

OCENA USZKODZEŃ UDAROWYCH RUR KOMPOZYTOWYCH WYKONANYCH METODĄ NAWIJANIA I ZAPROJEKTOWANYCH WEDŁUG METODY TABLICOWEJ

MARCELINA BOBROWSKA*, MICHAŁ BARCIKOWSKI**

*Centrum Technologii Kompozytowych, Instytut Lotnictwa, Al. Krakowska 110/114, 02-256 Warszawa

**Katedra Mechaniki i Inżynierii Materiałowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wroclawska,
ul. M. Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław

marcelina.bobrowska@ilot.edu.pl, michal.barcikowski@pwr.edu.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań uszkodzeń będących następstwem uderzenia wysokiej prędkości w konstrukcjach kompozytowych wytworzonych metodą nawijania włókna na mokro. Przebadano pięć warstwowych rur kompozytowych, które zostały zaprojektowane i wytworzone w taki sposób, aby była możliwa ocena wpływu struktury wzmocnienia – trzech, różnych wzorów mozaikowych – na rozmiar a także na charakter uszkodzeń powstałych w kompozycie na skutek uderzenia. Wzory mozaikowe dobrano z użyciem metody tablicowej, która pozwoliła uzyskać wiele wzorów mozaikowych różniących się wartością reszty skoku nawijania oraz liczbą przeplotów, będących miejscami koncentracji naprężeń i znacząco wpływających na wytrzymałość kompozytu. Udarowość kompozytowych konstrukcji nawijanych badano w zakresie dużych prędkości 140 ÷ 170 m/s. Trudno jednoznacznie określić, który z wzorów mozaikowych ma największą odporność udarową z zakresu wysokich prędkości.

Słowa kluczowe: Kompozytowe konstrukcje nawijane, uszkodzenia udarowe, udar balistyczny, metoda tablicowa, metoda nawijania włókna

1. WSTĘP

Rosnące wymagania wobec silnie obciążonych konstrukcji, szczególnie w budownictwie, przemyśle samochodowym i lotniczym, coraz częściej zmuszają do stosowania materiałów równocześnie lekkich, wytrzymałych i niezawodnych. Odpowiedzią na te wymagania mogą być konstrukcyjne materiały kompozytowe, które swój intensywny rozwój zawdzięczają dwóm cechom – niskiej masie struktury, mającej znaczenie pierwszorzędne oraz jej bardzo dobrym właściwościom mechanicznym, do których należą wysoka wytrzymałość na rozciąganie, odporność na udary i zdolność do rozpraszania energii. Wspomniane cechy są szczególnie pożądane – rozwój kompozytów jest intensywny, w dziedzinach takich jak lotnictwo (samoloty, promy kosmiczne) oraz zastosowania militarne (osłony balistyczne, pociski) [1, 2].

Przeprowadzane dotychczas badania z zakresu odporności udarowej kompozytów wytwarzanych metodą nawijania włókna na mokro dotyczyły jedynie uderzeń niskich prędkości – jako przykład

prace Perillo G. i in. [3, 4]. Zaprezentowane wyniki dotyczą uszkodzeń na skutek uderów balistycznych, stąd też trudno jest porównać przedstawione tu rezultaty z danymi literaturowymi.

W metodzie nawijania wyboru wzorów mozaikowych dokonano korzystając z metody tablicowej, opracowanej przez dr hab. Wojciecha Błażejewskiego i stosowanej w projektowaniu zbiorników kompozytowych. Pozwala ona uzyskać kilka rodzajów oplotów – wzorów mozaikowych – różniących się kolejnością układania wiązki na obwodzie próbki. Podstawowe kryterium wyboru wzorów stanowiła liczba przeplotów będących miejscami koncentracji naprężeń w danej strukturze i mogących wpływać na jej odporność udarową, co było przedmiotem niniejszych badań [5].

Do wywierania udaru balistycznego użyto działa gazowego, które umożliwia również wystrzeliwanie pocisku z prędkością odpowiadającą udarowi sub-balistycznemu (kilkadziesiąt m/s) – zjawisko dość powszechne w lotnictwie. Czas trwania takiego udaru jest na tyle krótki, że fale sprężyste rozchodzące się w materiale nie mają możliwości dotarcia do krawędzi uderzanego przedmiotu podczas trwania udaru. Udry balistyczne cechują się prędkościami rzędu kilkuset m/s. Jeszcze mniejszy – niż w przypadku udaru sub-balistycznego – czas trwania udaru balistycznego powoduje, że fale sprężyste w materiale nie zdążą się rozprzestrzenić – uszkodzenia ograniczają się jedynie do okolicy miejsca uderzenia – są efektem lokalnego przekroczenia granicy wytrzymałości na froncie fali [6].

2. DOBÓR STRUKTUR DO BADAŃ

2.1. Opis metody tablicowej

Metoda tablicowa [6, 7] umożliwia wygenerowanie wszystkich wariantów nawijania włókna – wzorów mozaikowych, z założeniem uzyskania regularnej sieci. Parametrami sterującymi są:

1. Współczynnik reszty skoku nawijania a ;
2. Przyjęta liczba naturalna n podziału obwodu πd elementu nawijanego.

Podział ten jest uzależniony od szerokości e wiązki nawijanej, tworzącej regularną sieć na cylindrze – wzór mozaikowy.

Najistotniejszym parametrem geometrycznym jest kąt nawijania α , bezpośrednio związany z rozkładem naprężeń w zbiorniku i wyprowadzony jako:

$$\begin{cases} \sigma_0 = \sigma_f \cdot (\sin \alpha)^2 \\ \sigma_w = \sigma_f \cdot (\cos \alpha)^2 \end{cases} \quad (1)$$

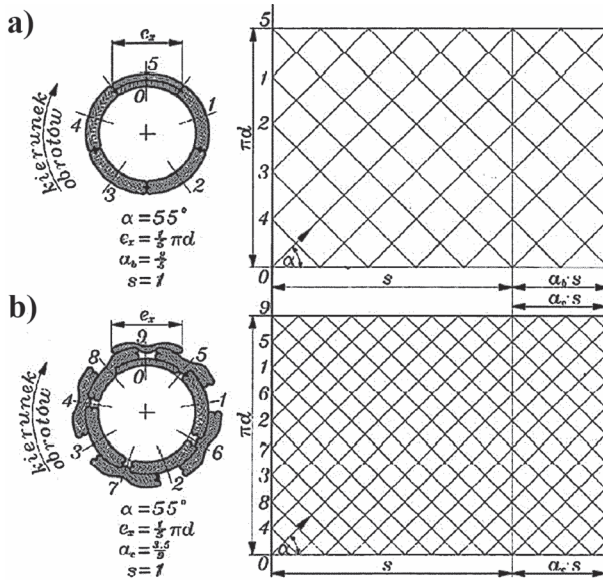
lub

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_w} = (\tan \alpha)^2 \quad (2)$$

Prezentowana metoda pozwala, na podstawie prostych zasad graficzno-analitycznych, opisać skomplikowaną strukturę nawijaną za pomocą dwóch parametrów – kąta nawijania α oraz średnicy rdzenia d . Na ich podstawie możliwe jest wyznaczenie następujących parametrów: skoku nawijania s oraz współczynnika reszty skoku nawijania a , wybieranego z przedziału $a \in (0, 1)$.

