

## Wojciech Błażejowski

Politechnika Wroclawska, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, ul. M. Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław, Poland  
Corresponding author. E-mail: Wojciech.Blazejewski@pwr.wroc.pl

Otrzymano (Received) 08.02.2010

# ZASTOSOWANIE METODY TABLICOWEJ W PROJEKTOWANIU OPLOTU KOMPOZYTOWEGO BUTLI WYSOKOCIŚNIENIOWYCH

Zaproponowano nową metodę, zwaną metodą tablicową, użyteczną w projektowaniu architektury ułożenia włókien w materiałach kompozytowych wzmocnianych włóknami, wytwarzanych metodą nawijania. Wykazano użyteczność tego sposobu do projektowania opłotu kompozytowego wysokociśnieniowych butli ciśnieniowych. Otrzymano 40 szt. wysokociśnieniowych butli z 8 rodzajami struktury opłotu. Podano dla każdej struktury opłotu właściwości zbiorników, takie jak: grubość warstwy opłotu, zawartość przepłotów oraz odkształcenia zmierzone w obszarach bez przepłotów oraz w obszarach ich uporządkowania („linie” przepłotów). Prezentowane wyniki badań potwierdzają informacje literaturowe o negatywnym wpływie obecności przepłotów i powiązanych z nimi pustek na właściwości kompozytów wykonanych metodą nawijania. Z badań opłotów optymalny okazał się opłot o strukturze Nr1, charakteryzujący się najmniejszą liczbą przepłotów i ich największym uporządkowaniem. Wykonane badania sugerują, że przy doborze architektury opłotu kompozytowego (wykonanego metodą nawijania) do pracy pod ciśnieniem wewnętrznym należy przyjąć, między innymi, następujące kryteria: minimalizowanie liczby przepłotów i maksymalizowanie obszarów ich uporządkowania.

**Słowa kluczowe:** nawijanie włókna, metoda tablicowa, projektowanie struktury opłotu, przepłot, linie skrzyżowań, struktury nawijane, wysokociśnieniowe butle kompozytowe

## DESIGNING OF WOUND COMPOSITE STRUCTURE FOR HIGH PRESSURE COMPOSITE VESSELS BY TABLE METHOD

High strength/weight ratio is one of the most important advantage of GFR applications. It is also true for the case of high pressure composite vessels used for storage of compressed gases like natural gas (CNG) and compressed hydrogen (CH<sub>2</sub>). The composite layers for composite high pressure vessels are commonly produced by winding of resin impregnated continuous fibre bundles on metallic or plastic cylinders (liner). Fibre bundle architecture in wound composite layers is closely connected with vessel mechanical properties. The winding manufacturing process introduce into wound composite materials some species like fibre crossovers and interweavings, fibre undulations and „rich” resin localisations. These are known to be localisations where usually damage initiation start. Thus fibre architecture designing is one of the most important step. The new fibre architecture design method (table method) has been here presented. This method allows easier designing of wound structure and consumes less time and object number. Forty high pressure composite vessels with 8 possible fibre architectures (according to table method) have been made by winding of epoxy resin impregnated continuous glass fibre on 114 mm diameter metallic liners (10 l volume) at  $\pm 55^\circ$  winding angle. The strains (in the interweaving arrangement region - „interweaving lines” LP and in the free interweaving region at 27.5 MPa internal pressure), voids and total interweaving amounts in 8 wound structures have been given. It was found that the strains in the free interweaving region decrease with the increase in the total interweaving number, but the strains in the interweaving arrangement regions behave in opposite way. The strains in both regions become very close to each other for high amount of interweavings and small interweaving arrangement. It was also found that scatters for both measured strains increase from 5 to 20% for 131 and 580 total interweaving amounts, respectively. One may conclude that damage process in high pressure composite vessels at 27.5 MPa internal pressure is more far gone when the wound fibre architectures have high total interweaving amounts and interweaving arrangement regions are small. It also seems that designer of wound fibre architectures for internal pressure load applications should choice ones with minimum interweaving amount and high arrangement region.

