część stanowiska zawiera automatyczny chwytak do mocowania próbki 4 oraz mechanizm zrzutu 5 impaktora 6 na badaną próbkę. Energia uderzenia jest regulowana w sposób automatyczny poprzez dobór odpowiedniej masy obciążników 7 oraz wysokości, z jakiej zrzucana jest kolumna spadowa. W celu zachowania odpowiedniego toru ruchu wykorzystano system prowadnic z wałkami gruboanodowanymi oraz tulejami z tworzywa sztucznego. W celu kontroli wysokości zrzutu oraz innych parametrów badania zastosowano liniowe enkodery optyczne. Model CAD oraz fotografię stanowiska wykonaną podczas badań z oznaczeniem elementów stanowiska przedstawia Rysunek 1.

Na stanowisku możliwe jest prowadzenie badań udarowych płyt kompozytowych o rozmiarach maksymalnie 300×300 mm (z możliwością regulacji manualnej utwierdzenia) i grubości maksymal-

nie 50 mm z energią uderzenia w zakresie 1,5÷40 J. Regulacja masy spadowej odbywa się przy pomocy zestawu trzech obciążników 7. W zależności od warunków eksperymentu masa kolumny może przybierać wartości: 2,8 kg (kolumna spadowa bez obciążników), 5,286 kg (z jednym obciążnikiem), 7,772 kg (z dwoma obciążnikami) oraz 10,258 kg (z trzema obciążnikami). Wysokość spadku jest regulowana w zakresie 10÷450 mm. Układ napędowy kolumny spadowej stanowi silnik elektryczny z przekładnią ślimakową.

Rozwiązanie konstrukcyjne zwalniania impaktora z obciążnikami uderzającego w próbkę opracowano z wykorzystaniem układu elektromagnesów 8 znajdującego się na kolumnie spadowej. W chwili ustalenia pozycji względem wysokości spadku, na elektromagnesach zostaje odcięte zasilanie, powodujące spadek impaktora. W celu zapobiegania odbijaniu się impaktora od próbki i kilkukrotnemu uderzeniu wykorzystano układ tychże elektromagnesów. Po odbiciu się impaktora od badanej próbki następuje jego przechwytywanie przez elektromagnesy, które włączają się w chwili osiągnięcia najwyższego punktu impaktora z obciążnikami po odbiciu się. Najwyższy punkt po odbiciu jest wyznaczany w sposób automatyczny na podstawie analizy prędkości określanej przy pomocy enkodera optycznego. W celu zapewnienia bezpiecznego użytkowania stanowiska zostało ono wyposażone w drzwi bezpieczeństwa z poliwęglanu 9 z folią utrudniającą przebicie. W cza-



Rysunek 1 Model CAD oraz fotografia stanowiska podczas prowadzenia badań
Figure 1 CAD model and a picture of a test rig during performing the tests

się przeprowadzania próby udarowej drzwi bezpieczeństwa są automatycznie blokowane i włączana jest sygnalizacja świetlna. Przezroczystość poliwęglanu i folii umożliwia obserwację eksperymentu przy pomocy metod wizyjnych.

2.2 Układy elektroniczne i pomiarowe

Układy elektroniczne zostały podzielone na dwie części: mocy i sterowania. Obie części zostały połączone za pośrednictwem taśmy 40-żyłowej.

Do płytki PCB mocy podłączone jest główne zasilanie, składające się z dwóch zasilaczy o wydajności 20 A/24 V oraz jednego zasilacza 5 A/12 V. Wszystkie podzespoły są zasilane z napięcia bezpiecznego. Większość układów jest sterowana wysokim stanem, tzn. przewód masowy jest podłączony na stałe, a po wystąpieniu odpowiedniego sygnału sterującego z mikroprocesora, tranzystor MOSFET zwiera przewód zasilający aktuatora do zasilania. Wyjątek stanowi sterowanie silnikami chwytaka próbki, gdzie zastosowano mostek typu H (L298), sterowanie chwytakiem części zrzucanej kolumny spadowej, w którym polaryzacja jest odwracana przekaźnikiem, oraz uruchomienie zasilaczy 24 V, gdzie również wykorzystano przekaźnik.

Na płytce PCB sterowania jest zamontowany mikroprocesor z rdzeniem ARM7 (LPC2366). Mikroprocesor wykonuje wszelkie niezbędne pomiary, obliczenia i sterowania na podstawie danych otrzymywanych od użytkownika za pośrednictwem portu RS232 (emulowanym z portu USB). Informacja o aktualnie wykonywanym zadaniu wyświetlana jest również na ekranie LCD 10. Na płytce znajdują się również stabilizatory 5 V i 3,3 V do zasilania mikroprocesora i czujników. Wszelkie wyjścia do sterowania aktuatorami są izolowane optycznie, co powinno zabezpieczyć mikroprocesor w przypadku wystąpienia awarii po stronie dużej mocy.