Warunek wzoru mozaikowego zostaje spełniony tylko wtedy, gdy rdzeń jest całkowicie pokryty równomierną warstwą przesyconych wiązek rowingu. W przeciwnym razie wystąpią luki i nierówności. Oba przypadki charakteryzujące się taką samą: średnicą rdzenia d , skokiem nawijania s , kątem nawijania α ,

i szerokością wiązki e a różniące się współczynnikiem reszty skoku nawijania a przedstawiono na rysunku 1.

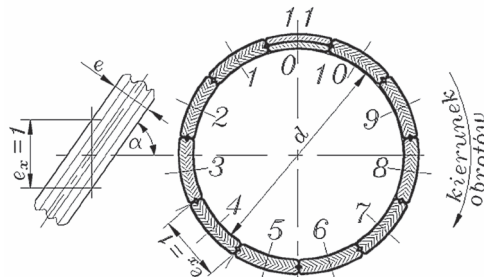


Rys. 1. Schematy rzutów czołowych wzorów mozaikowych, nawiniętych wiązką o tej samej szerokości e_x i ich rozwinięcia:
 a) $a_a = 2/5$ – prawidłowy; b) $a_b = 3.5/9$ – nieprawidłowy

Ideę metody tablicowej przedstawiono na rysunku 2. Założono uzyskanie zbiornika pokrytego równomiernie przesyconymi wiązkami rowingu dla następujących parametrów:

1. Pokrycie obwodu zbiornika $2\pi r = 11$ wiązek na obwodzie;
2. Kąt nawijania włókna $\alpha = 55^\circ$;
3. Szerokość pasma e_x w przekroju poprzecznym rdzenia:

$$e_x = \frac{e}{\cos \alpha} = 1 \tag{3}$$



Rys. 2. Rdzeń z jedenastoma pasmami przesyconego rowingu szklanego rozmieszczonymi równomiernie na obwodzie oraz widok pojedynczej wiązki o szerokości e i e_x w płaszczyźnie przekroju prostokątnego do osi rdzenia, kąt nawinięcia wiązki $\alpha = 55^\circ$

Do uzyskania zakładanej struktury niezbędne jest określenie liczby przejść suportu nawijarki, którą oblicza się:

$$Z = \frac{2\pi r}{e_x} = 11 \quad (4)$$

Wszystkie możliwe do uzyskania przypadki wzorów mozaikowych przedstawiono na rysunku 3, każdy z nich opisany jest przez jedynie dwie liczby np. 11/4 (wielkość tablicy oraz numer wiersza).

Nr	πd	a
0	0 - - - - - - - - - - 1	0
1	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11	1/22
2	0 6 1 7 2 8 3 9 4 10 5 11	2/22
3	0 4 8 1 5 9 2 6 10 3 7 11	3/22
4	0 3 6 9 1 4 7 10 2 5 8 11	4/22
5	0 9 7 5 3 1 10 8 6 4 2 11	5/22
6	0 2 4 6 8 10 1 3 5 7 9 11	6/22
7	0 8 5 2 10 7 4 1 9 6 3 11	7/22
8	0 7 3 10 6 2 9 5 1 8 4 11	8/22
9	0 5 10 4 9 3 8 2 7 1 6 11	9/22
10	0 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 11	10/22
11	0 - - - - - - - - - - 1	11/22
12	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11	12/22
13	0 6 1 7 2 8 3 9 4 10 5 11	13/22
14	0 4 8 1 5 9 2 6 10 3 7 11	14/22
15	0 3 6 9 1 4 7 10 2 5 8 11	15/22
16	0 9 7 5 3 1 10 8 6 4 2 11	16/22
17	0 2 4 6 8 10 1 3 5 7 9 11	17/22
18	0 8 5 2 10 7 4 1 9 6 3 11	18/22
19	0 7 3 10 6 2 9 5 1 8 4 11	19/22
20	0 5 10 4 9 3 8 2 7 1 6 11	20/22
21	0 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 11	21/22
22	0 - - - - - - - - - - 1	22/22

Rys. 3. Tablica wzorów mozaikowych dla 11 przejść suportu

Kolumny tablicy zawierają:

1. Kolejny numer wzoru mozaikowego N_r ;
2. Obwód rdzenia πd , zapisany w postaci liczb będących kolejnymi numerami wiązek nawijanych na rdzeń – podczas wstawiania numerów wiązek ($0 \div 11$) zastosowano zasadę „na przekątnej jedynka”, a następnie wpisywano kolejne liczby w odstępach takich, jakie powstały między zerem a jedynką;
3. Współczynnik reszty skoku nawijania a , wyznaczony z zależności:

$$a = \frac{N_r}{Z} \quad (5)$$

gdzie: Z – liczba przejść bądź liczba nawrotów suportu, n – największy numer wiązki w warstwie ($n \in N$), N_r – numer wzoru mozaikowego.

Ze względu na współczynnik reszty skoku nawijania a tablica dzieli się na cztery przedziały podobieństwa wzorów mozaikowych:

1. $a \in (0; 0,25)$;
2. $a \in (0,25; 0,5)$;
3. $a \in (0,5; 0,75)$;
4. $a \in (0,75; 1)$.

Podział na grupy występuje również w kolumnie opisującej obwód rdzenia πd . Kolejność liczb w wierszu pokazuje, że wzór $N_r I$ jest w efekcie końcowym taki sam jak 10, 12 i 21. Jedyną różnicą jest zwrot kierunku narastania kolejnych numerów wiązek na obwodzie.

Analogicznie można wyróżnić jeszcze cztery grupy podobieństwa wzorów mozaikowych:

1. 2, 9, 13, 20;
2. 3, 8, 14, 19;
3. 4, 7, 15, 18;
4. 5, 6, 16, 17;

Przedstawione zależności podobieństw znacznie upraszczają tablicę – poprzez zapisanie tylko tych wierszy, które spełniają warunek $a \in (0; 0,25)$, co zaznaczono pogrubionym drukiem na rysunku 3.