**Keywords:** fibre winding, filament winding, table method, fibre architecture designing, interweaving, fibre crossovers lines, wound structures, high pressure composite vessel

## WPROWADZENIE

Butle kompozytowe ze względu na nawet czterokrotną redukcję masy w porównaniu do stalowych najszerze zastosowanie znajdują w przemyśle motoryzacyjnym

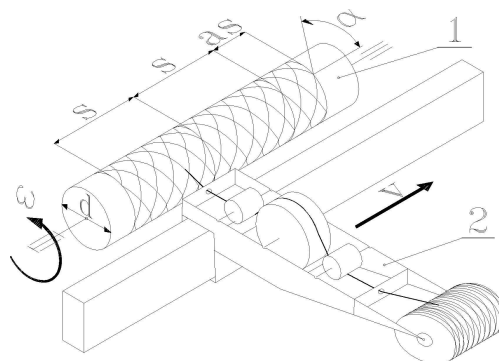
jako zbiorniki paliwa w postaci sprężonego gazu ziemnego (CNG) lub sprężonego wodoru (CH<sub>2</sub>). Analiza budowy butli kompozytowych wytwarzanych przez re-

nomowane firmy światowe, a w szczególności analiza stosowanych struktur oplotów kompozytowych, pozwala stwierdzić, iż każda firma stosuje inny sposób ułożenia włókien. Różnice dotyczą podstawowych wielkości opisujących oplot, takich jak: liczba nawiniętych warstw, grubość oplotu, kąt nawijania poszczególnych warstw, sekwencja warstw, wykończenie powierzchni zewnętrznej itd. Oznacza to, iż nie ma powszechnie znanej, udokumentowanej i stosowanej metody doboru struktury nawoju kompozytowego. Oplot kompozytowy butli ciśnieniowej powstaje w procesie nawijania (zwykle zautomatyzowanego) włókna ciągłego nasyconego lepyszczem organicznym na zbiornik wewnętrzny (lit. ang. liner). Podczas nawijania wiązki włókna na elementach walcowych pod kątem  $\pm\alpha$  wiązki włókien w kierunku  $+\alpha$  przeplatają się z wiązkami  $-\alpha$ . W ten sposób powstają skrzyżowania i tzw. przeploty. Miejsca przeplotów zależą głównie od położenia nawrotu suportu nawijarki, kiedy to wiązka zmienia kąt nawijania z  $+\alpha$  na  $-\alpha$ . Na powierzchni walcowej zbiornika nawijane wiązki odwzorowują podłoże, układając się faliście jedna na drugiej. Powstawanie skrzyżowań, przeplotów, lokalnych pustek oraz miejsc wzbogaconych w żywicę jest nieodłącznie związane z procesem nawijania, lecz zależy od parametrów nawijania, między innymi takich jak: grubość i szerokość wiązki włókna, naciąg włókna itd. Podczas obciążania materiału kompozytowego w miejscach przeplotów, skrzyżowań, pustek i w miejscach wzbogaconych w żywicę powstają lokalne koncentracje naprężeń i odkształceń, a także następuje inicjowanie i rozwój uszkodzeń prowadzących do zmian sztywności materiału kompozytowego oraz jego zniszczenia. Potwierdzają to doniesienia literaturowe, w których rozważano znaczenie obecności skrzyżowań, przeplotów, niekorzystnego zagięcia wiązki włókna w przeplotach, odchylenia kierunku wiązki od kierunku odkształceń i naprężeń głównych w materiale kompozytowym i określono je jako miejsca powstawania uszkodzeń i sprzyjające ich rozwojowi [1-7]. Przez odpowiednią kontrolę procesu nawijania można sterować liczbą i rozmieszczeniem przeplotów. Metodyka doboru i badanie struktur nawijanych, które proponuje to opracowanie, ma szczególne uzasadnienie, zwłaszcza w konstrukcjach zaawansowanych, takich jak kompozytowe butle wysokociśnieniowe. Problemy związane ze strukturą nawijanej warstwy kompozytowej rozważało wielu badaczy. Piątek teoretycznie opisał proces nawijania, lecz praktyczne wykorzystanie tego opisu jest trudne [8]. Nawijanie jako proces wymaga szczególnej dokładności przy układaniu wiązek włókna, co podkreślają prace [1-7]. Obecnie w przemyśle projektowanie i analizę procesu nawijania przeprowadza się z użyciem komercyjnych programów komputerowych. W czasie projektowania oprogramowanie oferuje rozbudowaną grafikę przestrzenną, wyznacza grubość elementów nawijanych (np. zbiornika na dennicach), oferuje obliczenia MES itd., a także generuje kody do nawijarki sterowanej numerycz-