Stanowisko zostało wyposażone w szereg czujników, które można podzielić na czujniki sterowania i czujniki pomiarowe. Do czujników sterowania należą: enkodery optyczne, realizujące pozycjonowanie kolumny spadowej oraz pomiar prędkości spadku i kierunku ruchu; czujnik pomiaru długości narzędzia 11, służący do określenia rzeczywistej odległości od próbki, co jest wykorzystywane od przechwytywania kolumny spadowej po odbiciu od próbki oraz czujnik drzwi bezpieczeństwa 12, sprawdzający zamknięcie drzwi bezpieczeństwa przed przeprowadzeniem próby udarowej.

Głównym czujnikiem pomiarowym jest piezoelektryczny czujnik siły ICP 200C20 produkcji PCB Piezotronics 13 dedykowany do prób udarowych, który jest umieszczony w osi kolumny spadowej nad impaktorem oraz podłączony do komputera klasy PC poprzez kartę pomiarową VibDAQ 2.0 produkcji EC Electronics 14 za pośrednictwem portu USB. Przewidziano możliwość zamontowania akcelerometru na kolumnie spadowej w celu rejestracji przyspieszeń oraz dwóch kamer, pozwalających na rejestrację obrazu od spodu badanej płyty w przypadku testów perforacyjnych. Stanowisko jest sterowane z komputera klasy PC 15 przy pomocy terminalu RS232 za pośrednictwem portu RS232 emulowanego z portu USB.

2.3 Impaktory

Badania udarowe mogą być prowadzone z wykorzystaniem 14 impaktorów, różniących się cechami geometrycznymi końcówek. Impaktory te można podzielić na 3 grupy: z zaokrągloną końcówką, z zaostroszoną lub płaską końcówką oraz z wtopionymi kamieniami (Rys. 2).

Różnorodność cech geometrycznych końcówek impaktorów wynika z możliwości symulowania różnych stanów naprężeń i charakterystycznych uszkodzeń w kompozytach. Impaktory z końcówką zaokrągloną powodują zrywanie włókien, a w związku z tym charakteryzują się słabą penetrowalnością. Impaktory z płaską końcówką wywołują naprężenia ścinające we włóknach umacniających kompozyt i w jego osnowie, natomiast impaktory z końcówką stożkową i ostrołukową wywołują naprężenia rozciągające we włóknach, przy czym, rozchylając je na boki, penetrują osnowę kompozytu. Ostatnia grupa impaktorów została wykonana w celu symulowania rzeczywistych uderzeń kamieni w struktury kompozytowe. Takie uderzenia mogą mieć miejsce na przykład przy starcie samolotu i unoszeniu się drobnych kamieni z pasa startowego, przy uderzeniach kadłubów kompozytowych jednostek pływających i tak dalej.

3. PRZYKŁADOWE WYNIKI

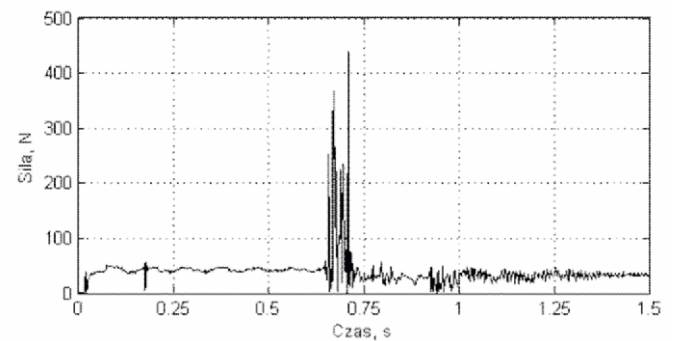
Wstępne testy zostały przeprowadzone na płytach warstwowych epoksydowo-szklanych (typ TSE-2) wyprodukowanych do celów badawczych przez Izo-Erg S.A. w Gliwicach. Płyty zawierały 12 warstw umacnianych tkaniną szklaną o gramaturze 200 g/m². Wyniki badań wytrzymałości-



Rysunek 2 Impaktory z zaokrągloną końcówką: a. R17, b. R14, c. R11, d. R8, e. R5 mm; impaktory: f. z płaską końcówką $\varnothing 34$ mm, g. z płaską końcówką $\varnothing 19$ mm, h. z końcówką stożkową, i. z końcówką ostrołukową; impaktory z wtopionymi kamieniami: j. z płaską powierzchnią uderzenia, k. z chropowatą powierzchnią uderzenia, l. z żebrzem kamienia uderzającego, m. z wierzchołkiem kamienia uderzającego, n. z wierzchołkiem kamienia uderzającego umieszczonym pod kątem

Figure 2 Impactors with the rounded end: a. R17, b. R14, c. R11, d. R8, e. R5 mm; impactors: f. with the flat end $\varnothing 34$ mm, g. with the flat end $\varnothing 19$ mm, h. with the conic end, i. with the arched end; impactors with immersed stones: j. with flat impact surface, k. with rough impact surface, l. edge-ended, m. vertex-ended, n. angle-oriented vertex-ended

wych i dynamicznych dla badanych płyt można znaleźć w pracy [13]. Do badań wykorzystano płyty o wymiarach 300×300 mm i grubości 2,5 mm. Zdjęcia uszkodzeń po uderzeniu przedstawia Rysunek 3. W danym przypadku badania wykonano z wykorzystaniem impaktora z końcówką ostrołukową (patrz Rys. 2i). Energia uderzenia wynosiła 20 J. Przebieg siły zmierzony podczas badań dla tego przypadku przedstawiono na Rys. 4. Częstotliwość próbkowania danych pomiarowych ustawiono na 512 Hz. Z uwagi na obciążenie wstępne czujnika (masa impaktora) wartości sygnału przed nastąpieniem uderzenia nie są zerowe.