Liczba przeplotów obliczona została na podstawie wzoru:

$$Lp_i = 8Np_i(T - Np_i) \quad (6)$$

gdzie: Lp_i – liczba przeplotów w analizowanym wzorze mozaikowym, T – numer analizowanej tablicy, Np_i – numer w szeregu wzorów mozaikowych ułożonych według liczby przeplotów z analizowanej tablicy T możliwy do wyliczenia według wzoru:

$$Np_i = T / N_r i \quad (7)$$

gdzie: $N_r i$ – analizowany wzór mozaikowy.

Prawidłowy dobór wzoru mozaikowego polega na określeniu optymalnego rozmieszczenia przeplotów, które mają bezpośredni wpływ na wytrzymałość całej struktury. Współpraca składników obciążonego ciśnieniowo kompozytu spowodowana jest zjawiskiem ścinania między poszczególnymi wiązkami, momentami skręcającymi oraz prostowaniem się włókien rozciąganych. Zjawiska te bezpośrednio wpływają na wytrzymałość kompozytu i zależą od długości wiązki nieprzeplecionej Δl odpowiadającej liczbie przeplotów, w których to miejscach następuje załamanie włókien. Jest to przyczyną ich miejscowego odchylenia osi od kierunku występujących w kompozycie naprężeń oraz może stanowić rodzaj karbu. Natomiast nadmierna odległość Δl może przyczynić się do występowania rozwarstwień kompozytu.

2.2. Obliczenia i wybór struktur

Ustalono, że końcowa grubość nawiniętych struktur ścianki materiału kompozytowego powinna wynosić ok. 4 mm. Zmierzone grubość pojedynczej warstwy, która równa była ok 0,4 mm i na tej podstawie obliczono liczbę warstw koniecznych do nawinięcia, równą 11.

Szerokości nawijanej wiązki dobrano w taki sposób, aby widoczna była znaczna różnica między ich wielkościami. Przyjęto następujące parametry nawijania: dwie szerokości wiązki: 5 mm, złożoną z jednego rowingu tex 1200 i 17 mm, zespoloną z pięciu rowingów, kąt nawijania α równy $54,7^\circ$,

średnica rdzenia $d = 110$ mm, niezmienna na całej długości, Były one punktem wyjścia do przeprowadzenia niezbędnych obliczeń.

Rozpoczęto od obliczenia wartości e_x , która dla szerokości wiązki złożonej z pięciu rowingów, równej 17 mm wyniosła:

$$e_x = \frac{e}{\cos \alpha} = \frac{17}{\cos 54,7^\circ} = 29,42 \text{ mm} \quad (8)$$

Na jej podstawie wyliczono ilość zespolonych wiązek Z , które znajdują się na obwodzie rdzenia:

$$Z = \frac{2\pi r}{e_x} = \frac{2 \cdot 55 \cdot \pi}{29,42} = 11,75 \sim 12 \quad (9)$$

Wartości skoku nawijania s obliczono ze wzoru:

$$s = \frac{\pi d}{\tan d} = \frac{110 \cdot \pi}{\tan 54,7^\circ} = 244,68 \text{ mm} \quad (10)$$

Istotnym parametrem w projektowaniu struktur mozaikowych jest stopień wypełnienia C %. Jego wartość dla pierwszej warstwy, przy założeniu, że na obwodzie umieszczonych zostanie 40 wiązek, wynosi:

$$C \% = \frac{12 \cdot e_x}{\pi d} \cdot 100 \% = \frac{12 \cdot 29,42}{110 \cdot \pi} \cdot 100 \% = 104,02 \% \quad (11)$$

Wraz z nawinięciem kolejnej warstwy, średnica rdzenia będzie się zwiększać. Każda kolejna warstwa będzie miała więc mniejszy stopień wypełnienia i dla ostatniej warstwy byłby on mniejszy niż 100%. Dlatego też ustalono, że liczba pasm Z zostanie zwiększona o 1 i będzie wynosić 13 wiązek. Przy takim założeniu stopień wypełnienia C % dla pierwszej warstwy wyniesie:

$$C \% = \frac{13 \cdot e_x}{\pi d} \cdot 100 \% = \frac{13 \cdot 29,42}{100 \cdot \pi} \cdot 100 \% = 110,67 \% \quad (12)$$

Analogiczne obliczenia przeprowadzono dla struktur o szerokości wiązki równej 5 mm.

Ponadto zwiększenie liczby wiązek na obwodzie o 1, tak by ich liczba odpowiadała liczbie pierwszej ma jeszcze jedno uzasadnienie – daje ona większy wybór wzorów mozaikowych.

Obliczone parametry posłużyły do wygenerowania tablicy możliwych wzorów mozaikowych dla 13 przejść suportu (Rys. 4). Poprzez pogrubienie wskazano struktury wybrane do badań, są to:

1. $N_{r,1}$ – struktura o najmniejszej liczbie przeplotów;
2. $N_{r,2}$ – struktura o największej liczbie przeplotów;
3. $N_{r,4}$ – struktura o pośredniej liczbie przeplotów.

Ręczne generowanie tablicy dla 41 przejść suportu byłoby procesem dość czasochłonnym, dlatego też do generacji struktur dla wiązki o szerokości 5 mm użyto programu Nawijarka v2.2 [9].

Zbiór parametrów właściwych dla danej struktury zestawiono w tabeli 1.

N_r	πd													a	
0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0
1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	1/26
2	0	7	1	8	2	9	3	10	4	11	5	12	6	13	2/26
3	0	9	5	1	10	6	2	11	7	3	12	8	4	13	3/26
4	0	10	7	4	1	11	8	5	2	12	9	6	3	13	4/26
5	0	8	3	11	6	1	9	4	12	7	2	10	5	13	5/26
6	0	11	9	7	5	3	1	12	10	8	6	4	2	13	6/26
7	0	2	4	6	8	10	12	1	3	5	7	9	11	13	7/26
8	0	5	10	2	7	12	4	9	1	6	11	3	8	13	8/26
9	0	3	6	9	12	2	5	8	11	1	4	7	10	13	9/26
10	0	4	8	12	3	7	11	2	6	10	1	5	9	13	10/26
11	0	6	12	5	11	4	10	3	9	2	8	1	7	13	11/26
12	0	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	13	12/26
13	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	13/26
14	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14/26
15	0	7	1	8	2	9	3	10	4	11	5	12	6	13	15/26
16	0	9	5	1	10	6	2	11	7	3	12	8	4	13	16/26
17	0	10	7	4	1	11	8	5	2	12	9	6	3	13	17/26
18	0	8	3	11	6	1	9	4	12	7	2	10	5	13	18/26
19	0	11	9	7	5	3	1	12	10	8	6	4	2	13	19/26
20	0	2	4	6	8	10	12	1	3	5	7	9	11	13	20/26
21	0	5	10	2	7	12	4	9	1	6	11	3	8	13	21/26
22	0	3	6	9	12	2	5	8	11	1	4	7	10	13	22/26
23	0	4	8	12	3	7	11	2	6	10	1	5	9	13	23/26
24	0	6	12	5	11	4	10	3	9	2	8	1	7	13	24/26
25	0	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	13	25/26
26	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	26/26