nie, która wykonuje zaprojektowany element. Zdaniem autora, większość badaczy struktur nawijanych korzysta z tego typu oprogramowań, wprowadzając ograniczenia na samym początku swoich rozważań. Ograniczenie to dotyczy zaszeregowania nawojów według dokładności wykonania struktury. Dokładność wykonania oznacza takie żonglowanie parametrami nawijania przez program komputerowy, aby uzyskać równomiernie rozłożony nawój. Chodzi tutaj o takie parametry, jak: szerokość wiązki, kąt nawijania, liczba wiązek, długość nawijania itp. Nieznaczna zmiana tych parametrów w zakresie kilku procent pozwala na zaprezentowanie przez program komputerowy całej gamy możliwych do wykonania nawojów, jednak nie ma tu porządku ze względu na jakiś jeden parametr. W tej pracy autor proponuje metodę zwaną tablicową, która znacznie upraszcza etap projektowania struktur nawijanych. Wyniki badań własnych autora, przedstawione w [5-7], dowodzą, iż odmienne sposoby ułożenia pasm włókna w nawijanych elementach kompozytowych mogą prowadzić nawet do 40% różnic w wytrzymałości, np. rur na skręcanie. Praca [9], którą szczegółowo omówiono w [5], była materiałem wyjściowym do opracowania poniżej opisanej metody tablicowej.

## OPIS METODY TABLICOWEJ

Na rysunku 1 przedstawiono schemat dwuosiowego nawijania z zaznaczonymi parametrami nawijania, oś 1 - obracający się rdzeń ze stałą prędkością kątową  $\omega$ , oś 2 - suport poruszający się ruchem posuwisto-zwrotnym z prędkością  $v$ . W przypadku nawijania brył obrotowo symetrycznych, takich jak: kula, stożek, elipsa itp., prędkość liniową ruchu suportu  $v$  ogólnie określono wzorem:  $v = dl/dt$ , gdzie  $l$  jest drogą przebytą przez suport w czasie  $t$ .

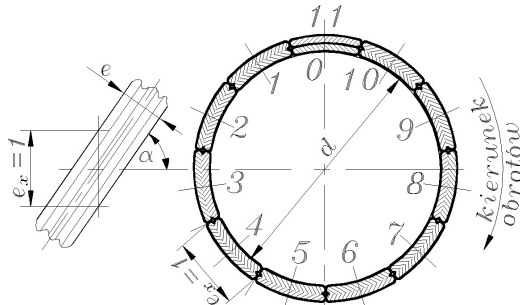


Rys. 1. Schemat dwuosiowego procesu nawijania: 1 - rdzeń, 2 - suport, s - skok nawijania,  $\alpha$  - współczynnik,  $a \in (0,1)$

Fig. 1. Scheme two axis filament winding process. 1 - mandrel, 2 - support, s - winding jump,  $\alpha$  - coefficient,  $a \in (0,1)$

Na rysunku 2 przedstawiono przekrój rdzenia z nawiniętymi jedenastoma wiązkami (przesycony rowing), rozmieszczonymi równomiernie na obwodzie, oraz widok pojedynczej wiązki o szerokości  $e_x = e/\cos\alpha$ . Parametra-

mi sterującymi (rys. 1) są: współczynnik reszty skoku nawijania  $a$  oraz przyjęta liczba naturalna  $n$ , będąca krotnością wiązki włókna na obwodzie elementu nawijanego  $ne_x = \pi d$ . Poniżej przedstawiono sposób tworzenia tablicy możliwych nawojów (warstw) dla przypadku nawijania walca o średnicy  $d$  (części walcowej zbiornika).