Rysunek 4 Przebieg zmierzonego sygnału siły
Figure 4 Waveform of the measured force signal

4. PODSUMOWANIE

Niniejszy artykuł przedstawia opis stanowiska badawczego do prowadzenia testów uderowych płyt kompozytowych z kontrolowaną energią uderzenia. Zastosowane rozwiązania konstrukcyjne pozwalają na płynną regulację energii uderzenia oraz zapewniają wysoki stopień bezpieczeństwa operatora. Regulowane utwierdzenie pozwala badać próbki o różnych wymiarach i kształcie geometrycznym, a zestaw 14 impaktorów pozwala na prowadzenie badań uderowych w sze-



Rysunek 3 Od lewej: ogólny widok próbki po przeprowadzeniu badań, widok uszkodzenia z przodu oraz z tyłu
Figure 3 From the left: the overall view of a specimen after performing the tests, view of the damage from the top and from the bottom

rokiem zakresie. Zastosowane układy sterowania pozwalają na precyzyjne określenie parametrów testu, przy czym terminal software'owy zapewnia możliwość wyboru najbardziej korzystnego wariantu parametrów (przed wykonaniem testu program proponuje różne warianty pozwalające uzyskać żadaną energię uderzenia). Zastosowany piezoelektryczny czujnik siły pozwala na precyzyjny pomiar siły podczas uderzenia, a parame-

try komputera na prowadzenie pomiarów z bardzo wysoką prędkością akwizycji danych pomiarowych. Stanowisko jest wykorzystywane do badań udarowych w szerokim zakresie. Planuje się jego wykorzystanie w procesie dydaktycznym.

Projekt badawczy finansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki na podstawie decyzji DE-C-2011/03/N/ST8/06205.

LITERATURA

- [1] Barcikowski M., Wpływ materiałów i struktury laminatów poliestrowo-szkłanych na ich odporność na udar balistyczny, Rozprawa doktorska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin, 2012.
- [2] Belingardi G., Vadori R., Low velocity impact tests of laminate glass-fiber-epoxy matrix composite material plates, *International Journal of Impact Engineering*, 27, 2002, 213-229.
- [3] Tita V., de Carvalho J., Vandepitte D., Failure analysis of low velocity impact on thin composite laminates: Experimental and numerical approaches, *Composite Structures*, 83, 2008, 413-428.
- [4] Lisiecki J., Błażejewicz T., Kłysz S., Gmurczyk G., Wytworzenie i badanie elastycznej pianki poliuretanowej o ujemnym współczynniku Poissona, *Modelowanie Inżynierskie*, 42, 2011, 241-248.
- [5] Koo J.-M., Choi J.-H., Seok C.-S., Evaluation of residual strength and fatigue characteristics after impact in CFRP composites, *Composite Structures*, 105, 2013, 58-65.
- [6] Hufenbach W., Marques Ibrahim F., Langkamp A., Böhm R., Hornig A., Charpy impact tests on composite structures – An experimental and numerical investigation, *Composites Science and Technology*, 68, 2008, 2391-2400.
- [7] Corum J. M., Battiste R.L., Ruggles-Wrenn M. B., Low-energy impact effects on candidate automotive structural composites, *Composites Science and Technology*, 63, 2003, 755-769.
- [8] Woodward R. L., Egglestone G. T., Baxter B. J., Challis K., Resistance to penetration and compression of rib-reinforced composite materials, *Composites Engineering*, 4, 1994, 329-341.
- [9] Hallett S. R., Three-point beam impact tests on T300/914 carbon-fibre composites, *Composites Science and Technology*, 60, 2000, 115-124.
- [10] Okafor A. C., Otieno A. W., Dutta A., Rao V. S., Detection and characterization of high-velocity impact damage in advanced composite plates using multi-sensing techniques, *Composite Structures*, 54, 2001, 289-297.
- [11] Sabet A. R., Beheshty M. H., Rahimi H., High velocity impact behavior of GRP panels containing coarse-sized sand filler, *Polymer Composites*, 29, 2008, 932-938.
- [12] Walter T. R., Subhash G., Sankar B. V., Yen C. F., Damage modes in 3D glass fiber epoxy woven composites under high rate of impact loading, *Composites: Part B*, 40, 2009, 584-589.
- [13] Katunin A., Gnatowski A., Influence of heating rate on evolution of dynamic properties of polymeric laminates, *Plastics Rubber and Composites* 41, 6, 2012, 233-239.