Rys. 4. Tablica wzorów mozaikowych dla 13 przejść suportu [8]

Tab.1. Zestawienie właściwości otrzymanych struktur [8]

Lp.	Numer struktury	Numer wzoru mozaikowego (według Rys. 4)	Szerokość wiązki e , mm	Liczba przeplotów
1	N_r1	1	5	360
2	N_r2	2	5	3360
3	N_r4	4	5	2480
4	N_r1	1	17	96
5	N_r2	2	17	336

3. WYKONANIE PRÓBEK RUROWYCH METODĄ NAWIJANIA

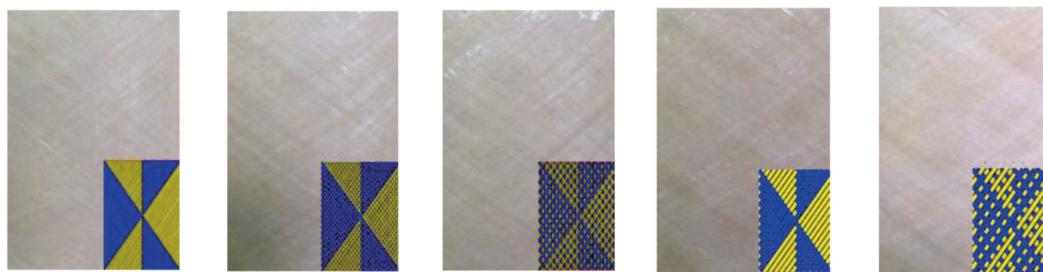
Do wykonania zaprojektowanych wcześniej struktur użyto rowingu szklanego ER 3005/1200/10 ze szkła typu E. Jest on wykonany w postaci nawojów, z pasm ciągłych, bez podziału, o jednakowym naprężeniu. Grubość włókna elementarnego wynosi $10 \div 15 \mu\text{m}$. Rowing produkowany jest z preparacją, która sprawia, że jest on bardzo miękki, a w związku z zastosowanym środkiem chemicznie czynnym w postaci epoksyilanu znajduje zastosowanie głównie jako wzmocnienie żywic epoksydowych w metodzie nawijania lub przeciągania.

Materiałem osnowy była żywica Epolam 5015 oraz utwardzacz Epolam 2016 firmy Axson. Zgodnie z kartą technologiczną substancje zmieszano w stosunku wagowym 100/36. Zaletami mieszaniny są: zmienna reaktywność, bardzo dobra zwilżalność włókna, brak pienienia się i odporność na środowisko wilgotne. Ponadto takie połączenie żywicy i utwardzacza pozwala na długi czas trwania nawijania, co w warunkach laboratoryjnych, a w szczególności podczas nawijania cienkich wiązek jest aspektem bardzo istotnym.

Dla tak dobranego składu matrycy nawinięte próbki przechowywano przez minimum 24 h w temperaturze 20°C. Po tym czasie umieszczono je w piecu i wygrzewano przez 12 h w temperaturze 70°C, zgodnie z zaleceniami karty technologicznej.

Wytworzono pięć rur kompozytowych, każda o długości 1000 mm i grubości podanej w tabeli 2. Grubość nawijanych próbek jest niemożliwa do jednoznacznego określenia, gdyż ich powierzchnia nie jest idealnie gładka.

Widoki rzeczywistych struktur wraz z ich graficznymi ilustracjami przedstawiono na rysunku 5.



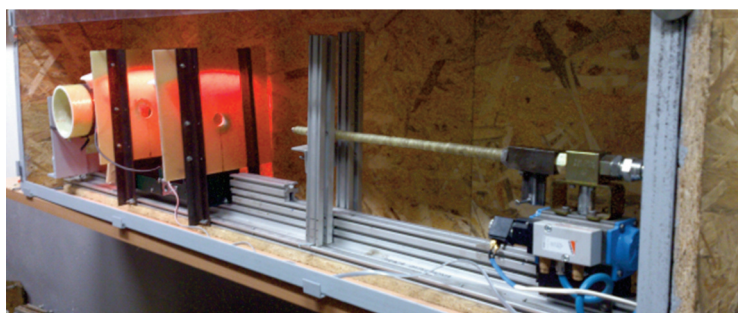
Rys. 5. Widok rzeczywistej struktury wraz z jej graficzną ilustracją: a) $N_{r,1}$ wiązka o szer. 5 mm; b) $N_{r,2}$ wiązka o szer. 5 mm; c) $N_{r,4}$ wiązka o szer. 5 mm; d) $N_{r,1}$ wiązka o szer. 17 mm; e) $N_{r,2}$ wiązka o szer. 17 mm [8]

Tab. 2. Wartości grubości próbek dla poszczególnych rodzajów struktur [8]

	Rodzaj struktury				
	$N_{r,1}$ (5 mm)	$N_{r,2}$ (5 mm)	$N_{r,4}$ (5 mm)	$N_{r,1}$ (17 mm)	$N_{r,2}$ (17 mm)
Średnia grubość struktury, mm	4,20	4,34	3,60	5,84	6,31

4. STANOWISKO DO BADAŃ UDAROWYCH

Konstrukcja stanowiska do badań udarowych dzieli się na dwie części: miotającą oraz mocująco-pomiarową, które umieszczone są na szynie (Rys. 6). Ze względów bezpieczeństwa całość konstrukcji umieszczona została w specjalnej klatce ochronnej, osłoniętej od przodu płytą poliwęglanową, co pozwala na obserwację momentu trwania udaru.



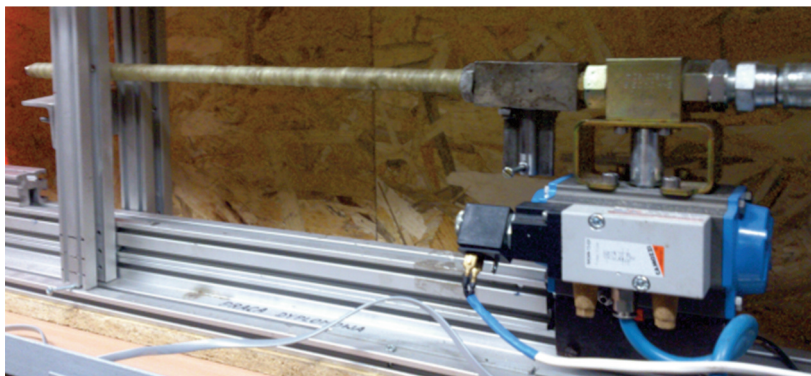
Rys. 6. Stanowisko do badań: 1 – część miotająca, 2 – mocująco-pomiarowa, umieszczone w klatce ochronnej [8]

Część miotająca o budowie modułowej (Rys. 7) napędza impaktor w postaci stalowej kulki za pomocą sprężonego powietrza. Elementami części miotającej są: działko właściwe, butla ze sprężonym powietrzem oraz łączący je przewód.