Rys. 2. Przekrój części walcowej z nawiniętą strukturą Nr1,  $e$  - szerokość wiązki,  $e_x = e/\cos\alpha$

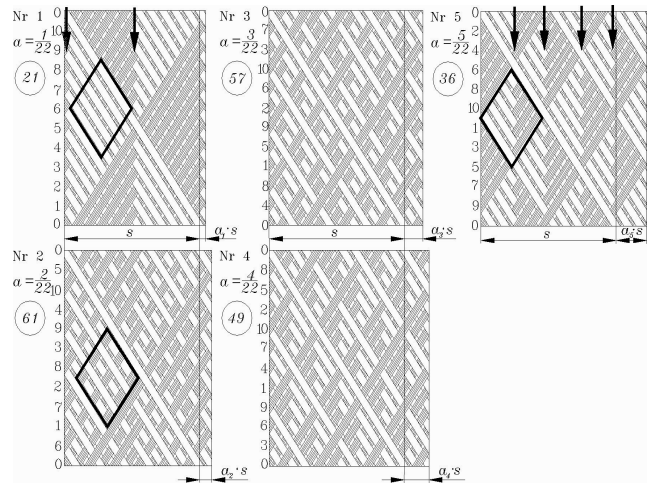
Fig. 2. Cross section of cylindrical part with Nr1 winding structure,  $e$  - fibre bundle wide,  $e_x = e/\cos\alpha$

**Przykład:** liczba wiązek na obwodzie części walcowej  $n = 11$  (równa numerowi tablicy), kąt nawijania  $\alpha = \sim 55^\circ$ , szerokość wiązki  $e_x$  w przekroju poprzecznym rdzenia (rys. 2):  $e_x = e/\cos\alpha = 1$ . Na rysunku 3 przedstawiono tablicę 11, która pokazuje wszystkie 22 możliwe do wykonania warstwy pokrywające obwód walca. Na rysunku 4 przedstawiono obrazy graficzne warstw z tablicy 11. Należy zwrócić uwagę, że pierwsze 5 warstw (wierszy) w tablicy 11 zaznaczonych pogrubionym drukiem (rys. 3) powtarza się w dalszych wierszach. Przykładowo warstwa (wiersz) Nr1 jest taka sama jak warstwy (wiersze) Nr10, 12 i 21 w tej tablicy.

Nr warstwy	Kolejność układania wiązek na obwodzie walca											a	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		11
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 11” (11 wiązek na obwodzie walca)

Fig. 3. „Table 11” (11 circumference bundles), Nr - type of layer, bundles order on the circumference, value of  $a$  - coefficient,  $a \in (0,1)$



Rys. 4. Obrazy graficzne warstw (struktur nawijanych) Nr1 - 5 wygenerowanych przez „tablicę 11” (rys. 3)

Fig. 4. Pattern of the layers (winding structures) Nr1 - 5 generated by „table 11” (fig. 3)

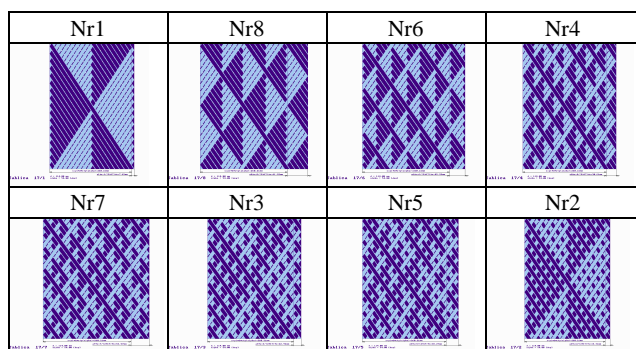
- Tablica składa się z trzech kolumn: 1 - kolejny numer możliwej do wykonania warstwy, 2 - kolejność układania wiązek w warstwie, 3 - wartość liczbową bezwymiarowego współczynnika reszty skoku nawijania  $a$ . Przy oznaczaniu kolejności wiązek (tu od 0 do 11) posłużono się zasadą: „na przekątnej jedynka”, a następnie wpisywano kolejne liczby w odstępach takich, jakie powstały między zerem i jedynką.
- Ze względu na współczynnik reszty skoku nawijania  $a$  rozróżnia się w tablicy cztery przedziały podobieństwa nawojów: (0; 0,25), (0,25; 0,5), (0,5; 0,75) i (0,75; 1). Podział na przedziały jest widoczny w kolumnie 2. Warstwa Nr1 jest w efekcie końcowym taka sama jak Nr10, 12 i 21, o czym świadczy kolejność liczb w wierszu (rys. 3). Różnica jedynie jest taka, że nawoje Nr10 i 21 mają zwrot kierunku narastania kolejnych numerów wiązek na obwodzie przeciwny do kierunku obracania się zbiornika. Analogiczne podobieństwa odnoszą się do następujących grup nawojów: (2, 9, 13, 20), (3, 8, 14, 19), (4, 7, 15, 18) i (5, 6, 16, 17). Powyższa uwaga ma szczególne znaczenie przy doborze długości nawijania.
- Warstwy 0, 11 i 22, w których  $a = 0; 0,5$  i  $1$ , są przypadkami szczególnymi - występują one w każdej tablicy nawojów niezależnie od przyjętej liczby podziału obwodu, jednak nie mają zastosowania. Warstwa (wiersz) 11 jest osią symetrii tablicy (rys. 3) i dzieli ją na pół w miejscu, gdzie  $a = 0,5$ . Jest to cecha charakterystyczna wszystkich tablic.
- Powyższe podobieństwa nawojów pozwalają na uproszczenie tablicy, to znaczy zapisanie tylko Wierszy spełniających warunek:  $a$  należy do przedziału (0; 0,25) - pogrubiony druk na rysunku 3. Pozwala to na znaczne zredukowanie liczby przygotowywanych próbek w późniejszym etapie pracy.
- Współczynnik reszty skoku nawijania  $a$  w kolejnych nawojach jest coraz większy o wartość  $1/22$ :  $a = Nr/2n =$

=  $Nr/22$ , gdzie  $n$  jest liczbą podziału obwodu rdzenia ( $n = \pi d/e_x = 11$ ,  $n$  jest zawsze liczbą naturalną).

- W metodzie tablicowej dowolną warstwę opisują jedynie dwie liczby, np. 11/4 (liczba wiązek włókna na obwodzie / numer wiersza). Projektant, korzystając z tablicy, wybiera numer warstwy oraz opisujący ją współczynnik reszty skoku nawijania  $a$ .
- Na rysunku 4 przedstawiono obrazy graficzne warstw od 1 do 5, które wyraźnie pokazują różnice w architekturze ułożenia wiązek pomiędzy nimi. Ramkami zaznaczono cechy charakterystyczne warstw, takie jak obszary bez przeplotów (warstwa Nr1), obszar z linią przeplotów (LP) (warstwa Nr5) oraz obszar z bardzo dużą liczbą przeplotów (warstwa Nr2). Linie przeplotów (LP) zaznaczono strzałkami w warstwach Nr1 i 5. W pozostałych warstwach LP są krótsze i rozproszone. Liczby w okręgach (rys. 4) są miarą liczby przeplotów.

## WYKONANIE OPLITÓW KOMPOZYTOWYCH

Wykonano 40 sztuk kompozytowych butli wysokociśnieniowych typu CNG-3 (z metalowymi linerami) o średnicy 114 mm i objętości 10 litrów. Butle nawijano wiązką złożoną z pięciu rowingów włókna szklanego (tex 2400), uzyskując wiązkę o szerokości  $e_x = 21$  mm. Przy tej wiązce na pokrycie obwodu potrzeba ich 17, stąd ma zastosowanie tablica 17, w której można znaleźć osiem różnych struktur, przedstawionych na rysunku 5. Pełny oplot składał się z 3 identycznych warstw. Wykonano po 5 sztuk butli dla każdej z podanych ośmiu struktur nawijanych. Wiazkę włókien nawijano z prędkością ok. 0,8 m/s przy naciągu ok. 7 kG. Wiazkę nasączano żywicą epoksydową EPOLAM 5015 i 5016 firmy AXON, podgrzewaną do temperatury 35°C. Utwardzanie nawoju prowadzono w temperaturze 21°C przez 12 godz. w ruchu obrotowym; dotwardzano w temperaturze 75°C przez 24 godz.