Zaletą konstrukcji modułowej jest możliwość zastosowania różnych zasobników gazów pod ciśnieniem.

Samo działko właściwe też ma konstrukcję modułową, której elementami są: zespół lufy, zespół komory zamkowej i zespół spustowy. Lufa jest modułem wymiennym – możliwe jest stosowanie luf o różnej długości i dowolnym kalibrze, (jednak do 10 mm). Na potrzeby badań zastosowano lufę o kalibrze 8 mm i długości 500 mm.

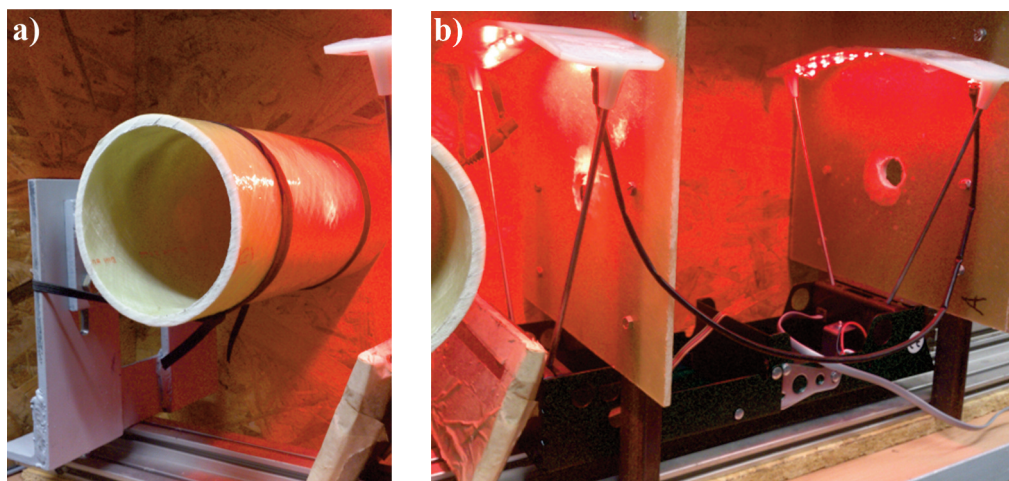
Zasilanie działka gazowego stanowi sprężone powietrze techniczne podawane za pośrednictwem reduktora butlowego, pozwalającego osiągnąć ciśnienie maksymalne 150 bar. Elementy te połączone są ze sobą poprzez giętki, zbrojony przewód, pełniący także funkcję pośredniego zasobnika powietrza. Odcięcie dopływu powietrza odbywa się poprzez zawór kulowy umieszczony między reduktorem a przewodem.



Rys. 7. Część miotająca – działko gazowe [8]

Układ miotający zaprojektowano do napędzania impaktorów kulistych. Użycie impaktorów innych niż kuliste jest możliwe, ale ze względu na konstrukcję samej komory zamkowej, ładowanie odbywałoby się odprzodowo (od wylotu lufy).

Część mocująco-pomiarową stanowi uchwyt do próbek oraz zespół pomiarowy, przedstawiony na rysunku 8.



Rys. 8. Część mocująco-pomiarowa: a) uchwyt do próbek; b) zespół pomiarowy [8]

Zespół pomiarowy złożony jest z chronografu balistycznego Shooting Chrony M-1 Master oraz oprzyrządowania pomocniczego. Przed każdą bramką umiejscowiono także ekran przeciwpodmuchowy, którego zadaniem jest zapobieganie zakłóceniom pracy chronografu, wynikającym z ciśnienia sprężonego powietrza uwalnianego z lufy.

Na końcu szyny montażowej umieszczony został uchwyt do próbek. Odpowiednia konstrukcja uchwytu – możliwość przesuwania go zarówno w osi pionowej jak i poziomej – umożliwia precyzyjne umieszczenie próbki tak, by impaktor uderzał normalnie do powierzchni bocznej walca. Mocowanie próbki do uchwytu opiera się na dwóch opaskach elastycznych, umiejscowionych po jednej przy każdym kątowniku.

5. PRZEBIEG BADAŃ UDAROWYCH

W otworze zamka układu miotającego umieszczany był impaktor w postaci ulepszonej ciepłnie, stalowej kulki o średnicy 7,86 mm i masie 2,0 g. Wypełnienie sprężonym powietrzem przewodu zasilającego odbywa się poprzez odkręcenie zaworów na butli oraz reduktorze a także otwarcie zaworu odcinającego. Po napełnieniu przewodu zasilającego zawór odcinający zostaje zamknięty. Otwarcie zaworu elektropneumatycznego powoduje uwolnienie impaktora – rozprężający się adiabatycznie gaz napędza go wzdłuż przewodu lufy. Impaktor trafia w wyznaczony punkt na próbce, a jego zderzenie z próbką należy do zderzeń niedoskonale sprężystych.

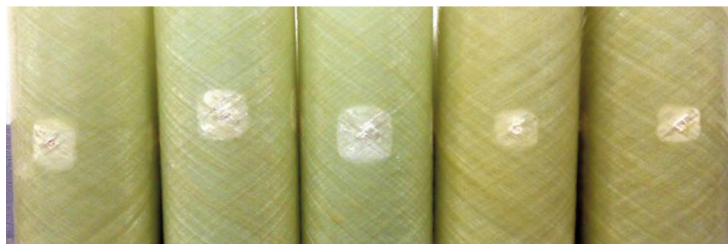
Celem porównania wpływu prędkości na uszkodzenia próbki wybrano trzy różne prędkości udaru (Tab. 3), podczas gdy masa impaktora pozostawała niezmienna. Do każdego rodzaju materiału oddano po cztery strzały z daną prędkością.

Tab. 3. Prędkości impaktora i energie udaru [8]

Prędkość impaktora, m/s	Energia impaktora, J
143,7 ± 1,2	20,65 ± 0,35
159,5 ± 1,2	25,43 ± 0,37
172,4 ± 1,3	29,71 ± 0,45

6. POMIAR POWIERZCHNI USZKODZEŃ – ANALIZA OBRAZU W ŚWIETLE WIDZIALNYM

Do każdej próbki oddano cztery strzały, każdorazowo obracając ją o 90°. Punkt pierwszy zawsze odpowiadał miejscu krzyżowania się włókien ostatniej warstwy. Zabieg ten umożliwił porównanie ze sobą dwóch różnych obszarów struktury, występujących naprzemiennie na obwodzie rury. Przykładowe powierzchnie uszkodzeń w świetle dziennym przedstawiono na rysunku 9.

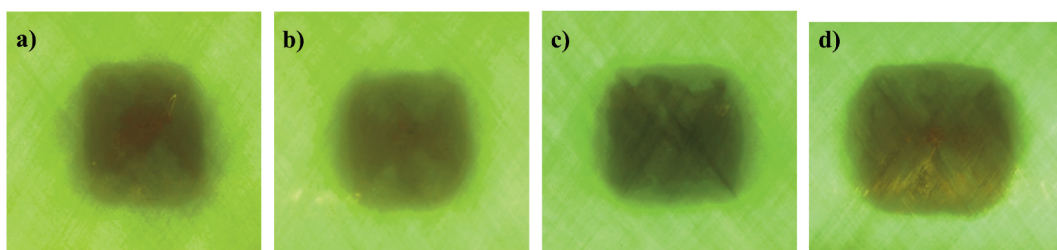


Rys. 9. Przykładowe powierzchnie uszkodzeń po udarze o energii 30 J, widoczne w świetle dziennym [8]

Obserwacja w świetle dziennym nie dawała możliwości pełnej analizy uszkodzonego obszaru – część uszkodzonej powierzchni nie była widoczna. Dokonanie prawidłowego pomiaru możliwe było poprzez oświetlenie próbki mocnym światłem, a następnie obrysowanie całego uszkodzonego obszaru. W świetle przechodzącym powierzchnia zdelaminowana odpowiadała polu o ciemniejszej barwie.

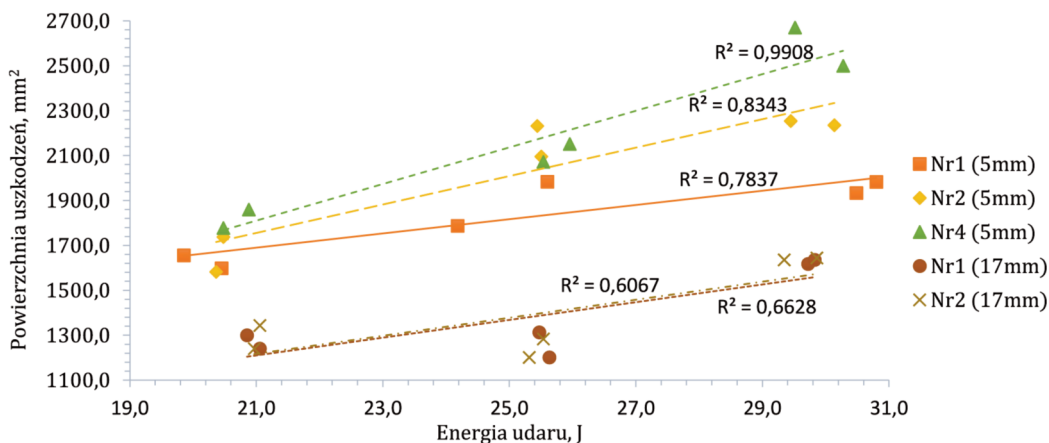
W związku z tym, że badane próbki nie były płaskie, konieczne było odrysowanie z użyciem kalki technicznej obszarów uszkodzeń, gdy próbka była umieszczona w świetle przechodzącym. Otrzymane kopie zeskanowano, a następnie poddano pomiarom z użyciem programu komputerowego Scion Image. Analiza z użyciem programu opierała się na wczytaniu kopii, a następnie cyfrowym pomiarze pola powierzchni obrazu w pikselach. Rzeczywiste pole powierzchni uzyskiwano w wyniku przeliczenia rozdzielczości obrazu – przy skanowaniu kopii konieczne było umieszczenie obok skali liniowej.

Przykładowe obrazy próbek po jednorazowym udarze przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 10. Zdjęcia w świetle przechodzącym struktur po udarze: a) 20 J, N_r ,1 szer. wiązki 17 mm; b) 30 J, N_r ,1 szer. wiązki 17 mm; c) 20 J, N_r ,4 szer. wiązki 5 mm; d) 30 J, N_r ,4 szer. wiązki 5 mm [8]

Wykresy (Rys. 11, 12) stanowią porównanie powierzchni uszkodzeń w zależności od energii udaru, gdzie cechą porównywaną stanowił rodzaj struktury z uwzględnieniem szerokości nawijanych zestawów wiązek.



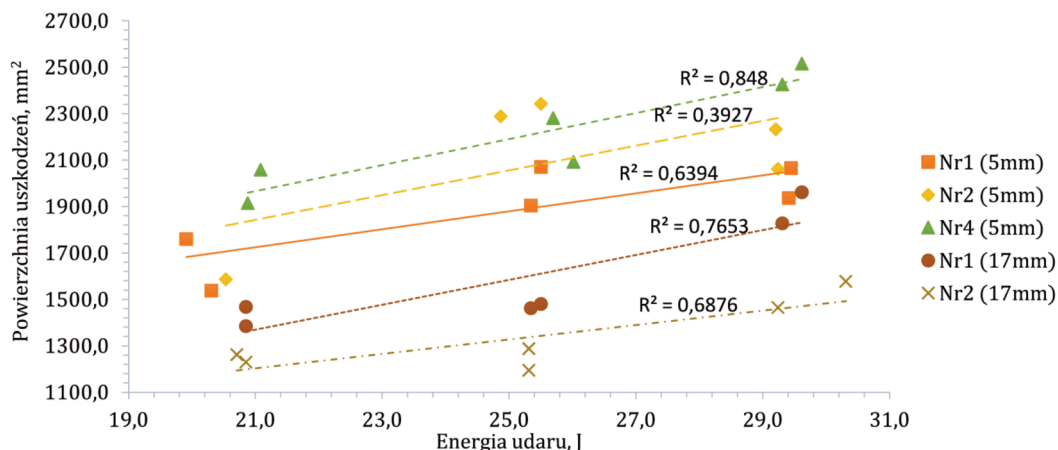
Rys. 11. Porównanie powierzchni uszkodzeń w zależności od energii udaru dla dwóch jednakowych punktów trafienia (1 i 3) wszystkich struktur [8]

W tabeli 4 umieszczone są wszystkie współczynniki korelacji liniowej zależności powierzchni uszkodzeń od energii udaru, wyliczone dla struktur, gdy udar następował w punktach 1 i 3 na obwodzie próbki, tj. w punktach krzyżowania się włókien.