Rys. 5. Ośmiem struktur nawijanych wygenerowanych przez „tablicę 17”

Fig. 5. The eight of winding structures generated by „table 17”

## OMÓWIENIE WYNIKÓW

W tabeli 1 podano wyniki pomiarów odkształceń (średnie arytmetyczne), udziału pustek i grubości ścianki

nek oplotów kompozytowych uszeregowanych według wzrastającej liczby przeplotów. Liczbę przeplotów (każde przejście wiązki w dolną część warstwy) obliczono z obrazów graficznych struktur (rys. 5). Odkształcenia przy ciśnieniu 27,5 MPa (50% ciśnienia niszczonego) w obszarach uporządkowania przeplotów („linie”, LP) oraz w obszarach bez przeplotów mierzono przy użyciu światłowodowych siatek Bragga (ŚSB) w sposób opisany w [10]. Wyniki pomiarów grubości stanowią średnią arytmetyczną z 50 pomiarów na tworzącej części walcowej zbiornika. Udział miejsc pustych w oplotach kompozytowych szacowano z obserwacji mikroskopowych.

TABELA 1. Wyniki badań struktur z rysunku 5 wygenerowanych przez „tablicę 17”

TABLE 1. Tests results of structures from fig. 5, generated by „table 17”, number of interweavings, deformations on and beside LP, air bubbles and thickens of the layers

	Nr1	Nr8	Nr6	Nr4	Nr7	Nr3	Nr5	Nr2
Liczba przeplotów	131	243	345	418	473	531	565	580
Odkształcenie poza LP, $\mu\epsilon$	5200 $\pm 5\%$	5100 $\pm 5\%$	5000 $\pm 6\%$	4800 $\pm 7\%$	4600 $\pm 10\%$	4300 $\pm 20\%$	4500 $\pm 20\%$	4700 $\pm 20\%$
Odkształcenie na LP, $\mu\epsilon$	3400 $\pm 5\%$	3700 $\pm 5\%$	3700 $\pm 6\%$	3800 $\pm 7\%$	3900 $\pm 10\%$	4200 $\pm 20\%$	4300 $\pm 20\%$	4800 $\pm 20\%$
Udział pustek %	1,9	4,3	4,2	5,6	7,1	8,8	8,7	7,9
Grubość ścianki, mm	4,22	4,25	4,24	4,27	4,26	4,30	4,32	4,32

Odkształcenia w obszarach bez przeplotów maleją wraz ze wzrostem liczby przeplotów w warstwie, natomiast odkształcenia w obszarach uporządkowania przeplotów (LP) rosną wraz z liczbą przeplotów. Wraz ze wzrostem liczby przeplotów wartości odkształceń w obszarach bez przeplotów i w obszarach uporządkowania przeplotów stają się porównywalne. Wydaje się, że ma to związek ze zmniejszaniem się obszarów uporządkowania przeplotów LP wraz ze wzrostem ich liczby w warstwie. Ze wzrostem liczby przeplotów i zmniejszaniem się obszarów ich uporządkowania rosną istotnie rozrzuty pomiarów odkształceń od  $\pm 5\%$  dla warstwy Nr1, do  $\pm 20\%$  dla warstw Nr3, 5 i 2. Może to świadczyć o większym postępie rozwoju uszkodzeń w strukturze Nr2 aniżeli przykładowo w strukturze Nr1 o najmniejszej liczbie przeplotów i największym ich uporządkowaniu, przy obciążeniu ciśnieniem wewnętrznym równym około 50% ciśnienia niszczonego. Wraz ze wzrostem liczby przeplotów rośnie znacząco udział pustek. W strukturze Nr2 jest on czterokrotnie większy aniżeli w strukturze Nr1.

Wykonane badania sugerują, że przy doborze architektury oplotu kompozytowego (wykonanego metodą nawijania) do pracy pod ciśnieniem wewnętrznym należy przyjąć, między innymi, następujące kryteria: minimalizowanie liczby przeplotów i maksymalizowanie ich uporządkowania w postaci LP.

## PODSUMOWANIE

1. Zastosowanie zaproponowanej metody tablicowej upraszcza proces projektowania oplotów kompozytowych wykonanych metodą nawijania i pozwala na zredukowanie liczby obiektów badań.
2. Wykonano 8 oplotów kompozytowych (na linerach metalowych) zaprojektowanych metodą tablicową o różnej liczbie przeplotów i wielkości obszarów uporządkowania przeplotów. Stwierdzono, że ze wzrostem liczby przeplotów rośnie udział pustych miejsc w oplocie.
3. Prezentowane wyniki badań potwierdzają informacje literaturowe o negatywnym wpływie obecności przeplotów i powiązanych z nimi pustek na właściwości kompozytów wykonanych metodą nawijania. Z badanych oplotów optymalny okazał się oplot o strukturze Nr1, charakteryzujący się najmniejszą liczbą przeplotów i ich największym uporządkowaniem w postaci LP.
4. Wykonane badania sugerują, że przy doborze architektury oplotu kompozytowego (wykonanego metodą nawijania) do pracy pod ciśnieniem wewnętrznym należy przyjąć, między innymi, następujące kryteria: minimalizowanie liczby przeplotów i maksymalizowanie obszarów ich uporządkowania.

## Podziękowania

*Praca wykonana z funduszy MOiSW na naukę 2008-2009, projekt nr N N508477534.*

## LITERATURA

- [1] Soden P.D., Kitching R., Tse P.C. Tsavalas Y., Hinton M.J., Influence of winding angle on the strength and deformation of filament-wound comp. tubes subjected to uniaxial and biaxial loads, *Comp. Science and Tech.* 1993, 46, 363-378.
- [2] Claus S.J., Hahn H.T., Processing-structure relationships for filament-wound composite shells, *Sixth Technical Conference on Composite Materials*, Albany, NY, 10, 1991, 866-872.
- [3] Hipp P.A., Jensen D.W., Design and analysis of filament-wound cyl. in compression, *A Collection of Tech. Pap. The 33<sup>rd</sup> AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Struc., Structural Dyn. and Mat. Conf.* Dallas, TX, USA, 04.1992, 2442-2453.
- [4] Rousseau J., Perreux J.D., Verdiere N., The influence of winding patterns on the damage behaviour of filament-wound pipes, *Composites Science and Technology* 1999, 59, 1439-1449.
- [5] Błażejowski W., Wpływ struktury nawijania włókna na wytrzymałość elementów walcowych wykonanych z kompozytu ES, praca doktorska, Politechnika Wroclawska 1999.
- [6] Błażejowski W., Designing of composite manufacturing by the winding method, *Studia Geotechnica et Mechanica* 2001, XXIII, 1-2, 33-42.
- [7] Błażejowski W., Metodyka doboru struktury kompozytowego oplotu nośnego zbiorników wytwarzanych metodą nawijania, *Czasopismo Techniczne - Politechnika Krakowska, Mechanika* 2009, z. 1-M, 9-14.
- [8] Piątek M., Teoretyczne podstawy nawijania elementów rurowych z włókna ciągłego splotem skrzyżowanym przy użyciu jednej wiązki, *Polimery* 1992, 9, 412-417.
- [9] Łuczak M., Nawijanie elementów rurowych z włókna szklanego ciągłego, kryteria teoretyczne, IELOW, dokumentacja techniczna nr 97180050269003786, Wrocław 1980.
- [10] Błażejowski W., Gąsior P., Kaleta J., Interferometryczne czujniki światłowodowe w monitorowaniu wysokociśnieniowych zbiorników komp., XXIII Symp. Mech. Eksp. Ciała Stałego, Jachranka k. W-wy, 15-18.10.2008, s. 5 + pełny tekst na CD.