Tab. 4. Współczynniki korelacji liniowej zależności powierzchni pola uszkodzeń – energia uderu dla poszczególnych struktur wyznaczony dla punktów trafienia 1 i 3 [8]

Rodzaj struktury	Współczynnik korelacji dla punktu 1	Współczynnik korelacji dla punktu 3
N_r1 (szerokość wiązki 5 mm)	0,9942	0,7460
N_r2 (szerokość wiązki 5 mm)	0,9248	0,8305
N_r4 (szerokość wiązki 5 mm)	0,9908	0,9326
N_r1 (szerokość wiązki 17 mm)	0,7605	0,2115
N_r2 (szerokość wiązki 17 mm)	0,5947	0,6558

Opisaną czynność powtórzono dla punktów oznaczonych jako 2 i 4 na obwodzie próbki, tj. punktów będących środkami rombów, których boki wyznaczone są przez przecinające się włókna, a wyniki przedstawiono na rysunku 12.



Rys. 12. Porównanie powierzchni uszkodzeń w zależności od energii uderu dla dwóch jednakowych punktów trafienia (2 i 4) wszystkich struktur [8]

Powyższy wykres (Rys. 12) przedstawia znacznie większe rozbieżności w zależności powierzchni uszkodzeń od energii uderu. Zależność liniowa występuje w niewielkim stopniu, co potwierdza obliczony i umieszczony w tabeli 5 współczynnik korelacji.

Wyraźna liniowość widoczna jest jedynie dla struktury N_r4 – oba współczynniki korelacji są bliskie wartości jedności.

Przy analizowaniu powierzchni uszkodzeń między poszczególnymi strukturami należy wziąć pod uwagę również grubość próbek poddanych badaniom. Ponieważ, jak wynika z tabeli 2, grubość struktury N_r4 jest najmniejsza – może to stanowić uzasadnienie, dlaczego obszary uszkodzeń dla tej właśnie struktury są największe. Podobnie jest ze strukturą N_r2 , gdzie szerokość wiązki wynosi 17 mm – jest ona najgrubsza oraz, jak można odczytać z wykresu, średnie powierzchnie uszkodzeń dla tej próbki wykazują wartości najmniejsze.

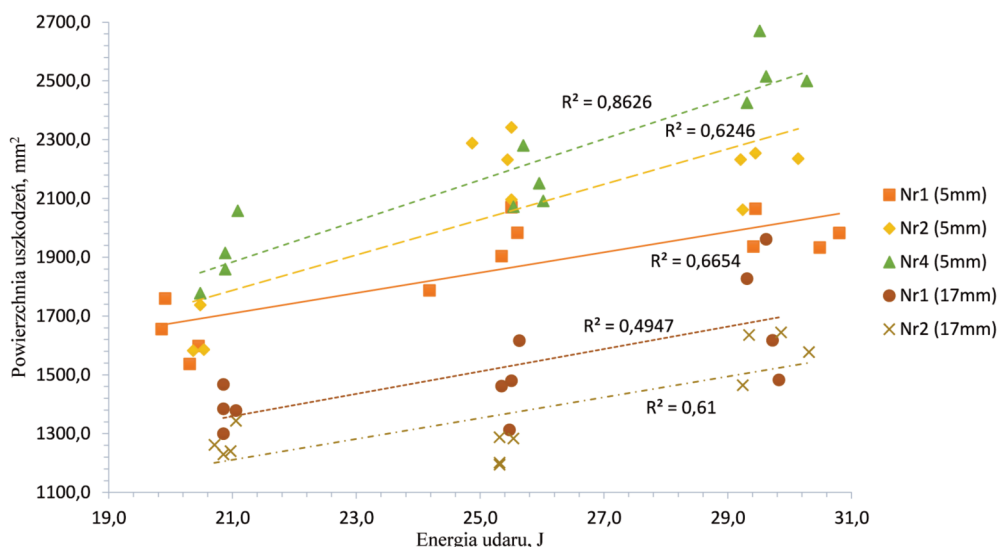
Na kolejnym wykresie (Rys. 13) przedstawiono uśrednione (na podstawie wszystkich czterech punktów trafienia) wartości powierzchni uszkodzeń w zależności od energii uderu.

Wyznaczone dla wszystkich przypadków – uśrednione oraz dla poszczególnych punktów trafienia współczynniki korelacji liniowej zestawiono w tabeli 6.

Tab. 5. Współczynniki korelacji liniowej zależności powierzchni pola uszkodzeń – energia udu dla poszczególnych struktur wyznaczony dla punktów trafienia 2 i 4 [8]

Rodzaj struktury	Współczynnik korelacji dla punktu 2	Współczynnik korelacji dla punktu 4
N_r1 (szerokość wiązki 5 mm)	0,9739	0,4203
N_r2 (szerokość wiązki 5 mm)	0,5803	-
N_r4 (szerokość wiązki 5 mm)	0,8926	0,9974
N_r1 (szerokość wiązki 17 mm)	0,7288	0,8657
N_r2 (szerokość wiązki 17 mm)	0,9006	0,6185

„-” oznacza brak możliwości wyliczenia współczynnika w związku z za małą liczbą danych – jeden ze strzałów był nieudany.



Rys. 13. Porównanie uśrednionych powierzchni uszkodzeń w zależności od energii udu [8]

Tab. 6. Porównanie wartości średniej oraz wyznaczonych dla punktów trafienia 1 i 3 a także 2 i 4 współczynników korelacji liniowej zależności powierzchni pola uszkodzeń – energia udu dla poszczególnych struktur [8]

Rodzaj struktury	Współczynnik korelacji (średnia dla wszystkich punktów)	Współczynnik korelacji (dla punktów trafienia 1 i 3)	Współczynnik korelacji (dla punktów trafienia 2 i 4)
N_r1 (szerokość wiązki 5 mm)	0,6654	0,7837	0,6394
N_r2 (szerokość wiązki 5 mm)	0,6246	0,8343	0,3927
N_r4 (szerokość wiązki 5 mm)	0,8626	0,9908	0,8480
N_r1 (szerokość wiązki 17 mm)	0,4947	0,6628	0,7653
N_r2 (szerokość wiązki 17 mm)	0,6100	0,6027	0,6876

7. WNIOSKI

Przeprowadzone badania nie dają jednoznacznej odpowiedzi, który z wzorów mozaikowych ma największą odporność udarową z zakresu wysokich prędkości. Na podstawie analizy wyników przeprowadzonych doświadczeń przedstawiono następujące wnioski:

1. Dla ścianek kompozytowych nawijanych wiązką szerokości 5 mm najmniejsze uszkodzenia zaobserwowano dla wzoru mozaikowego $N_r,1$, tj. o najmniejszej liczbie przepłotów, a dla ścianek nawijanych wiązką o szerokości 17 mm najmniejsze obszary delaminacji (o średnio $\frac{1}{4}$ mniejsze niż dla wzoru $N_r,1 - 5$ mm) były dla wzoru $N_r,2$, czyli o największej liczbie przepłotów. Wyniki te nie dają odpowiedzi, który z badanych wzorów mozaikowych ma największą odporność na uszkodzenia udarowe. Dla obu przypadków istotna jest również grubość nawiniętych ścianek – wzór mozaikowy $N_r,1$ (5 mm) jest 1,5 raza cieńsza od $N_r,2$ (17 mm), co również ma wpływ na odporność udarową kompozytu i może stanowić wyjaśnienie, dlaczego obszary uszkodzeń dla wzoru $N_r,1$ (5 mm) są znacznie większe niż $N_r,2$ (17 mm).
2. Porównanie wielkości powierzchni zdelaminowanych próbek nawijanych cieńszą wiązką według wzorów $N_r,1$ oraz $N_r,2$, których grubość różni się od siebie o 0,14 mm, pozwala domniemywać, że rodzaj wzoru mozaikowego ma jednak wpływ na odporność udarową otrzymanego kompozytu, a większą odporność ma ścianka nawijana wg wzoru $N_r,1$. Dla struktur nawijanych szerszą wiązką jest odwrotnie – mniejsze uszkodzenia były dla wzoru $N_r,2$, ale jest ona też znacznie grubsza (0,50 mm) od struktury $N_r,1$, stąd też zasadność tego porównania jest wątpliwa.
3. Spodziewana, na podstawie danych literaturowych dotyczących udarów niskich prędkości, liniowa zależność powierzchni obszaru uszkodzonego na skutek udaru od energii tego udaru jednoznacznie potwierdzona została tylko dla jednego rodzaju wzoru – $N_r,4$, dla którego to średni współczynnik korelacji liniowej wyniósł 0,8626, a indywidualne współczynniki korelacji wyliczone dla poszczególnych punktów trafienia były bliskie 1.
4. Nie można jednoznacznie określić, jak punkt trafienia wpływa na wielkość obszaru uszkodzeń – dla żadnej ze struktur powierzchni uszkodzeń w danym punkcie ($1 \div 4$), powstała na skutek udaru była zawsze większa od innych, niezależnie od energii udaru.
5. Kolejnym powodem, który mógł przyczynić się do uzyskania niepoprawnych wyników jest proces nawijania. Niewielkie przesunięcia włókna nawijanego na rdzeń mogły sprawić, że miejsca leżące po przeciwnych stronach na obwodzie rury różniły się względem siebie, a nie jak zakładano były jednakowe. W procesie nawijania istnieje ryzyko niecałkowitego przesycenia włókna jak i możliwość powstania pęcherzy powietrza zamkniętych między warstwami. Oba zjawiska wpływają niekorzystnie na wytrzymałość kompozytu. Trafienie w któreś z wymienionych pól mogło być przyczyną uzyskania błędnego wyniku.
6. Powierzchnie zdelaminowane mierzono metodą najprostszą – poprzez ich ręczne obrysowanie, a następnie analizę cyfrową. Druga część jest zależna tylko i wyłącznie od programu – zadaniem użytkownika jest jedynie zaznaczenie pola, które ma być poddane analizie – w związku z tym ryzyko popełnienia błędu jest niewielkie. Pierwsza część natomiast – ręczny obrys – zawsze obciążona jest błędem oka ludzkiego.
7. Wybrane sposoby badań są niedoskonałe i obciążone błędem w postaci czynnika ludzkiego. Istnieje jednak możliwość udoskonalenia badań – większej dokładności miejsca trafienia, lub zastosowania innej metody (skanera) do mierzenia powierzchni uszkodzeń, co poprawi ich wiarygodność i doprowadzi do lepszego poznania mechanizmów zniszczenia na skutek udaru kompozytowych konstrukcji nawijanych.
8. Brak możliwości odniesienia uzyskanych wyników do danych literaturowych w znacznym stopniu utrudnił ocenę poprawności przeprowadzonych doświadczeń.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Królikowski W., 2012, *Polimerowe kompozyty konstrukcyjne*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- [2] Wiśniowski, W., 2010, "Influence of mass changes of flying objects on their dynamic features", *Journal of KONES*, Vol. 17, pp. 591-598.
- [3] Perillo G., Grytten F., Sørbo S., Delhaye V., 2015, "Numerical/experimental impact events on filament wound composite pressure vessel", *Composites: Part B* 69, pp. 406-417.
- [4] Perillo G., Vedvik N. P., Echtermeyer A.T. (2014), "Numerical and experimental investigation of impact on filament wound glass reinforced epoxy pipe", *Journal of Composite Materials*, DOI: 10.1177/0021998314525485.
- [5] Błażejowski W., 2013, *Kompozytowe zbiorniki wysokociśnieniowe wzmocnione włóknami według wzorów mozaikowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- [6] Barcikowski M., 2012, Wpływ materiałów i struktury laminatów poliestrowo-szklanych na ich odporność na udar balistyczny, *Praca doktorska ZUT*, Szczecin.
- [7] Błażejowski W., 1999, Wpływ struktury nawijania włókna na wytrzymałość elementów walcowych wykonanych z kompozytu epoksydowo-szklanego, *Praca doktorska PWr*, Wrocław.
- [8] Bobrowska M., 2015, Uszkodzenia udarowe w kompozytowych konstrukcjach nawijanych, *Praca magisterska PWr*, Wrocław
- [9] Błażejowski W., Domański M., Rybczyński R., Wiewiórski P., 2009, „Poszukiwania optymalnej struktury zbiorników kompozytowych wykonanych z użyciem nawijarki sterowanej numerycznie”, *Czasopismo Techniczne Mechanika*, 1-M/2009.

IMPACT DAMAGE RESEARCH IN COMPOSITE FILAMENT-WOUND TUBES DESIGNED BY ARRAY METHOD

Abstract

This work presents results of high velocity impact damage in composite filament-wound structures. The subject of research was five-layered composite pipes that have been designed and manufactured in such way as to be able to assess the effect of reinforcement structure – three different mosaic patterns – on the size and nature of impact damage in the composite. The selection of mosaic pattern was based on an array method. It allows to get a lot of mosaic patterns with different rest of the winding stroke and the number of interlaces, which are places of stress concentration and significantly affect the strength of the composite. Impact strength of the composite filament-wound structures was tested in the range of the high velocity impact of $140 \div 170$ m/s. It is difficult to define which mosaic pattern has the highest impact resistance in the field of high velocity impact.

Keywords: composite filament-wound structures, impact damage, ballistic impact, array method, filament winding